

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A. MIRA-BEJAIA



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa

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

## Mémoire de Fin d'Étude

*En vue de l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique*

*Option : Électromécanique / Commande des Systèmes Électriques*

### Thème

# ÉTUDE DE LA TENUE DIÉLECTRIQUE DU MATÉRIAU POLYÉTHYLÈNE UTILISÉ DANS L'ISOLATION ÉLECTRIQUE

Présentés par :

Mr. ZERKAK Mounir

Mr. SOUAMI Islam

Devant le jury :

Mr. RAHMANI Allaoua

Mr. HERZINE Mohand Seghir

Encadreurs :

Mr. LAIFAOUI Abdelkrim

Mr. AIT SAID Hakim

Promotion :

2016/2017

# **REMERCIEMENTS**

# *Remerciements*

*Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout-puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.*

*Ça nous fait plaisir de prendre ces quelques lignes, si peu nombreuses, afin de remercier les personnes qui nous ont soutenus durant notre mémoire.*

*D'une façon spéciale, nous tenons à remercier vivement monsieur LAIFAOUI Abdelkrim pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de nous encadrer, pour ses orientations précieuses, ses encouragements, le temps qu'il nous ait consacré tout au long de ce projet et de nous avoir permis de mener nos travaux dans d'excellentes conditions, son support et son professionnalisme ont rendu possible la réalisation des travaux de notre mémoire. Sans oublier également Mr. Hakim AIT SAID, notre Co-promoteur. On tient également à remercier monsieur RAHMANI Allaoua, d'avoir accepté de présider le jury de notre soutenance.*

*On remercie monsieur HERZINE Mohand-Seghir d'avoir accepté d'examiner notre travail de mémoire.*

*Nous remercions aussi nos chers enseignants qui nous ont bien suivis pendant tout notre parcours licence et master*

*Ainsi, nos remerciements pour administration et le service de la faculté entière de technologie*

*En fin, nous remercions tous ceux qui ont contribué à la construction de ce mémoire de près comme de loin*

# **DEDICACES**



## *Dédicaces*

*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 la mémoire de ma grande mère et mon grand père, puisse dieu tout-puissant vous accueillir dans son vaste paradis.*

*A mes deux frères et ma chère sœur.*

*A mes oncles et mes tantes sans manquer mes voisins*

*A tous la famille ZERKAK et tous les habitants de bir slam.*

*A tous mes amis sans exception.*

*A tous ceux qui sont dans ma mémoire et tous ceux qui ont connu Mounir de prés comme de loin.*

*Mounir*





## Dédicaces

*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 la mémoire de mon grand-père, puisse dieu tout-puissant vous accueillir dans son vaste paradis. A mon frère et mes chères sœurs. A mes oncles et mes tantes sans manquer mes voisins A tous la famille Souami et tous les habitants du centre-ville. A tous mes amis sans exception. A tous ceux qui sont dans ma mémoire et tous ceux qui ont connus Islem de prés comme de loin.*

*Islem*



# **SOMMAIRE**

**REMERCIEMENTS**

<b>SOMMAIRE</b> .....	i
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	iv
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	vii
<b>GLOSSAIRE</b> .....	viii

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
------------------------------------	---

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

1. Introduction .....	3
2. Matériau diélectrique.....	3
3. Caractéristique diélectrique des isolants .....	3
3.1 Permittivité relative .....	3
3.2 Rigidité diélectrique .....	4
4. Claquage des isolants solides .....	5
5. Essais de rigidité électrique.....	5
6. Rupture diélectrique .....	6
7. Différents mécanismes de claquage .....	6
7.1 Claquage thermique.....	6
7.2 Claquage d'origine électronique .....	6
7.3 Claquage intrinsèque .....	6
7.4 Claquage associé au volume libre .....	7
7.5 Claquage par avalanche.....	7
7.6 Claquage électromécanique.....	8
8. Claquage des isolants électriques dans le temps .....	9
8.1 Rupture à court terme .....	9
8.1.1 Effet de la tension et du système d'électrodes .....	9
8.1.2 Effet de la température .....	9
8.1.3 Effet de l'épaisseur de l'isolant.....	10
8.2 Rupture à long terme .....	10
9. Décharges partielles .....	12

9.1	Naissance des décharges partielles.....	12
10.	Les tests diélectriques.....	14
10.1	Les facteurs d'influence sur les tests diélectriques .....	14
10.2	Facteurs déterminants en tests industriels .....	15
11.	Conclusion.....	15

## CHAPITRE II :

### MODÈLE DE WEIBULL ET TENUE DIÉLECTRIQUE

1.	Introduction .....	17
2.	Caractère aléatoire des valeurs de rupture diélectrique.....	17
3.	Modèles statistiques et lois de probabilité.....	17
4.	Modèle statistique de Weibull.....	18
5.	Application du modèle de Weibull à l'étude de la tenue diélectrique des isolants solides.. .....	19
5.1	Critères d'application .....	19
5.2	Application à la rupture à court terme.....	19
6.	Traçage du diagramme de Weibull .....	20
7.	Régression linéaire .....	21
8.	Modèles de régression linéaire .....	22
8.1	Lissage linéaire par la méthode des moindres carrés .....	22
8.1.1	Représentation à deux paramètres.....	22
8.1.2	Représentation à trois paramètres .....	23
8.2	Lissage linéaire par la méthode du maximum de vraisemblance.....	24
8.2.1	Représentation à deux paramètres.....	25
8.2.2	Représentation à trois paramètres .....	25
8.3	Comparaison entre les deux méthodes .....	25
9.	Intervalles de confiance.....	26
9.1	Introduction .....	26
9.2	Estimation des intervalles de confiance .....	26
9.3	Calcul des intervalles de confiance pour une distribution de Weibull.....	27
10.	Tests d'adéquation.....	27

---

10.1	Test de khi-deux .....	28
10.2	Test de Kolmogorov-Smirnov.....	30
11.	Avantages de la loi de Weibull .....	30
12.	Conclusion.....	31

### **CHAPITRE III :**

#### **LE POLYMERE POLYETHYLENE PE**

1.	Introduction .....	32
2.	Matériau étudié.....	32
3.	Généralités sur les polymères.....	32
3.1	Définition d'un polymère .....	32
3.2	Utilisation des polymères dans l'isolation électrique.....	33
4.	Présentation du polyéthylène .....	34
4.1	Introduction .....	34
4.2	Polyéthylène (PE).....	35
4.2.1	Structure .....	35
4.2.2	Différents types de polyéthylène.....	35
5.	Conclusion.....	36

### **CHAPITRE IV :**

#### **PARTIE EXPERIMENTALE**

1.	Introduction .....	37
2.	Matériau étudié.....	37
3.	Préparation des échantillons.....	38
4.	Essais expérimentaux .....	38
5.	Dispositifs expérimentaux.....	38
5.1	Dispositif des essais sous tension alternative sinusoïdale.....	38
5.2	Dispositif des essais sous tension continue .....	39
5.3	Cellule de mesure .....	40
6.	Déroulement des essais .....	41
7.	Précautions pendant les essais.....	41

---

8.	Traçage du diagramme de Weibull .....	42
9.	Essais sous tension alternative sinusoïdale .....	43
9.1	Diagrammes de Weibull.....	43
9.2	Résultats de l'analyse statistique .....	48
9.3	Résultats des tests d'adéquation.....	48
10.	Essais sous tension continue de polarité positive.....	48
10.1	Diagrammes de Weibull.....	48
10.2	Résultats de l'analyse statistique .....	53
10.3	Résultats des tests d'adéquation.....	53
11.	Essais sous tension continue de polarité négative.....	53
11.1	Diagrammes de Weibull.....	53
11.2	Résultats de l'analyse statistique .....	58
11.3	Résultats des tests d'adéquation.....	58
12.	Discussions.....	58
12.1	Diagrammes de Weibull.....	58
12.2	Tests d'adéquation.....	59
12.3	Influence de la forme et de la rampe de tension appliquée sur la tension et le champ de rupture.....	60
13.	Conclusion.....	62
	<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>65</b>
	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>67</b>

## **LISTE DES FIGURES**

## Liste des figures

### Chapitre I

Figure I. 1 : Condensateur plan à vide .....	4
Figure I. 2 : Allure générale de la dépendance en température de la rigidité diélectrique.....	10
Figure I. 3 : Modèle proposé par Jonscher et al intégrant une action cumulative du champ et du temps .....	12
Figure I. 4 : Schéma équivalent d'un isolant avec une cavité .....	13

### Chapitre II

Figure II. 1 : Formule générale de la polyoléfine.....	34
Figure II. 2 Schéma représentatif du polyéthylène [23].....	35

### Chapitre IV

Figure IV. 1 : Schéma de dispositif des essais de claquage sous tension alternative sinusoïdale.....	39
Figure IV. 2 : Schéma de dispositif des essais de claquage sous tension continue.....	40
Figure IV. 3 : Cellule de mesure .....	40
Figure IV. 4 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 3.66Kv/s .....	44
Figure IV. 5 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 2.69kV/s .....	44
Figure IV. 6 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 2.2kV/s .....	45
Figure IV. 7 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 1.87kV/s .....	45
Figure IV. 8 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 1.45kV/s .....	46
Figure IV. 9 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 1.24kV/s .....	46
Figure IV. 10 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 0.88kV/s .....	47

Figure IV. 11 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 0.37kV/s .....	47
Figure IV. 12 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue positive de 3.66 kV/s.....	49
Figure IV. 13 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue positive de 2.69kV/s.....	49
Figure IV. 14 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue positive de 2.2 kV/s.....	50
Figure IV. 15 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue positive de 1.87kV/s.....	50
Figure IV. 16 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue positive de 1.45kV/s.....	51
Figure IV. 17 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue positive de 1.24kV/s.....	51
Figure IV. 18 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue positive de 0.88kV/s.....	52
Figure IV. 19 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue positive de 0.37kV/s.....	52
Figure IV. 20 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue négative de 3.66kV/s.....	54
Figure IV. 21 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue négative de 2.69kV/s.....	54
Figure IV. 22 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue négative de 2.2kV/s.....	55
Figure IV. 23 :Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue négative de 1.87kV/s.....	55
Figure IV. 24 :Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue négative de 1.45kV/s.....	56
Figure IV. 25 :Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue négative de 1.24kV/s.....	56
Figure IV. 26 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue négative de 0.88kV/s.....	57
Figure IV. 27 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue négative de 0.37kV/s.....	57

Figure IV. 28 : Champ de claquage en fonction des vitesses de la tension appliquée..... 62

# **LISTE DES TABLEAUX**

---

## Liste des tableaux

### Chapitre I

Tableau I. 1 : Exemples d'utilisation des isolants organiques solides [3]..... 33

### Chapitre IV

Tableau IV. 1 : Paramètres de Weibull des valeurs de rupture en tension alternative..... 48

Tableau IV. 2 : Résultats des tests d'adéquation des valeurs de rupture sous rampe de tension alternative ..... 48

Tableau IV. 3 : Paramètres de Weibull des valeurs de rupture en tension continue de polarité positive ..... 53

Tableau IV. 4 : Résultats des tests d'adéquation des valeurs de rupture sous rampe de tension continue de polarité positive ..... 53

Tableau IV. 5 : Paramètres de Weibull des valeurs de rupture en tension continue de polarité négative ..... 58

Tableau IV. 6 : Résultats des tests d'adéquation des valeurs de rupture sous rampe de tension continue de polarité négative..... 58

# **GLOSSAIRE**

$T_g$  : Température de transition vitreuse

$T_f$  : Température de fusion

$\text{tg}\delta$  : Facteur de pertes diélectriques

$\epsilon_r$  : Constante diélectrique relative

$\rho_t$  : Résistivité transversale

$C_v$  : Chaleur spécifique

$K$  : Conductivité thermique

$\sigma$  : Conductivité électrique

$E$  : Champ électrique

$t$  : Temps ou durée de vie

$V_{oc}$  : Tension critique de claquage

$W$  : Énergie d'activation

$k$  : Constante de Boltzmann

$i$  : Rang des valeurs

$E_s$  : Champ électrique seuil

$R$  : Vitesse de variation du vieillissement

$\Delta H$  : Enthalpie d'activation

$\Delta S$  : Entropie d'activation

$h$  : Constante de Planck

$f$  : fréquence électrique

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

La fonction d'isolation est primordiale du fait qu'elle est l'une des conditions fondamentales du fonctionnement des matériels de production, de transport et de distribution d'énergie électrique[1].

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. Malgré les excellentes propriétés mécaniques et électriques du polyéthylène basse densité, qui permettent son utilisation sur une large échelle comme un isolant des câbles moyenne et haute tension, son comportement thermique à haute température et son caractère thermoplastique limitent assez cette utilisation surtout avec le développement de la nouvelle technologie des câbles 500 kV. Cette technologie est basée sur l'utilisation d'un autre matériau qui résiste mieux à la température et présente, aux hautes températures, des propriétés mécaniques et électriques améliorées que celle du polyéthylène. C'est dans ce cadre que le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) est devenu un produit de remplacement du PE [1].

Toutefois, bien que l'isolation en polymère présente des avantages sérieux et non négligeables à la fois sur le plan technique et sur le plan économique, il n'en demeure pas moins que ces matériaux présentent certains inconvénients parmi lesquels nous pouvons citer les pertes diélectriques importantes à partir d'une certaine valeur de la tension d'utilisation. Ainsi, la connaissance de la rigidité diélectrique du matériau est indispensable pour dimensionner et utiliser un matériau diélectrique dans un dispositif moyenne ou haute tension.

Pendant l'application de champs électriques intenses, ces polymères sont sujets au vieillissement ; ce qui conduit à des avaries dans les équipements où ils sont employés.

Cependant, lors des essais de rupture diélectrique sur des échantillons placés dans des conditions expérimentales identiques, on n'obtient pas une valeur unique ni du temps et ni de la tension de claquage mais une distribution de valeurs. On dit alors que la rupture diélectrique est un phénomène aléatoire, par conséquent, il faut faire les expériences sur un nombre important d'échantillons et, une approche statistique de ce phénomène s'impose et le modèle le plus utilisé est celui de Weibull.

Le présent travail que nous présentons s'insère dans le cadre de l'évaluation de la tenue diélectrique de film en polyéthylène (PE) sous tension alternative et continue. Ce manuscrit est développé sur quatre chapitres et une conclusion générale.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude structurale des polymères en général et à celle du matériau polyéthylène en particulier.

Dans le premier chapitre, nous nous ferons le point sur l'état de l'art des connaissances sur les différents mécanismes de la rupture diélectrique des isolants électriques en polymère.

Une base théorique sur le traitement statistique de la rupture diélectrique sera donnée au deuxième chapitre. Ensuite, nous présenterons sommairement le modèle statistique de Weibull ainsi que son application à l'étude de la tenue diélectrique des isolants solides.

Les différents essais expérimentaux effectués et les dispositifs utilisés seront décrits dans le quatrième chapitre. Aussi, dans ce dernier chapitre, les différents résultats obtenus seront exposés et exploités.

Enfin, en conclusion, nous ferons la synthèse des résultats obtenus et ferons ressortir leurs intérêts et leurs portées.

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

## 1. Introduction

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.

Dans ce chapitre, nous définissons en premier lieu, les matériaux diélectriques (appelés aussi : isolants électriques), et ses différentes caractéristiques. Puis, nous présentons une synthèse sur les différents mécanismes de la rupture diélectrique et des phénomènes conduisant à la rupture des isolants électriques en polymère.

## 2. Matériau diélectrique

Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée :  $10^8$  à  $10^{10}$   $\Omega.m$ , car ils contiennent très peu d'électrons libres. Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques. Un bon isolant ne devrait pas laisser passer de courant lorsqu'il est soumis à une tension continue. Autrement dit, sa résistance en CC doit être infiniment grande. Cependant, en pratique, un courant de fuite très faible circule dans tous les matériaux isolants utilisés en HT continue. Le courant passant à travers un isolant en HT continue est également constant et est appelé courant résiduel. En HT alternative, n'importe que matériau isolant laisserait passer un courant capacitif [3].

Les isolants sont utilisés pour [3] :

- Assurer une séparation électrique entre des conducteurs portés à des potentiels différents afin de diriger l'écoulement du courant dans les conducteurs désirés de protection des personnes et des équipements ;
- Supporter les éléments d'un réseau électrique et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre ;
- Remplir les fonctions de diélectrique d'un condensateur.

## 3. Caractéristique diélectrique des isolants

### 3.1 Permittivité relative

Soit un condensateur plan à vide (ou à air), sa capacité est [3] :

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{e} \quad (I.1)$$

Où  $\epsilon_0 = 8,85.10^{-12}$  F/m est la permittivité absolue du vide (ou de l'air).

Si le même condensateur est rempli par un isolant, sa capacité devient :

$$C = C_0 \epsilon_r = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{e} \quad (I.2)$$

La permittivité relative est définie par le rapport :

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (I.3)$$

La permittivité Absolue est :

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (I.4)$$

Pour l'air, les gaz et le vide,  $\epsilon_r = 1$  Donc,  $\epsilon = \epsilon_0 = 8,85.10^{-12}$  F/m. Pour tous les autres isolants,  $\epsilon_r > 1$

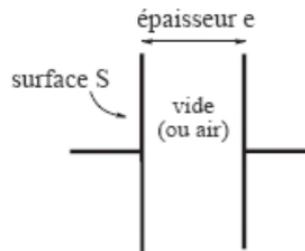


Figure I. 1 : Condensateur plan à vide [3].

### 3.2 Rigidité diélectrique

Si on augmente la tension à laquelle est soumis un isolant au-delà d'une certaine valeur appelée tension de claquage, il apparaît un arc électrique dans l'isolant : courant intense traversant l'isolant en suivant un chemin formé par l'arc lui-même. Dans ce cas, l'isolant est percé : il y a rupture diélectrique ou claquage (destruction de l'isolant), irréversible pour les isolants solides (carbonisation), réversible pour les isolants gazeux et liquides (recombinaison des ions avec des électrons) [3].

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

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

#### **4. Claquage des isolants solides**

Dans les isolants solides : le claquage dans un diélectrique peut provoquer la fusion, brûler ou perforer le diélectrique et les électrodes. Après un claquage, une trace du claquage sous forme de perforation, de fonte ou de brûlure sur le diélectrique peut rester et donner une forme irrégulière à l'isolant. Si une tension est de nouveau appliquée à cet isolant, un claquage survient dans la majorité des cas, suivant le canal tracé par la décharge précédente et même à une tension inférieure. Donc un arc qui survient dans les isolants solides nécessite leur remplacement [4].

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

- la fréquence du réseau : la rigidité diélectrique diminuant avec l'augmentation de la fréquence,
- la température : la rigidité diélectrique diminuant avec l'augmentation de la température,
- la durée d'application de la tension.
- La géométrie et la nature des électrodes

#### **5. Essais de rigidité électrique**

Il faut distinguer les essais effectués afin de déterminer la tension de rupture (ou claquage) d'un milieu isolant, des essais normatifs qui sont utilisés pour détecter d'éventuels défauts sur un produit. Au cours de ces essais normatifs les isolants sont soumis à des tensions généralement très en dessous de leurs limites de rupture: le rapport entre les deux tensions représente en quelque sorte le coefficient de sécurité demandé pour la conception du matériel.

Il existe plusieurs types d'essais de rigidité diélectrique et ils se distinguent principalement par la nature des tensions d'épreuves et des conditions d'applications (durée, vitesse d'évolution, forme, etc...)[4].

## 6. Rupture diélectrique

Un claquage n'est jamais la conséquence directe du champ électrique appliqué au milieu isolant (contrairement à l'extraction des électrons par exemple). Ce phénomène est dû à l'accumulation d'énergie (thermique, cinétique, élastique) que le matériau ne peut compenser.

L'étude de la rupture diélectrique étant très complexe puisqu'elle fait appel à des lois fondamentales sur la matière, on ne regarde dans ce qui suit que les phénomènes disruptifs en tension continue (certains comportements aux fréquences industrielles pouvant être très proches) [4].

Plusieurs types de claquage existent. Mais, on distingue généralement le claquage électronique et le claquage thermique tout en notant que la distinction n'est pas forcément évidente car un claquage électronique conduit toujours à une destruction locale du matériau par fusion thermique et inversement un claquage thermique est principalement la conséquence d'un phénomène d'injection et/ou de conduction de nature électronique.

## 7. Différents mécanismes de claquage

### 7.1 Claquage thermique

Lorsqu'un courant traverse un matériau isolant, la conductivité augmente avec la température. Par suite la température s'élève, le courant augmente à son tour et ainsi de suite.

Si la chaleur accumulée ne s'évacue pas suffisamment vite, le processus peut conduire à un emballement thermique, c'est ce qu'on appelle le claquage thermique [17].

### 7.2 Claquage d'origine électronique

Pour qu'un claquage purement électronique puisse survenir, une condition nécessaire mais ne suffisante, est qu'il existe des électrons pouvant être accélérés et acquérir ainsi dans le champ une énergie comparable à l'énergie d'ionisation des atomes constitutifs (5 à 10 eV) [5]. On distingue que le claquage intrinsèque, le claquage par avalanche et celui associé au volume libre.

### 7.3 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 qu'on appelle le claquage intrinsèque [6].

#### 7.4 Claquage associé au volume libre

Artbauer [7] 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 sphérolites, microvides, contraintes mécaniques) influent directement sur le claquage [8]. L'effet de taux de plastifiant (dioctyle phthalate) sur la rigidité diélectrique du polychlorure de vinyle utilisé dans les câbles moyenne tension a été mis en évidence [9,10]. L'addition de copolymères contenant des pièges à électrons permet d'augmenter la rigidité diélectrique de polyéthylène [11]. Dans une certaine mesure, les impuretés chimiques peu ionisables et les défauts physiques de types dislocation jouent un rôle analogue de limitation de libre parcours électronique [5].

#### 7.5 Claquage par avalanche

La théorie de la rupture par avalanche envisage le claquage comme la conséquence d'une augmentation régulière de nombre de porteurs créés par ionisation. L'origine de ses porteurs (injections des électrodes, génération dans le volume) est envisagée mais le champ électrique est considéré uniforme.

Lors de la collision ionisante avec un atome de 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 deux électrons libres qui peuvent acquérir dans le champ assez d'énergie pour provoquer chacun une nouvelle collision ionisante donc deux électrons et ainsi de suite. Chaque électron libre accéléré produirait une avalanche exponentielle d'ions positifs fixes et un nuage d'électrons libre balayé par le champ. Le claquage par avalanche est caractérisé par un seuil de  $10^8$  V/m nécessaire pour que des collisions ionisantes puissent se produire et le processus qui en découle est rapide.

## 7.6 Claquage électromécanique

L'application d'un champ électrique à un matériau peut créer des contraintes mécaniques. La pression qui s'exerce sur le diélectrique lorsque les électrons sont fixes, ou force de compression de Maxwell est de la forme [12] :

$$P = \frac{1}{2} \epsilon E_{\max}^2 \quad (I.5)$$

Avec :

$P$  : pression qui s'exerce sur le diélectrique,

$\epsilon$  : permittivité du diélectrique,

$E_{\max}$  : 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 une diminution de l'épaisseur ( $d < d_0$ ) [13]. 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 (II.2) [13] :

$$d_c = d_0 e^{-0.5} \quad (I.6)$$

Avec :

$d_c$  : épaisseur critique,

$d_0$  : épaisseur initiale.

Le champ réel de claquage est [13] :

$$E_c = \frac{V}{d_c} = \left( \frac{Y}{\epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (I.7)$$

Où :

$V$  : tension appliquée,

$Y$  : module de Young du matériau,

$\epsilon_r$  : permittivité relative du diélectrique,

$\epsilon_0$  : permittivité du vide.

Le champ apparent expérimental vaut  $V/d_0$ , soit :

$$E_{app} = \frac{V}{d_0} = \frac{G_c d_c}{d_0} = 0,606 \left( \frac{Y}{\epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (I.8)$$

Cette relation n'est pas valable que dans la zone élastique (zone de réversibilité) du matériau et d'une manière générale, le claquage se produit dans la zone plastique (la zone de

non réversible. Pour cela, on tient compte non seulement du module d'Young mais aussi du seuil de plasticité du matériau [13].

## **8. Claquage des isolants électriques dans le temps**

### **8.1 Rupture à court terme**

La rupture est un phénomène localisé. L'introduction d'électrons chauds dans la structure des polymères s'accompagne d'une dégradation du matériau résultant de l'impact de ces porteurs sur les molécules du milieu. Sous des champs de 1 à 10 MV/cm, les temps de rupture restent inférieurs à la seconde : c'est la rupture diélectrique à court terme. L'effet de la charge d'espace est important dans les phénomènes de claquage. Cette dernière dépend de la morphologie du matériau. La rigidité diélectrique des polymères polaires est plus importante que celle des polymères non polaires. La tenue diélectrique des polymères dépend de plusieurs paramètres.

#### **8.1.1 Effet de la tension et du système d'électrodes**

La tension de rupture dépend :

- de la distance interélectrode ;
- de la géométrie des électrodes qui déterminent la configuration du champ électrique ;
- de la forme de l'onde de tension, de la fréquence et de son mode d'application par palier ou par rampe. Des essais effectués sur des échantillons de câbles ont montré que la tension de claquage est plus importante en continu que en alternatif ;
- souvent du métal des électrodes ;
- de l'état de la surface des électrodes.

#### **8.1.2 Effet de la température**

L'allure générale de la dépendance de la température de la rigidité diélectrique en courant continu pour des polymères non polaires, tel que le polyéthylène d'après Ieda montre 3 régions on observe une décroissance de la rigidité diélectrique des basses températures vers les hautes températures.

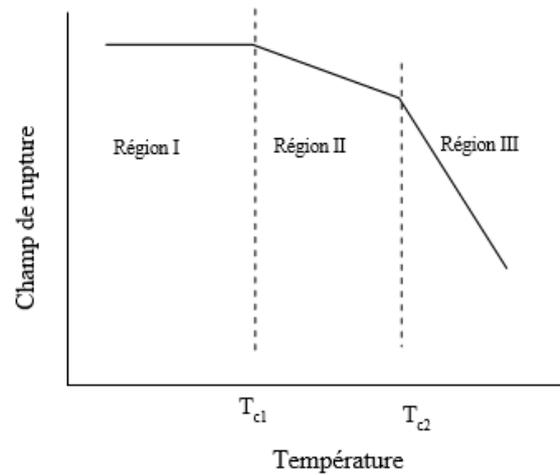


Figure I. 2 : Allure générale de la dépendance en température de la rigidité diélectrique

Dans le cas du polyéthylène, sous champ alternatif uniforme, le gradient électrique de rupture diminue en fonction de la température.

### 8.1.3 Effet de l'épaisseur de l'isolant

Généralement le champ de claquage diminue quand l'épaisseur augmente la rigidité diélectrique d'un matériau est liée à l'épaisseur  $e$  [mm] de l'isolant par la relation suivante :

$$E = ke^{-n} \quad (I.9)$$

Où :

$k$  : constante dépendant des conditions de mesure, de la géométrie et des propriétés des électrodes,

$e$  : épaisseur de l'isolant,

$n$  : constante,  $0,5 < n < 0,7$  suivant le matériau considéré.

## 8.2 Rupture à long terme

Il est difficile de faire une distinction entre le claquage à court terme et le claquage à long terme. Il n'est pas aisé de définir cette frontière temporelle. Dans le cas de la rupture à long terme, on parle plutôt de vieillissement électrique du matériau. Le vieillissement d'un isolant est, en général, tout phénomène qui se traduit par une évolution lente et irréversible de ses propriétés avec le temps. Les mécanismes qui interviennent sont: l'oxydation, l'hydrolyse, la photoxydation, ..., Ces mécanismes sont détaillés dans des ouvrages

[14,19,20]. La rupture à long terme peut être différée dans le temps, de quelques secondes à quelques heures voire quelques années [15].

Le problème de la rupture se résumant à un transfert d'énergie entre le champ électrique et les porteurs de charge, une théorie de rupture à long terme doit pouvoir expliquer comment sous un champ relativement faible, les porteurs peuvent gagner l'énergie de quelques électron-volts nécessaires à la rupture de liaisons dans un isolant. Dans la littérature, il n'existe pas à proprement parlé de théorie de rupture à long terme. Un modèle a été développé par Jonscher et al [22] qui s'applique aussi bien à la rupture aux temps courts qu'aux temps longs. Le modèle repose sur 2 hypothèses qui résultent d'une analyse détaillée des caractéristiques générales de la rupture dans une large gamme de matériaux de structures différentes. Les différentes étapes du processus sont [22] :

### **Stade 1**

Le matériau est en équilibre sous champ faible ou nul. En moyenne, le champ électrique n'a aucune action sur sa structure: s'il y a création de défauts, ils le sont sous forme métastable. La structure peut donc revenir à son état initial.

### **Stade 2**

Le champ est suffisant pour créer de nouveaux défauts à partir de défauts initiaux de façon irréversible. Ce processus entraîne une augmentation de la densité de charges au sein du matériau.

### **Stade 3**

Sous l'action combinée du champ électrique et du temps, la densité de défauts est telle que la probabilité pour qu'ils se groupent en amas n'est pas nulle.

### **Stade 4**

Les porteurs dont le libre parcours moyen est de plus en plus grand, au sein de ces amas, sont susceptibles d'acquérir des énergies importantes donc de produire des défauts de dimensions plus importantes qui peuvent apparaître sous forme d'arborescence par exemple.

### **Stade 5**

La rupture se fait selon un mécanisme de percolation entre les amas des défauts.

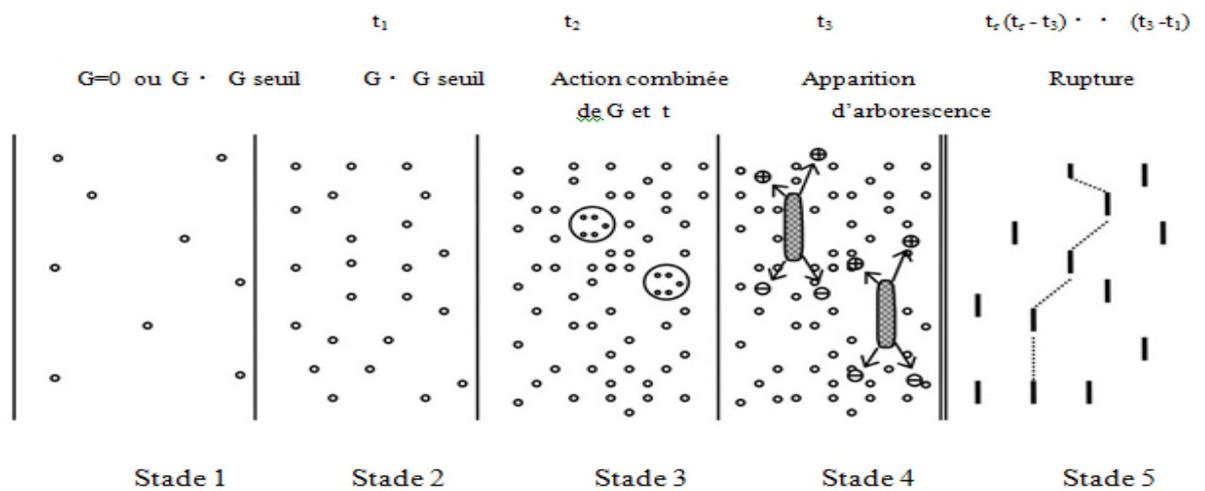


Figure I.3 : Modèle proposé par Jonscher et al intégrant une action cumulative du champ et du temps

Le modèle présenté sous forme schématique à la figure II.2 repose sur l'hypothèse qu'il faut apporter moins d'énergie pour étendre les défauts initiaux de la structure que pour en créer de nouveaux. Il propose donc la création de défauts au sein du matériau à partir de défauts initiaux liés à sa structure désordonnée. Ce sont les porteurs de charge qui sont à l'origine de l'extension des défauts initiaux. En l'absence de porteurs, il ne peut y avoir aucune évolution.

## 9. Décharges partielles

En 1936, Robinson [23] dont l'intérêt s'était porté sur les câbles haute tension imprégnés à l'huile, mettait déjà en cause la présence de cavités et le bombardement de leurs parois par les ions. Par leurs dimensions, leur pression et les contraintes de tension auxquelles sont soumises les cavités, des décharges y prennent naissance créant parfois des perturbations sur les circuits électroniques avoisinants et contribuant surtout à la détérioration plus ou moins lente de l'isolant. La mise en court-circuit, par une décharge, d'une vacuole dans une isolation, donne naissance à un certain nombre de phénomènes physiques dus à la transformation de l'énergie électrique fournie en énergie thermique, lumineuse et acoustique.

### 9.1 Naissance des décharges partielles

Si on applique aux bornes d'une éprouvette une tension  $U_a$  au moins égale à une valeur  $U_s$  appelée tension de seuil, telle que la différence de potentiel  $V_c$  aux extrémités de la vacuole atteint la tension disruptive  $U_i$  du gaz qu'elle contient, des décharges

prennent naissance, constituant une cause d'érosion permanente et contribuant ainsi à la détérioration plus ou moins lente de l'isolation. La condition nécessaire et suffisante pour créer des décharges est donc  $V_c = U_i$ .

La différence de potentiel aux bornes de la cavité dépend de la valeur de la tension appliquée à l'ensemble, de la nature même du matériau, de la géométrie du défaut, des conductivités superficielle et volumique de l'isolant [24]. La tension d'amorçage dépend, conformément à la loi de Paschen, de la nature, de la pression et de l'épaisseur de la lame de gaz contenu dans la cavité.

La tension d'amorçage dépend, conformément à la loi de Paschen, de la nature, de la pression et de l'épaisseur de la lame de gaz contenu dans la cavité. Pour l'air, on constate qu'à la pression atmosphérique, la tension minimale d'amorçage est de 350 V pour une distance de 8  $\mu\text{m}$ .

D'après Laurent [25], des cavités de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$  peuvent être le siège de décharges partielles si l'isolant est soumis à des gradients au moins égale à 20 kV/mm. Il est à noter que la loi de Paschen a été établie pour des électrodes métalliques, ce qui est loin des conditions d'une vacuole gazeuse à paroi diélectrique.

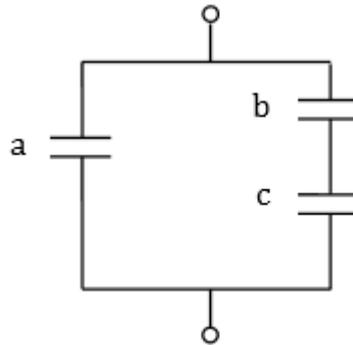


Figure I. 4 : Schéma équivalent d'un isolant avec une cavité

Dans le cas d'un champ divergent, il a été montré que la tension d'amorçage augmente avec le rayon de courbure de la pointe [26]. La tension d'initiation des décharges partielles croît quand la fréquence du signal diminue [27]. Dans l'étude des films minces de polypropylène, Shobha et al ont établi la relation de la tension d'amorçage  $U_i$  en fonction des dimensions de la vacuole [28] :

$$U_s = A \left( \frac{d}{p} \right)^{-B} \quad (\text{I.10})$$

Avec :

**A et B** : des constantes,

**d** : le diamètre de la vacuole,

**p** : la hauteur de la vacuole.

De nombreux travaux relatent des phénomènes de décharges partielles dans les isolants organiques comme par exemple les références [16-45]. Ces phénomènes sont donc bien connus mais sont déjà la signature d'un vieillissement avancé du matériau.

## 10. Les tests diélectriques

### 10.1 Les facteurs d'influence sur les tests diélectriques

De très nombreux phénomènes physiques, électriques et chimiques déterminent les propriétés diélectriques des isolants et des composants ou équipements qui les utilisent. On appelle facteurs d'influence sur les essais de rigidité et d'isolement, tous les éléments qui peuvent modifier ces propriétés. Parmi les facteurs d'influence on peut citer

a) les facteurs physiques :

- Température,
- Humidité,
- Contraintes mécaniques : vibrations, chocs, déformations, pression...

b) les facteurs électriques :

- Tensions,
- Courant continu : polarité,
- Courant alternatif: fréquence,
- Chocs électriques : impulsions.

c) les facteurs chimiques :

- Impuretés,
- Oxydation.

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.

## 10.2 Facteurs déterminants en tests industriels

Ce document traite d'une façon succincte et non exhaustive les facteurs d'influence :

- Température,
- Pression,
- Hygrométrie.

Car dans les tests industriels classiques, ces facteurs sont parmi les plus variables et les plus importants pour l'interprétation des tests.

La température est un élément non négligeable dans les conditions d'essais de rigidité et de mesure d'isolement. Si des températures assez constantes et connues sont respectées dans la plupart des laboratoires d'études et de recherches (+15°C à +35°C) ou dans les salles de métrologie (+20°C ou +23°C), il n'en est pas de même dans les lieux de production généralement non climatisés soumis à de grandes variations (exemple: +5°C à +55°C).

La température ambiante n'est pas la seule à prendre en considération car un équipement testé en fonctionnement peut présenter, sur des parties soumises aux contraintes, des "points chauds" qui modifient localement les propriétés diélectriques des isolants.

La pression a une influence très variable suivant la nature du milieu isolant. Il faut également, pour ce facteur, distinguer l'influence autour de la pression atmosphérique, aux basses pressions (allant vers le vide) et aux hautes pressions (normales ou accidentelles).

L'hygrométrie est un troisième facteur important et parfois déterminant sur les résultats des tests diélectriques. C'est le plus difficile à quantifier et celui dont l'influence est la plus délicate à interpréter. Ces effets peuvent être rapides (effet de surface, condensation) ou lents et pernicieux (imprégnation, réaction avec le milieu isolant).

## 11. Conclusion

Lors de l'étude de la tenue diélectrique des isolants solides à court ou à long terme, souvent les valeurs de rupture obtenues sont caractérisées par une forte dispersion au niveau des tensions et des temps de rupture. Alors, les causes du claquage des solides sont diverses :

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

- Claquage dû à des effets parasites : des défauts dans le matériau sous forme d'inclusions solides ou gazeuses, qui provoquent une distorsion du champ électrique.
- Claquage électromécanique : sous l'action d'un champ électrique  $E$ , un matériau de permittivité  $\epsilon$  est soumis à une pression qui a tendance à rapprocher les électrodes et donc d'exercer une contrainte de compression, sur le matériau.

Les diélectriques poreux contenant de nombreuses vacuoles d'air ont une rigidité plus faible que le diélectrique lui-même. Quand ces diélectriques poreux sont associés avec des isolants liquides ou des isolants solidifiants, leur rigidité augmente largement.

**CHAPITRE II :**  
**MODÈLE DE WEIBULL ET TENUE**  
**DIÉLECTRIQUE**

## 1. Introduction

La fiabilité est le problème majeur lors du dimensionnement de l'isolation des dispositifs électriques. Lors des essais de rupture diélectrique sur des échantillons placés dans des conditions expérimentales identiques, on n'obtient pas une valeur unique de la tension de claquage mais une distribution de valeurs [46].

Ce caractère statistique pourrait s'expliquer par l'existence d'hétérogénéités et/ou de défauts microscopiques locaux dans le matériau diélectrique. Il est donc nécessaire de faire une série de mesure sur un grand nombre d'échantillons identiques et de mener une analyse statistique sur la dispersion des valeurs de la tension de rupture, afin d'en déduire éventuellement des lois de vieillissement.

Dans ce chapitre, nous donnons une base théorique du modèle le plus adapté à la rupture des diélectriques solides ; qui est celui de Weibull. Aussi, des tests d'adéquation ainsi que la méthode des intervalles de confiance qui permettent d'encadrer la vraie valeur de rupture recherchée, seront détaillés dans cette partie.

## 2. Caractère aléatoire des valeurs de rupture diélectrique

La rupture est un phénomène aléatoire; pour des échantillons placés dans des conditions expérimentales identiques, on n'obtient pas une valeur unique du champ et/ou de temps de rupture, mais une distribution de valeurs. Ce caractère statistique pourrait s'expliquer par l'existence d'hétérogénéités ou de défauts microscopiques locaux dans le matériau diélectrique. Il est donc nécessaire de tester un grand nombre d'échantillons identiques et de mener une analyse statistique sur la dispersion des champs de rupture afin d'en déduire éventuellement des lois de vieillissement [47].

## 3. Modèles statistiques et lois de probabilité

Le modèle statistique est une structure formelle qui est la base de toute analyse statistique de données. Il est composé de données, hypothèses et vérifications.

Les lois de probabilité permettent de décrire de manière théorique le caractère aléatoire d'une expérience qui est considérée comme aléatoire.

Les principales lois utilisées en fiabilité sont les lois : Normale, log-normale, exponentielle, de valeurs extrêmes, logistique, log-logistique, g-gamma, gamma, de Gumbell et de Weibull.

Une base théorique sur les statistiques de la rupture diélectrique a été rapportée dans la littérature. On peut se reporter utilement aux ouvrages de Nelson [48] et Lawless [49], qui fournissent toutes les informations pratiques concernant le traitement des données.

#### 4. Modèle statistique de Weibull

Le modèle statistique de Weibull ou loi de chaîne s'écrit [50,51-59] :

$$P(X) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{X-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right), X > 0 \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- ✓  $P(X)$  : probabilité de rupture et  $X$  : Variable aléatoire
- ✓  $\eta$  : paramètre d'échelle, il est destiné à définir une valeur centrale caractéristique de la population étudiée. Ce paramètre correspond à une densité de probabilité maximale.
- ✓ pour  $X = \eta$ ,  $\text{LnLn}(1/(1-P)) = 0$ , on déduit  $P = (1/e) = 63.2\%$ .
- ✓  $\gamma$  : paramètre de localisation, indique une survie des échantillons mesuré entre 0 et  $\eta$  ou encore une probabilité de défaillance nulle pour des valeurs de  $X < \gamma$ . La grandeur  $\gamma$  apparaît comme un seuil en dessous duquel le phénomène régi par la variable  $X$  ne se produit plus.
- ✓  $\beta$  : paramètre de forme et donne l'allure des courbes de Weibull; il représente la pente de la droite, c'est un nombre sans dimension.

Dans le cas  $\gamma = 0$ , le modèle de Weibull est dit à deux paramètres. Le formalisme de Weibull s'écrit [50,51-59] :

$$P(X) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{X}{\eta}\right)^\beta\right), X > 0 \quad (\text{II.2})$$

## 5. Application du modèle de Weibull à l'étude de la tenue diélectrique des isolants solides

### 5.1 Critères d'application

Pour l'application du modèle de Weibull à l'étude de la tenue diélectrique des isolants solides, il faut tenir compte des deux hypothèses suivantes [67] :

- ✓ le phénomène de claquage est caractérisé par la variable aléatoire à 2 dimensions dont l'une est le temps  $t$  au bout duquel se produit la rupture de l'isolant et l'autre le gradient de potentiel  $G$  qui a provoqué cette rupture.
- ✓ le claquage est localisé dans un petit volume du diélectrique. La rupture d'un élément microscopique entraîne la rupture du système isolant sur toute son épaisseur.

Le modèle statistique de Weibull est très utilisé pour l'évaluation de la fiabilité des câbles électriques [67,63,64]. En 1990, Dissado [65] dans ses travaux, a présenté une base de la théorie statistique de la rupture diélectrique.

### 5.2 Application à la rupture à court terme

La probabilité de claquage sous champ constant s'écrit [67,66] :

$$P(E, t) = 1 - \exp(-Ct^a E^b) \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$E$  : champ électrique appliqué,

$C$  : constante dépendante de la géométrie de l'échantillon,

$t$  : temps au bout duquel se produit le claquage,

$a$  : paramètre de dispersion en temps,

$b$  : paramètre de dispersion en champ,

$n = \frac{b}{a}$  : coefficient d'endurance électrique.

Lorsque le matériau est soumis à une rampe de champ électrique de vitesse de montée constante  $v$ , on parle alors; de vieillissement à court terme, et on peut écrire [67] :

$$E = vt \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$E$  : champ électrique appliqué,

$v$  : vitesse de montée de la rampe de champ électrique,

$t$  : temps au bout duquel se produit le claquage.

En remplaçant  $t$  par sa valeur dans l'expression (III.16), nous obtenons l'expression de la probabilité de claquage [67] :

$$P(E) = 1 - \exp\left[-c \frac{E^{a+b}}{v^a}\right] \quad (\text{II.5})$$

## 6. Traçage du diagramme de Weibull

Théoriquement, il n'existe pas de méthode précise d'estimation des paramètres d'échelle  $\eta$  et du paramètre de forme  $\beta$  de la distribution de Weibull. Cependant, certaines méthodes empiriques d'estimation sont utilisées. La méthode graphique est une méthode simple qui permet de vérifier rapidement si la distribution de Weibull est bien adéquate.

Cette méthode consiste à classer les valeurs de  $X_i$ ,  $i=1, 2, \dots, N$ . ( $N$  étant le nombre total d'échantillons testés) par ordre croissant. Pour  $N$  grand, on attribue aux valeurs de  $X_i$  la probabilité de rupture  $P_i$  donnée par la méthode des rangs moyens [68,66] :

$$P(i, N) = \frac{i}{N+1} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$i$  : rang des valeurs de  $X_i$  après classement par ordre croissant,

$N$  : nombre d'échantillons testés.

Si  $N < 20$ , on utilise la méthode des rangs médians qui est donnée par la formule suivante [66,69] :

$$P(i, N) = \frac{1-0.3}{N+0.4} \quad (\text{II.7})$$

Si le phénomène observé suit le modèle de Weibull à deux paramètres, le graphique où l'on porte en abscisses  $\text{Log}X$  et  $\text{LogLn}\frac{1}{1-P(X)}$  en ordonnées. Le graphe est une droite de pente  $\beta$ . Le lissage des points expérimentaux peut se faire par des polynômes de degrés 1, 2, ou 3 [59].

Nous développons en bas les deux méthodes de lissage linéaire; celle du maximum de vraisemblance et la méthode des moindres carrés.

## 7. Régression linéaire

En statistiques, un modèle de régression linéaire est un modèle de régression d'une variable expliquée sur une ou plusieurs variables explicatives dans lequel on fait l'hypothèse que la fonction qui relie les variables explicatives à la variable expliquée est linéaire dans ses paramètres. Formellement, on modélise la relation entre une variable aléatoire  $y$  et un vecteur de variables aléatoires  $x$ . De manière générale, le modèle linéaire peut s'écrire de la manière suivante [76] :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + u \quad (\text{II.9})$$

Le terme  $y$  désigne la variable expliquée. Le vecteur  $x$  désigne l'ensemble des variables explicatives :  $(x_1, x_2, \dots, x_k)$ . La variable aléatoire  $u$  désigne le terme d'erreur. Elle est parfois appelée perturbation [76].

On suppose qu'on dispose de données sur les variables  $y, x_1, x_2, \dots, x_k$ . On cherche à estimer le vecteur  $\beta$  des paramètres :  $(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k)$ . La régression est dite linéaire parce qu'elle impose une forme fonctionnelle linéaire dans les paramètres du modèle. On parle aussi de modèle linéaire ou de modèle de régression linéaire. En général, le modèle de régression linéaire désigne un modèle dans lequel l'espérance conditionnelle de  $y$  sachant  $x$  est une transformation affine de  $x$ . Cependant, on peut aussi considérer des modèles dans lesquels

c'est la médiane conditionnelle de  $\mathbf{y}$  sachant  $\mathbf{x}$  ou n'importe quel quantile de la distribution de  $\mathbf{y}$  sachant  $\mathbf{x}$  qui est une transformation affine de  $\mathbf{x}_1$  [76].

Bien qu'ils soient souvent présentés ensemble, le modèle linéaire et la méthode des moindres carrés ne désignent pas la même chose. Le modèle linéaire désigne une classe de modèles qui peuvent être estimés par un grand nombre de méthodes, et la méthode des moindres carrés désigne une méthode d'estimation. Elle peut être utilisée pour estimer différents types de modèles [76].

## 8. Modèles de régression linéaire

La représentation graphique des points expérimentaux peut être approchée par des polynômes de degré 1, 2 ou 3 [67,72-75]. Le modèle de régression linéaire est souvent estimé par la méthode des moindres carrés mais il existe aussi de nombreuses autres méthodes pour estimer ce modèle. On peut par exemple estimer le modèle par maximum de vraisemblance ou encore par inférence bayésienne.

Dans ce qui suit, nous développons les méthodes de lissage linéaire : méthodes des moindres carrés et celle du maximum de vraisemblance.

### 8.1 Lissage linéaire par la méthode des moindres carrés

Soit la loi de Weibull définie par la probabilité cumulée de rupture suivante [76] :

$$P(E) = 1 - \exp\left(-\left[\frac{E}{E_0}\right]^\alpha\right) \quad (\text{II.10})$$

Sa fonction de distribution est [67] :

$$f(E) = \frac{dP(E)}{dE} = \frac{\alpha}{E_0} \left[\frac{E}{E_0}\right]^{\alpha-1} \exp\left(-\left[\frac{E}{E_0}\right]^\alpha\right) \quad (\text{II.11})$$

On distingue deux cas de représentation possible :

#### 8.1.1 Représentation à deux paramètres

Si le champ de seuil  $E_s$  est nul, le modèle est dit à deux paramètres. On cherche une estimation de  $E_0$  et  $\alpha$  par régression linéaire sur les points de coordonnées [67] :

$$X_i = \log E_i, Y_i = \log \text{Ln} \frac{1}{1-P_i} \quad (\text{II.13})$$

Les points expérimentaux sont caractérisés par un numéro d'ordre  $i$ . il convient de trouver la valeur de  $E_s$  qui conduit au tracé linéaire représentant de façon optimale les points expérimentaux  $(X_i, Y_i)$ . Pour cela, on commence à donner à  $E_s$  une valeur arbitraire mais inférieur à celle du faible des champs de rupture observés [77]. En répétant le processus pour différentes valeurs données à  $E_s$  et en calculant chaque minimum  $M_c$ , on trace  $M_c(E_s)$ . Son minimum s'il existe, donne la valeur du champ seuil  $E_s$  à venir, il faut minimiser l'expression [67] :

$$M_c = \sum_{i=1}^N [\text{LogLn} \frac{1}{1-P_i} - a \log E_i - b]^2 \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$\log \text{Ln} \frac{1}{1-P_i} \text{ Ordonnées des points expérimentaux}$$

$$a \log E_i - b \text{ Polynôme de premier degré}$$

On aura alors :

$$M_c = \sum_{i=1}^N [\text{LogLn} \frac{1}{1-P_i} - a \log E_i - a \log E_0]^2 \quad (\text{II.15})$$

On différencie par rapport aux coefficients de la droite, soit :

$$\frac{\partial M_c}{\partial a} = 0, \frac{\partial M_c}{\partial b} = 0 \text{ et } \frac{\partial M_c}{\partial a} = 0, \frac{\partial M_c}{\partial \log E_0} = 0 \quad (\text{II.16})$$

### 8.1.2 Représentation à trois paramètres

Dans le cas où  $E_s \neq 0$ ., cette étape consiste à chercher la valeur du champ seuil qui contribue à alinéatiser les points expérimentaux dans une représentation à 3 paramètres.

On a [7] :

$$P(E) = 1 - \exp - \left[ \frac{E - E_s}{E_0 - E_s} \right]^\alpha \quad (\text{II.17})$$

$$\text{LogLn} \frac{1}{1-p} = \alpha \log(E - E_s) - \alpha \log(E_0 - E_s) \quad (\text{II.18})$$

$$M_c = \sum_{i=1}^N [\text{LogLn} \frac{1}{1-p_i} - \alpha \log(E_i - E_s) - b]^2 \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$\log \text{Ln} \frac{1}{1-p_i}$  Ordonnées des points expérimentaux,

$\alpha \log(E_i - E_s) - b$  Polynôme du premier degré.

On a :

$$M_c = \sum_{i=1}^N [\text{LogLn} \frac{1}{1-p_i} - \alpha \log(E_i - E_s) + \alpha \log(E_0 - E_s)]^2 \quad (\text{II.20})$$

On différencie ensuite par rapport aux coefficients de la droite, soit :

$$\frac{\partial M_c}{\partial a} = 0, \frac{\partial M_c}{\partial b} = 0 \text{ et } \frac{\partial M_c}{\partial \alpha} = 0, \frac{\partial M_c}{\partial \log(E_0 - E_s)} = 0 \quad (\text{II.21})$$

Il est nécessaire de connaître la valeur de  $E_0$  (choisi d'après le lissage polynomial de degré 3 des points expérimentaux dans une représentation à deux paramètres) et de minimiser la valeur de  $M_c$  pour chaque valeur donnée à  $E_s$ .

## 8.2 Lissage linéaire par la méthode du maximum de vraisemblance

L'application de la méthode du maximum de vraisemblance pour l'estimation des paramètres de la loi de Weibull a été faite par Cohen [77]. On définit la fonction de vraisemblance  $L$  par [67,77] :

$$L = \prod_{i=1}^N f(X_i) = \prod_{i=1}^N \frac{dP(X_i)}{dx} \quad (\text{II.22})$$

Cette fonction correspond à la probabilité d'avoir les valeurs de  $X_i$ ,  $i$  de 1 à  $N$ , dans le même échantillon par application de la règle du produit des probabilités puisque les  $X_i$  sont indépendants.

La méthode du maximum de vraisemblance est une technique bien connue pour l'estimation des paramètres d'une distribution de probabilité [50, 67,78-81, 82,83].

### 8.2.1 Représentation à deux paramètres

La fonction de distribution est donnée par l'expression suivante [67] :

$$f(E_1) = \frac{\alpha}{E_0} \left[ \frac{E_1}{E_0} \right]^{\alpha-1} \exp - \left[ \frac{E_1}{E_0} \right]^\alpha \quad (\text{II.23})$$

On cherche le maximum de la fonction de vraisemblance par rapport aux variables qui sont directement les paramètres de Weibull. Et par résolution du système d'équations (III.36), on déduira les valeurs de  $\alpha$  et  $E_0$  [67] :

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \text{ et } \frac{\partial L}{\partial E_0} = 0 \quad (\text{II.24})$$

### 8.2.2 Représentation à trois paramètres

La fonction de distribution est donnée par la relation [67] :

$$f(E_1) = \frac{\alpha}{(E_0 - E_S)} \left[ \frac{E_1 - E_S}{E_0 - E_S} \right]^{\alpha-1} \exp - \left[ \frac{E_1 - E_S}{E_0 - E_S} \right]^\alpha \quad (\text{II.25})$$

On recherche le maximum de la fonction de vraisemblance par rapport aux variables. Et par résolution du système d'équations (III.38), on détermine l'ensemble des paramètres de Weibull [67] :

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0, \frac{\partial L}{\partial E_0} = 0 \text{ et } \frac{\partial L}{\partial E_S} = 0 \quad (\text{II.26})$$

### 8.3 Comparaison entre les deux méthodes

Les deux méthodes de lissage sont différentes; que ce soit; dans leur principe même ou dans la procédure de calcul. Néanmoins, on distingue ces deux principales différences [7] :

- ✓ le lissage par la fonction de vraisemblance tient compte de la probabilité de chaque événement, ce qui conduit à un tracé qui pondère chaque donnée expérimentale en fonction de son poids statistique. Par contre, le lissage par la méthode des moindres carrés considère les points comme équivalents,
- ✓ l'optimisation du lissage par la méthode du maximum de vraisemblance, se fait en dérivant directement la fonction par rapport aux variables de Weibull. Par conséquence, Le champ nominal sera différent quel que soit le nombre de paramètres du modèle considéré. Mais, la procédure utilisée dans la méthode des moindres

carrés conduit au choix du champ nominal d'après la représentation à deux paramètres.

## 9. Intervalles de confiance

### 9.1 Introduction

La plupart des estimations des paramètres d'une population statistique, restent toujours approximatives et ont recours à des méthodes graphiques. De plus, il est difficile de mesurer l'erreur imputable à de tels procédés, ce qui rend délicat l'analyse des résultats notamment dans le cas des essais comparatifs.

Il semble judicieux de fournir une information sur les valeurs inférieures et supérieures du paramètre estimé. Il est donc possible de donner pour chaque estimation de paramètre un intervalle qui renferme avec une forte probabilité la vraie valeur du paramètre. Cet intervalle appelé intervalle de confiance quantifie donc objectivement l'incertitude dans l'estimation du paramètre [7].

### 9.2 Estimation des intervalles de confiance

Soit une loi de probabilité  $P$  de  $X$ .  $\hat{E}$  un estimateur d'un paramètre  $X$ . Étant donné une valeur  $X_0$  de  $X$ , on peut déterminer un intervalle de probabilité de niveau  $(1 - P)$  pour  $\hat{E}$ , c'est-à-dire deux bornes  $a$  et  $b$  telles que [67] :

$$P(E_1 < \hat{E} < E_2, X = X_0) = 1 - P \quad (\text{II.27})$$

Les bornes  $a$  et  $b$  dépendent évidemment de  $X_0$ . On choisira dans la plupart des cas, un intervalle de probabilité à risque symétrique.

Soit  $\hat{E}_o$  la valeur observée de  $\hat{E}$ . On adopte alors la règle suivante [67] :

- ✓ si  $\hat{E}_o$  appartient à l'intervalle  $(E_1, E_2)$ , on conserve  $X_0$  comme valeur possible de  $X$
- ✓ si  $\hat{E}_o$  n'appartient pas à l'intervalle  $(E_1, E_2)$ , on élimine  $X_0$ .

On répète cette opération pour toutes les valeurs du paramètre. Et on traduit graphiquement cette méthode dans un plan  $(X, \hat{E})$ , ou l'on trace  $E_1(X), E_2(X)$ .

On dit que  $(a, b)$  est un intervalle de confiance de niveau  $(1 - P)$ , avec  $P$  risque d'erreur maximum accepté, c'est un intervalle aléatoire car il dépend de  $\hat{E}_o$  [67].

On parle d'intervalle de confiance à  $100(1 - P)\%$ , cela signifie que l'intervalle a  $100(1 - P)\%$  de chance de contenir la valeur réelle du paramètre, ou il existe un risque  $P$  pour qu'un point extérieur à cet intervalle appartienne à la distribution. Un intervalle de confiance à 10% signifie que l'on a 10 chances sur 100 de voir un point extérieur à cet intervalle appartenir à la distribution.

L'étendue de l'intervalle de confiance dépend de différents facteurs [67] :

- ✓ elle augmente lorsque le risque d'erreur  $P$  diminue. Pour abaisser le risque d'erreur, il faut augmenter la marge de sécurité autour du paramètre à estimer,
- ✓ elle diminue lorsque le nombre de mesures augmente ; on se rapproche alors mieux en mieux de la «vraie» valeur du paramètre estimé,
- ✓ les intervalles de confiance ne sont valables que pour des éprouvettes testées de façon identique [88,83, 84].

### 9.3 Calcul des intervalles de confiance pour une distribution de Weibull

Le calcul des intervalles de confiance pour une distribution de Weibull est un problème très complexe qui a fait l'objet de nombreux travaux [85,86].

Des formules de calcul permettent de dériver ces intervalles pour les différents paramètres à partir de données tabulées. Ces tables sont dispersées dans les recueils statistiques [88, 83, 89,90].

En 1977, Stone et Van Heeswijk ont calculé les différents paramètres de Weibull [91]. Et en 1986, un logiciel de calcul a été développé par Stone [92].

## 10. Tests d'adéquation

Des tests sont couramment utilisés pour vérifier si un échantillon provient ou non d'une variable aléatoire de distribution connue. Les méthodes empiriques telles que l'étude de la forme de l'histogramme étaient peu satisfaisantes pour attester du bon choix d'une distribution. Pour tester l'ajustement d'une distribution observée à une distribution théorique,

le test de khi-deux et celui de Kolmogorov-Smirnov s'avèrent mieux adaptés, mais ne sont pas infaillibles. Il convient donc de mieux mentionner leurs limites d'utilisation.

### 10.1 Test de khi-deux

L'application de ce test est conditionnée par le nombre d'observation qui doit être supérieur ou égale à 50, son principe est exposé dans les ouvrages de statistiques comme celui de Chapiro et de Pazzis [93] et repris dans d'autres travaux sur les isolants solides [94, 96,97]. L'application de ce test est conditionnée par le nombre d'observation qui doit être supérieur ou égale à 50.

On appelle loi de  $\chi^2$  à  $\nu$  degré de liberté ou loi de Pearson, la loi de probabilité suivie de la variable aléatoire [67] :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N u_i^2 \quad (\text{II.28})$$

Ou  $u_1, u_2, \dots, u_n$  sont les  $n$  variables normales centrées réduites, associées à une série de  $n$  observations indépendantes  $X_1, X_2, \dots, X_n$  extraites d'une même loi normale, dont les deux paramètres, valeur moyenne et écart type, sont connus. La fonction de densité  $f(\mathbf{x})$  de cette distribution est nulle pour  $\mathbf{x} < 0$ . Pour  $\mathbf{x} > 0$ , elle a une forme qui dépend de son degré de liberté  $\nu$ .

Le principe du teste de khi-deux est de tester l'ajustement d'une distribution observée à une distribution théorique. Pour cela, on caractérise la forme de la distribution observée par une série de  $N$  mesures en construisant l'histogramme correspondant : répartition des  $N$  valeurs en  $K$  classes d'effectifs respectifs  $N_i$  ( $i$  varie de 1 à  $N$ ). Chaque classe  $i$  de l'histogramme est caractérisée par : son effectif  $N_i$  et sa probabilité  $P_i$  calculée sous l'hypothèse de la loi testée [67].

L'espérance  $E(N_i)$  est donc  $NP_i$ . Considérons sous l'hypothèse de l'ajustement à la loi testée, la statistique  $\chi_{\text{cal}}^2$  (khi-deux calculé) définie comme suit [67] :

$$\chi_{\text{cal}}^2 = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{(N_i - NP_i)^2}{NP_i} \quad (\text{II.29})$$

C'est clair que  $\chi_{\text{cal}}^2$  ne doit pas être trop grand. Il dépend du nombre de termes de la somme K.

Mais tous ces termes ne sont pas indépendants puisque [67] :

$$\sum_{i=1}^N N_i = N \quad (\text{II.30})$$

Puisque;  $\nu = k - 1$  et  $\chi_{\text{cal}}^2$  dépend du nombre de degré de liberté  $\nu$ , Donc, il suffit de connaître  $(k - 1)$  termes : on rejettera l'hypothèse si  $\chi_{\text{cal}}^2$  est trop grand, c'est-à-dire supérieur à une valeur qui n'a qu'une probabilité «a» d'être dépassée par une variable  $\chi_{\nu}^2$ . Cette hypothèse consiste à éprouver la validité d'un modèle avec une probabilité « a », choisie à l'avance, ou de le rejeter à tort. La probabilité « a » est aussi appelée « risque ». Plus sa valeur est élevée, plus sévère est le teste.

On comparera la valeur de  $\chi_{\text{cal}}^2$  à celle de  $\chi_{\nu}^2$  dont les valeurs sont préalablement tabulées pour un «degré de liberté  $\nu$ » déterminé et un «seuil de probabilité a» choisi. Le raisonnement pour le teste du « khi-deux » est le suivant [67] :

- ✓ si  $\chi_{\text{cal}}^2 > \chi_{\nu}^2$ , on plus affirmer au plus «a chance sur 100» de se tromper que les observations n'appartiennent pas à la loi de distribution testée.
- ✓ si  $\chi_{\text{cal}}^2 < \chi_{\nu}^2$ , l'hypothèse testée sur la nature de la loi ne peut être rejetée, mais elle n'est pas forcément la meilleure.

Sachant que dans le domaine de la fiabilité, le risque est normalement compris entre 1% et 5%. Ce test y est appliqué de façon à qualifier de « favorable » ou « non favorable » la validité du modèle pour un risque déterminé, sachant que 5% est une limite maximale dans les tests usuels. Toutefois, le test du « khi-deux » n'est pas efficace dans le cas où il ne permet pas de rejeter l'hypothèse testée.

## 10.2 Test de Kolmogorov-Smirnov

Aucune restriction n'est nécessaire pour l'application de ce test, cependant il est souhaitable de l'appliquer quand le nombre d'observation est peu nombreuse, Le principe de ce test consiste à comparer la fonction de répartition réelle de répartition des défaillances à la fonction de répartition théorique. C'est-à-dire on mesure l'écart point par point entre les deux fonctions :

$$D_{ni} = |f(t) - F(t)| \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$f(t)$  est la fonction réelle, elle est obtenue par la méthode des rangs moyen :

$$f(t) = \frac{i}{N+1}, \text{ ou par la méthode des rangs médian : } f(t) = \frac{i-0.3}{N+0.4}.$$

$F(t)$  est la fonction théorique.

Soit :

$$D_n = \text{MAX}|f(t) - F(t)| \quad (\text{II.32})$$

$$D_n = P[\text{MAX}|f(t) - F(t)| < D_{n,\alpha}] = 1 - \alpha \quad (\text{II.33})$$

La valeur de  $D_{n,\alpha}$  est donnée par la table de Kolmogorov-Smirnov. Et, si  $D_n > D_{n,\alpha}$  on refuse l'hypothèse du modèle théorique.

## 11. Avantages de la loi de Weibull

Après une étude comparative entre la loi de Weibull et la loi Log-normal, Oudin et al ont montré que [81]:

- ✓ Pour des probabilités faibles, l'hypothèse de la loi de Weibull correspond à des probabilités plus fortes et par conséquent plus pessimiste que l'hypothèse Laplacienne. On peut considérer que cette prévision plus pessimiste apporte plus de sécurité.
- ✓ Le modèle de Weibull permet de retrouver la durée de vie donnée par le modèle de puissance inverse.
- ✓ Il a une forme simple, c'est la raison pour laquelle il est utilisé par de nombreux auteurs ou d'ingénieurs [80].

- ✓ Il permet de décrire la rupture et la distribution statistique des résistances à la rupture d'un grand nombre de matériaux, dans des conditions de sollicitation simple [98].

## 12. Conclusion

L'objet principal de la statistique est de faire, à partir d'observations d'un phénomène aléatoire, un sujet de loi générant ces dernières en vue d'analyser ce phénomène ou de prévoir un évènement futur [83].

Lors de l'étude de la tenue diélectrique des isolants solides à court ou à long terme, souvent les valeurs de rupture obtenues sont caractérisées par une forte dispersion au niveau des tensions et des temps de rupture. Alors, une approche statistique de ce phénomène aléatoire s'impose, la méthodologie de travail à adopter est la suivante :

- ✓ définir la taille minimale du lot de mesures à effectuer,
- ✓ exploiter rationnellement les résultats répartis de façon aléatoire,
- ✓ adopter un modèle statistique pour le traitement des résultats de mesure obtenus; le modèle de Weibull est le mieux adapté dans le domaine de la rupture diélectrique des isolant solides,
- ✓ tracer le diagramme de Weibull à deux paramètres en utilisant la méthode des rangs moyens ou celle des rangs médians, puis avec la méthode des intervalles de confiance à 90% ou à 95%, on peut définir le type de représentation de Weibull ; si un des points à faible probabilité de rupture sort à gauche des intervalles, alors tracer un autre diagramme de Weibull à trois paramètres, si non, on se contente de la représentation à deux paramètres,
- ✓ utiliser l'une des méthodes de lissage linéaire; la méthode des moindres carrés ou celle du maximum de vraisemblance pour l'estimation des paramètres de Weibull,
- ✓ compléter l'étude statistique, en procédant à l'ajustement de la loi de Weibull utilisée par l'un des tests d'adéquation.

**CHAPITRE III :**  
**LE POLYMERE POLYETHYLENE PE**

## 1. Introduction

L'utilisation des matériaux polymères nous offre de grands avantages. Par exemple dans le cas d'un câble haute tension, ils sont moins polluants et plus économiques par rapport aux papiers imprégnés et surtout leur principal avantage est leur facilité de production. Selon leur origine, les polymères peuvent être divisés en trois groupes principaux ; les polymères naturels (protéines, lignine, caoutchouc), les polymères artificiels (les matières premières existent dans la nature : cellulose), les polymères synthétiques (l'unité de base n'existe pas dans la nature : polyéthylène).

Cette partie de travail sera dédiée en particulier à l'étude structurale du matériau polyéthylène, et en générale, à la présentation des polymères.

Entre autres, les différents dispositifs expérimentaux utilisés lors des essais de claquage de notre matériau considéré, seront décrits et présentés.

## 2. Matériau étudié

Le matériau, qui a fait l'objet de notre étude, a été fourni par le laboratoire de haute tension de l'université de Bejaia. Les échantillons sont des films en Polyéthylène PE.

Le polyéthylène, ou polyéthène, est un des polymères les plus simples et les moins chers. Il appartient à la famille des polyoléfines. C'est un important polymère de synthèse, avec le PP, le PVC et le PS.

Sa température de transition vitreuse est très basse (voisine de  $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) et son point de fusion peut selon les grades atteindre  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mais sa résistance mécanique fléchit nettement dès  $75\text{ à }90\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Le polyéthylène appartient à la classe thermique b.

## 3. Généralités sur les polymères

### 3.1 Définition d'un polymère

Il s'agit d'un terme utilisé dès 1866 par Berthelot qui, dans un article publié dans le Bulletin de la Société Chimique de France, notait que « le styrolène (le styrène), chauffé à  $200^{\circ}$  pendant quelques heures, se transforme en un polymère résineux ».

Il désignait ainsi probablement le premier polymère synthétique reconnu. Mais c'est Hermann Staudinger, dans les années 1920, qui fut le premier à proposer la notion de polymère dans le sens que nous lui donnons aujourd'hui. Il obtint le prix Nobel en 1953 pour ses travaux qui sont à la base de toute la science des macromolécules. Ce n'est cependant qu'au cours de la décennie suivante que la théorie « macromoléculaire » a définitivement remplacé la théorie « micellaire » à laquelle elle était opposée [99].

### 3.2 Utilisation des polymères dans l'isolation électrique

Dans le domaine électrique, le champ d'application des isolants organiques solides (les polymères) est étendu : lignes de transport d'énergie, câbles de télécommunication, condensateurs, alternateurs, moteurs électriques, systèmes électroniques et composants de puissance terrestres et embarqués sur satellites. L'utilisation de ces matériaux dans l'isolation électrique présente plusieurs avantages tels que : d'excellentes propriétés électriques (résistivité, rigidité, permittivité), une bonne tenue mécanique et tribologique et une stabilité dimensionnelle. Ajoutons à cette liste, la mise en œuvre facile, le faible poids et pour certains la possibilité de recyclage. Le Tableau 1.1 présente quelques exemples d'utilisation d'isolants organiques solides dans les systèmes de génie électrique.

Figure III. 1 : Exemples d'utilisation des isolants organiques solides [99]

<b>Exemples de polymères isolants</b>	<b>Applications</b>
Polyéthylène (PE)	Câbles HT, HF
Polyéthylène réticulé (PR)	Câbles THT
Polychlorure de vinyle (PVC)	Câbles BT
Polypropylène (PP)	Condensateurs de puissance
Polyéthylène téréphtalate (PET)	Condensateurs de puissance
Polyéthylène naphtalène (PEN)	Câbles, condensateurs
Polysulfones, polyéther-éther-cétones (PEEK)	Accessoires électriques automobiles
Polyépoxy	Électrotechnique : entretoise, moteurs, isolateurs

Polyamides	Câbles BT des alimentations des avions
------------	--

Les câbles haute tension, 400 kV, sont principalement utilisés pour assurer l'évacuation de la puissance de certaines centrales électriques, lorsqu'il n'est pas possible de faire par lignes aériennes [99].

Leur puissance unitaire va de 600 à 1200 MW. Les artères de pénétration dans les grandes agglomérations utilisent des câbles 225 kV, 300 à 600 MW. Les câbles moyenne tension (20 kV) constituent une très grande partie du réseau de distribution d'énergie électrique. Les câbles basse tension quant à eux, constituent le plus sûr et le plus esthétique moyen de distribution de l'énergie électrique à l'utilisateur. Une grande partie des câbles moyenne et haute tension utilise encore une technologie « papier imprégné d'huile ». Les premiers câbles haute tension alternative (225 kV) utilisant du polyéthylène extrudé ont été posés en 1972, puis en 1985 pour la tension 400 500 kV [99].

Pour d'autres utilisations, surtout en basse tension, les matériaux isolants sont aussi choisis en fonction de propriétés thermomécaniques propres à une application. Par exemple, dans les transformateurs et les grandes machines tournantes, les conducteurs isolés sont maintenus en place par un matériau organique qui doit être isolant bien sûr, mais surtout thermostable (160 °C en permanence) et mécaniquement résistant aux efforts électromagnétiques sur les conducteurs, particulièrement élevés en cas de court-circuit accidenté [99].

## 4. Présentation du polyéthylène

### 4.1 Introduction

Le polyéthylène est un matériau issu des polyoléfines. Ces derniers sont des matériaux résultant de la polymérisation d'oléfines, c'est-à-dire de monomères hydrocarbonés dont la formule générale est :

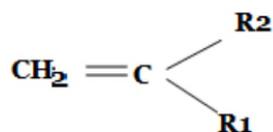


Figure II. 1 : Formule générale de la polyoléfine

Où R1 et R2 sont des groupements tels que : H ; CH<sub>3</sub> ; -CH<sub>2</sub>-CH-(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, ...

Les principales polyoléfines industrielles sont : Les polyéthylènes (PE) ; les polypropylènes (PP) et les polyisobutylenes (P-IB) [100].

## 4.2 Polyéthylène (PE)

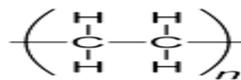
Le polyéthylène, ou polythène (sigle générique PE), est un des polymères les plus simples et les moins chers [100].

C'est un matériau semi cristallin obtenu par la polymérisation de l'éthylène.

C'est le plus important polymère de synthèse, devant le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC) et le polystyrène (PS). Sa production mondiale était d'une quarantaine de millions de tonnes en 2010 [100].

### 4.2.1 Structure

Sa formule chimique est donnée par :



De plus, sa structure moléculaire est donnée par :



Figure II. 2 Schéma représentatif du polyéthylène [100]

### 4.2.2 Différents types de polyéthylène

Il existe différents types de polyéthylène

Les polyéthylènes sont classés en fonction de leur densité qui dépend du nombre et de la longueur des ramifications présentes sur les chaînes moléculaires. On trouve :

- PE-BD, polyéthylène basse densité (en anglais LDPE, low-density polyethylene),
- PE-BDL, polyéthylène à basse densité linéaire (en anglais LLDPE, linear low density polyethylene),
- PE-HD, polyéthylène haute densité (en anglais HDPE, high-density polyethylene),
- PE-UHPM, polyéthylène à masse molaire élevée (en anglais UHMWPE, ultra high-molecular-weight polyethylene),
- PE-R, polyéthylène réticulé (en anglais PEX, cross-linked polyethylene),

- PE-RHD, polyéthylène réticulé à haute densité (en anglais HDXLPE, high density cross-linked polyethylene),
- PE-MD, polyéthylène à moyenne densité (en anglais MDPE, medium density polyethylene),
- PE-TBD, polyéthylène à très basse densité (en anglais VLDPE, very low density polyethylene) [100].

## 5. Conclusion

Les polymères, intitulés aussi matières plastiques, se sont bien imposés sur le marché des matériaux et sont indissociables de notre environnement et de notre vie pratique. Ils se sont imposés dans tous les domaines de nos activités.

La plupart des isolants électriques solides sont de nature organique (thermoplastique, thermodurcissable ou élastomère). Ils ont été depuis de nombreuses années le sujet d'étude de plusieurs chercheurs et beaucoup de travaux expérimentaux ont été effectués sur la rupture diélectrique de ces isolants solides et un grand nombre de théories ont été proposées.

Encore aujourd'hui, l'usage des polymères est en pleine expansion qui fait qu'ils sont très utilisés dans beaucoup de domaines. Cette diversité est due principalement à ; la nature particulière de leurs molécules en forme déchaîne, leurs larges gammes de caractéristiques ; durs, mous ou élastiques, transparents ou opaques, isolants et quelque fois conducteurs, ainsi qu'à la variété des modes d'assemblage qu'elles adoptent. De plus, ils sont relativement simples à mettre en œuvre et leur prix de revient qui peut être comparativement avantageux.

Les progrès dans la fabrication des polymères, pouvant supporter des champs électriques intenses associés à une méthode d'extrusion des câbles par une combinaison de polymère et d'écran semi-conducteur a permis de remplacer définitivement la technique d'isolation à base de papier imprégné d'huile.

**CHAPITRE IV :**  
**PARTIE EXPERIMENTALE**

## 1. Introduction

Cette partie de travail est dédiée aux différents travaux expérimentaux effectués au laboratoire de haute tension de l'université de Bejaia. Ces travaux se résument aux essais à court terme dit aussi vieillissement accéléré sur des films minces en polythène (PE), pour trois formes de tension électrique : alternative sinusoïdale, continue de polarité positive et continue de polarité négative. Pour chaque forme de tension, on applique une rampe de tension jusqu'au claquage. Huit vitesses de la rampe de tension seront considérées.

En fait, les essais à mener sur le vieillissement à court terme sur nos échantillons de film en PE sous tension alternative et continue, illustrent l'effet de la forme et de la vitesse de la tension appliquée.

Dans ce chapitre, nous exposons en premier lieu, le matériau étudié, la préparation des éprouvettes et les précautions prises avant d'entamer les essais. En deuxième lieu, nous présentons les différents dispositifs utilisés. 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 et long terme, seront traités par la méthode de Weibull, ensuite soumis à deux tests d'adéquation : celui de khi deux et celui de Kolmogorov-Smirnov, tout en utilisant, des intervalles de confiance à 90 % pour encadrer la vraie valeur recherchée.

## 2. Matériau étudié

Le matériau, qui a fait l'objet de notre étude, a été fourni par le laboratoire de haute tension de l'université de Bejaia. Les échantillons sont des films en Polyéthylène PE.

Le polyéthylène, ou polyéthène, est un des polymères les plus simples et les moins chers. Il appartient à la famille des polyoléfines. C'est un important polymère de synthèse, avec le PP, le PVC et le PS.

Sa température de transition vitreuse est très basse (voisine de  $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) et son point de fusion peut selon les grades atteindre  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mais sa résistance mécanique fléchit nettement dès  $75\text{ à }90\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3. Préparation des échantillons

Les échantillons ont été découpés à partir d'un rouleau de film en Polyéthylène, de 100m de longueur et de 2m de largeur. Les éprouvettes découpées, sont rectangulaires de 25cm de largeur et de 40cm de longueur. Et l'épaisseur des échantillons est 0,197mm.

Toutefois, la mesure de l'épaisseur des films en PE s'est effectuée par un palmer à plusieurs endroits d'un même échantillon de film. Cependant, la moyenne des résultats de mesure à été adoptée.

Avant les essais, les échantillons de PE ont été conditionnés dans un dessiccateur, avec du gel de silicone, pendant au moins 24h conformément à la norme DIN 53481/VDE 0303 [1] afin d'éliminer toute présence d'humidité.

### 4. Essais expérimentaux

Les essais expérimentaux à mener dans ce travail, sont des essais de rupture diélectrique à court terme. Appelés aussi essais de vieillissement accéléré, ces essais consistent à placer l'échantillon considéré entre deux électrodes et lui appliquer une rampe de tension de vitesse constante jusqu'au claquage. Après la rupture, nous relevons la valeur de la tension de claquage.

Les essais sont effectués sous trois formes de tension : alternative sinusoïdale, continue de polarité positive et continue de polarité négative. Et pour chaque forme de tension, huit vitesses de rampe de tension sont utilisées et pour chaque vitesse de rampe de chaque forme de tension; 20 échantillons de film en PE sont utilisés et testés, ce qui donne un nombre de 480 points de mesure obtenus.

### 5. Dispositifs expérimentaux

#### 5.1 Dispositif des essais sous tension alternative sinusoïdale

Pour la mesure de la tension de claquage sous tension alternative, nous avons utilisé le dispositif représenté dans la figure ci-dessous (figure IV.1). Ce dispositif compose des éléments suivants :

- Une source de 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 de 0 à 135

kV en tension continue 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  $C_u=41.4\mu F$ ) pour les mesures en tension alternative ;
- Un voltmètre de crête ( $V$ ) AC/DC de type *MU11*, à affichage digital permettant la mesure, selon le montage électrique, des hautes tensions alternatives ou continues ;
- Une résistance de protection  $R=106k\Omega$  limitant le courant ;
- 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.

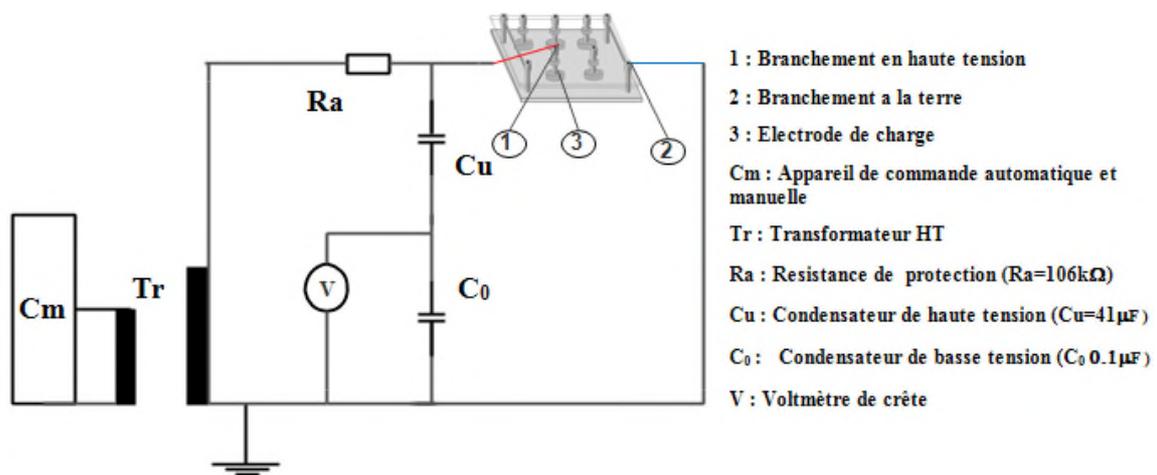


Figure IV. 1 : Schéma de dispositif des essais de claquage sous tension alternative sinusoïdale

## 5.2 Dispositif des essais sous tension continue

Pour la mesure de la tension de claquage sous tension continue, nous avons utilisé le dispositif représenté par la figure IV.2, comprenant les mêmes éléments que le dispositif précédent, sauf qu'à la place du diviseur capacitif, on utilise un diviseur résistif ( $R_0=0.1 M\Omega$  et  $R_u=250M\Omega$ ), associé à un condensateur de lissage et une diode haute tension G270. Le sens du montage de cette diode, déterminera le type de polarité de la tension.

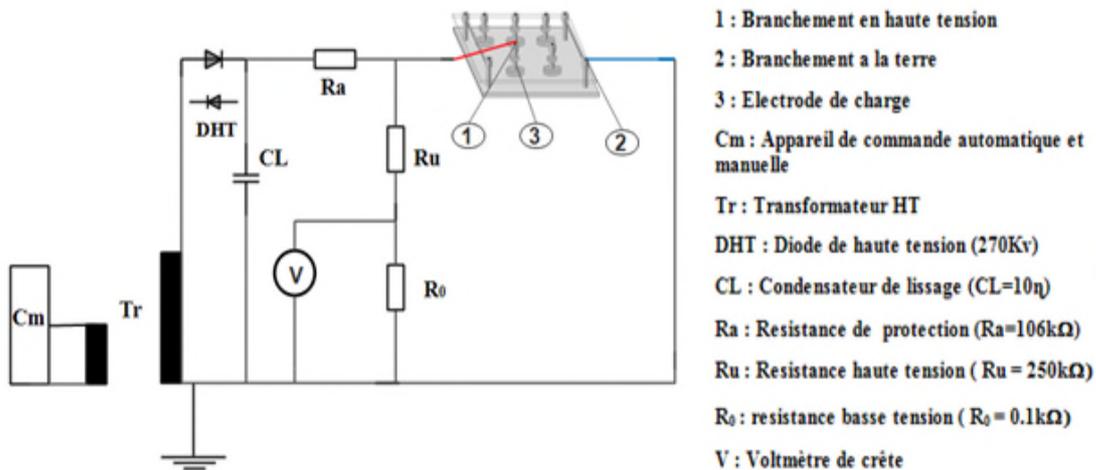


Figure IV. 2 : Schéma de dispositif des essais de claquage sous tension continue

Nous tenons à préciser que ces deux dispositifs se trouvent au laboratoire de Haute Tension de l'université A. MIRA de Bejaia.

### 5.3 Cellule de mesure

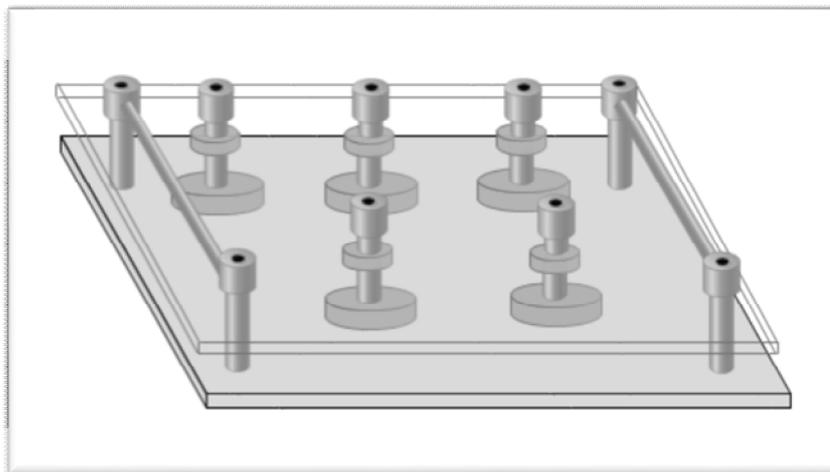


Figure IV. 3 : Cellule de mesure

La cellule de mesure (figure IV.3) est constituée de : de cinq (5) électrodes haute tension de géométrie cylindrique en inox inoxydable, et de quatre (4) électrodes de terre, reliés entre eux via une plaque en inox inoxydable. Cette cellule doit-être émerger dans un récipient contenant une huile minérale, dans notre cas d'étude, on a utilisé du Borak 22, pour éviter les contournements dans l'air entre l'électrode haute tension et les électrodes de terre.

## 6. Déroulement des essais

Plusieurs vitesses de tension seront appliquées pour les trois types de tension qui seront prises en considération lors des essais de claquage sur le matériau polyéthylène.

Les essais consistent à appliquer une tension électrique jusqu'au claquage. Avec l'accroissement de la tension, nous observons au départ, des décharges superficielles qui éclairent le milieu, puis des crépitements et enfin un bruit sourd qui caractérise le claquage de polyéthylène, la valeur de la tension de claquage est directement affichée sur le voltmètre de crête MU11.

Les essais ont été effectués sous trois formes de tension ; alternative sinusoïdale, continue de polarité positive et continue de polarité négative. Et pour chaque forme de tension, les essais ont été réalisés aux différentes vitesses de rampe de tension suivantes : 0.37 ; 0.88 ; 1.24 ; 1.45 ; 1.87 ; 2.2 ; 2.69 et 3.66kV/s.

Nous tenons à signaler que les essais ont lieu à la pression, à l'humidité et à la température ambiante du laboratoire. Cependant, on a essayé de reproduire les mêmes conditions pour tous les essais.

Dans notre étude, 20 mesures ont été réalisées pour chaque vitesse et pour chaque forme de tension considérée.

## 7. Précautions pendant les essais

La rupture étant un phénomène aléatoire, un lot important de 25 échantillons a été testé et a été soumis pour les tests de claquage, et cela pour chaque vitesse de chaque forme de tension appliquée.

Les essais ont lieu à l'air libre et à la température ambiante du laboratoire, à savoir :  $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $P=1005\text{hPa}$  et  $H=70\%$ .

Cependant, on a essayé de reproduire les mêmes conditions pour tous les essais (conditions normales de température, d'humidité et de pression). Et pendant les essais de mesure, on a pris les précautions suivantes :

- ✓ Les électrodes HT sont choisies (confectionnées) d'une manière à éliminer les effets de bord et l'effet de pointe lors de l'application de la tension ;

- ✓ Pour éviter les claquages de l'air par contournement, la cellule de mesure est émergée dans un récipient contenant de l'huile isolante de type Borak 22 ;
- ✓ Seuls les claquages survenant entre le film en PE et l'électrode HT sont pris en considération. Tout claquage qui se produit à l'extrémité de l'électrode HT est exclu ;
- ✓ Après chaque série de 20 essais, on procède au changement de l'huile Borak 22.

## 8. Traçage du diagramme de Weibull

Une analyse statistique des valeurs de claquage a été faite en utilisant le modèle de Weibull à deux paramètres et cela pour les différentes vitesses de montée de la rampe utilisée et pour les trois formes de tension choisies.

Le modèle de Weibull à deux paramètres utilisé pour le traitement de valeurs de tension de claquage mesurées ; est donné par la formule suivante:

$$P(U) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{U}{U_{nc}} \right)^\alpha \right] \quad (IV.1)$$

Avec :

$P(U)$  : probabilité de rupture,

$U$  : tension de claquage mesurée,

$U_{nc}$  : tension nominale de claquage qui représente le paramètre d'échelle,

$\alpha$  : paramètre de forme.

Le calcul des coordonnées des points expérimentaux dans une représentation de Weibull à deux paramètres conduit aux expressions suivantes :

$$X_i = \log U_i \quad (IV.2)$$

$$Y_i = \log \text{Ln} \left( \frac{1}{1-P_i} \right) \quad (IV.3)$$

Avec :

$U_i$  : tension de claquage,

$P_i$  : probabilité cumulée de rupture.

Après avoir classé les valeurs de rupture obtenues ( $U_i$  ;  $i=1, 2, \dots, N$ ) par ordre croissant, on attribue aux valeurs de  $U_i$  la probabilité de rupture  $P_i$ . Sachant que le nombre total

d'échantillons testés est de  $N=20$  et  $i$  étant le rang de la valeur de la tension de claquage après un classement par ordre croissant.

Cette probabilité de rupture est calculée par la formule des rangs médians donnée par l'équation (IV.4), suivante [17,18] :

$$P(i, N) = \frac{i-0.3}{N+0.4} 100\% \quad (\text{IV.4})$$

Pour l'estimation des paramètres de Weibull et le lissage des points expérimentaux, on a opté pour la méthode du maximum de vraisemblance et, on a considéré des intervalles de confiance à 90% où l'on prend un risque de 10% de voir un point extérieur aux intervalles appartenir à la distribution.

Les résultats sont présentés dans un système d'axes, donnant  $Y_1 = \log \text{Ln}(\frac{1}{1-p_1})$  en fonction de  $X_1 = \log U_1$ .

## 9. Essais sous tension alternative sinusoïdale

### 9.1 Diagrammes de Weibull

De la figure IV.4 à la figure IV.11; sont représentés les graphiques de Weibull à deux paramètres des valeurs de rupture à court terme de nos films en PE sous tension alternative sinusoïdales.

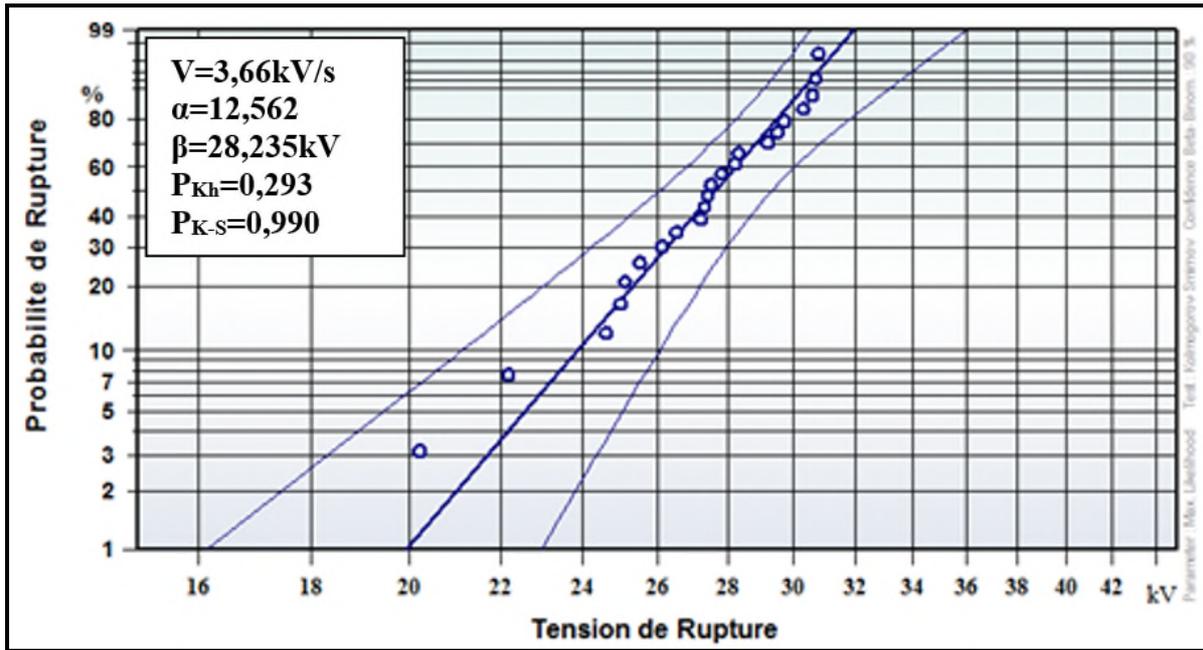


Figure IV. 4 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 3.66kV/s

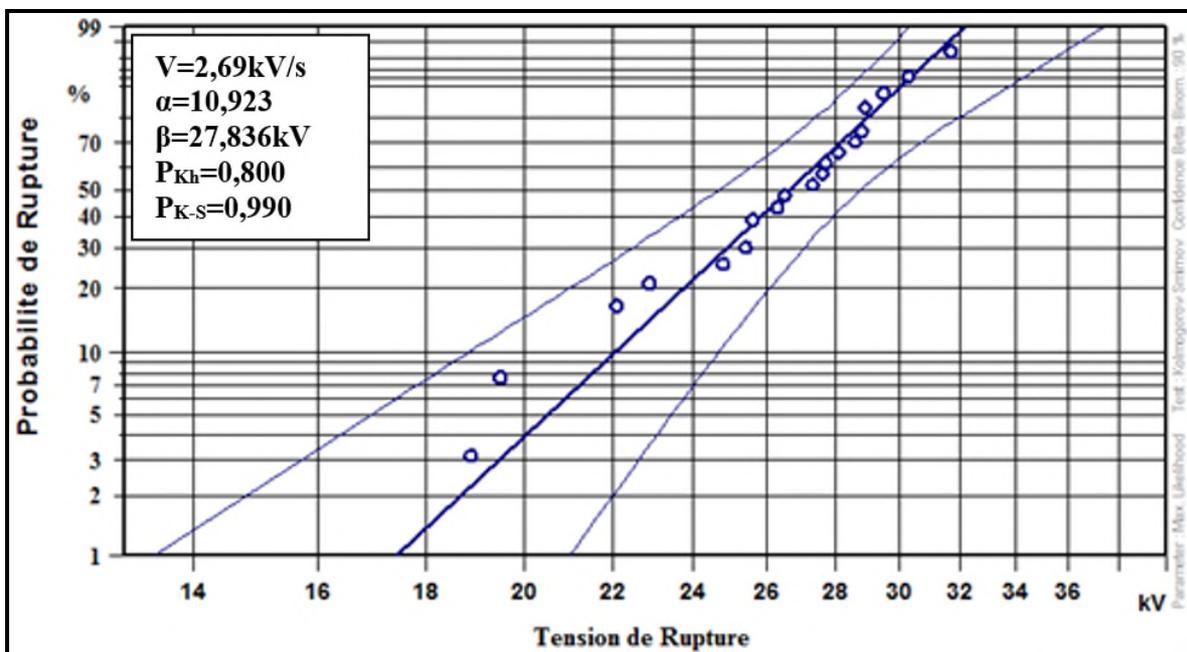


Figure IV. 5 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 2.69kV/s

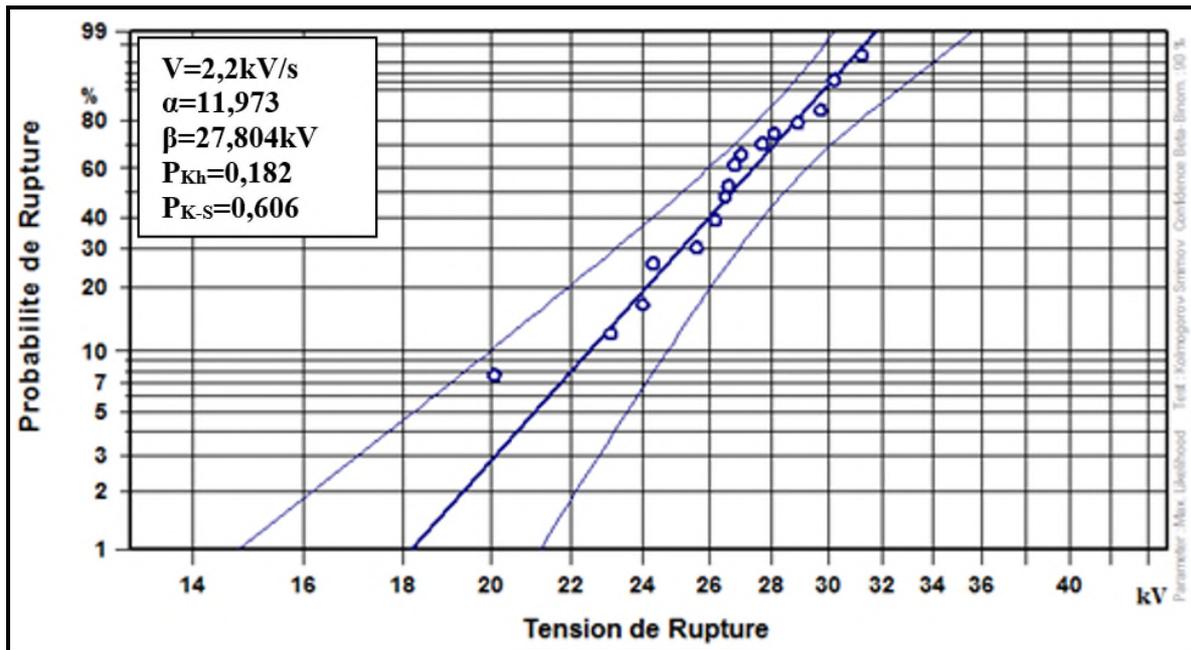


Figure IV. 6 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 2.2kV/s

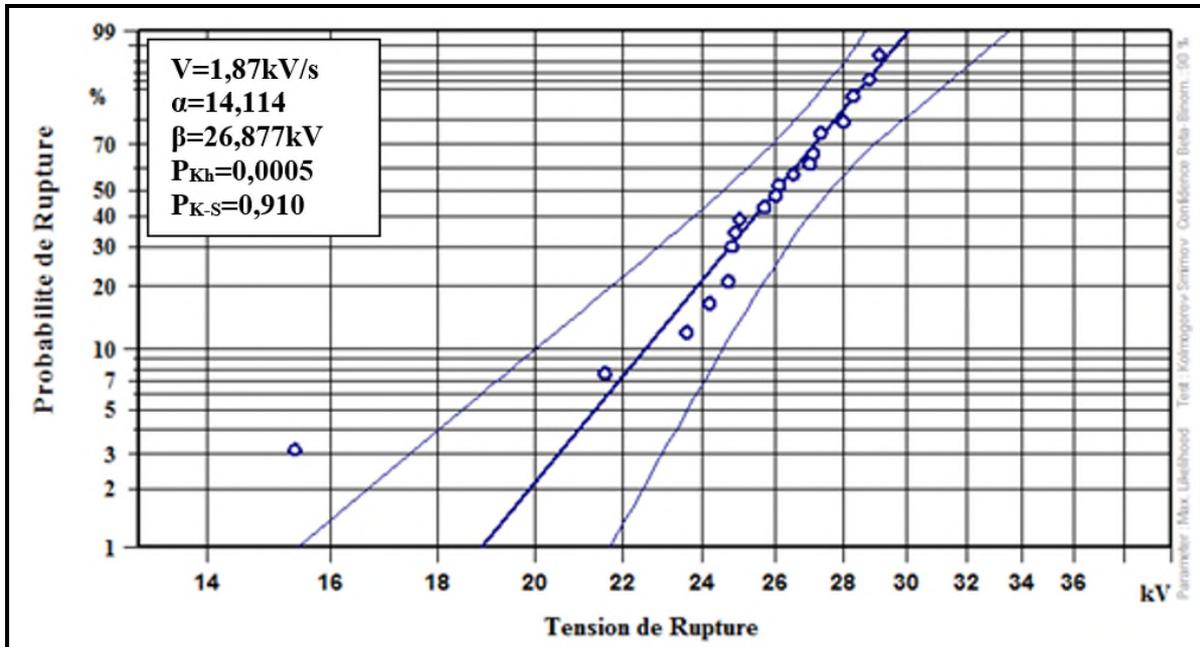


Figure IV. 7 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 1.87kV/s

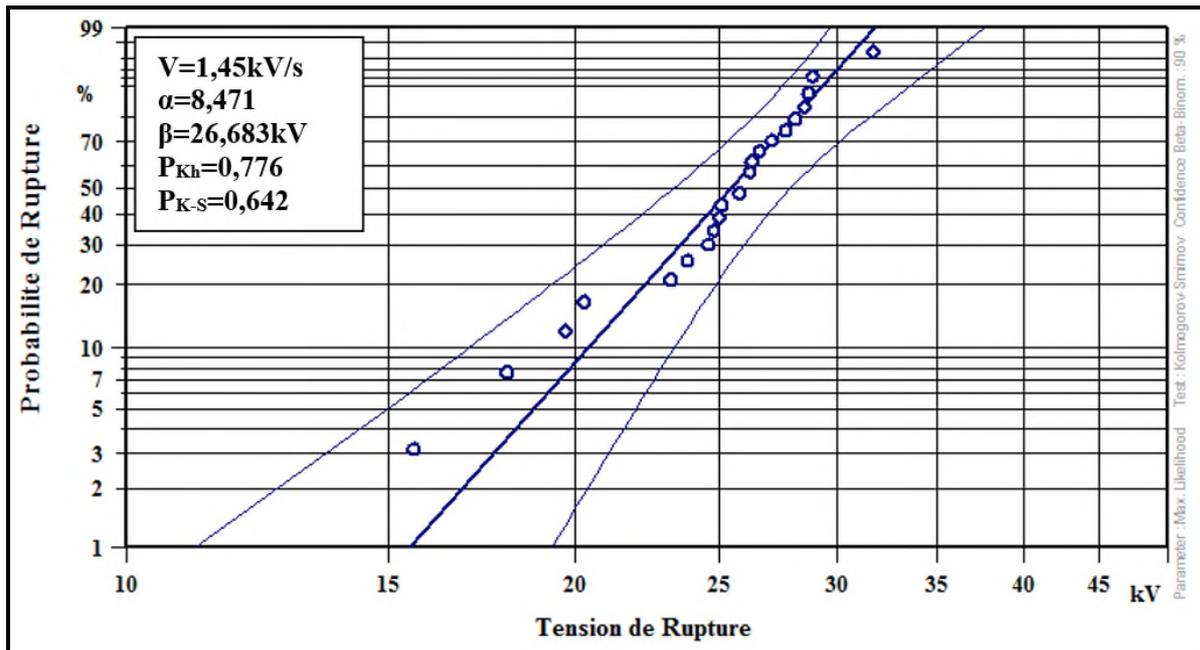


Figure IV. 8 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 1.45kV/s

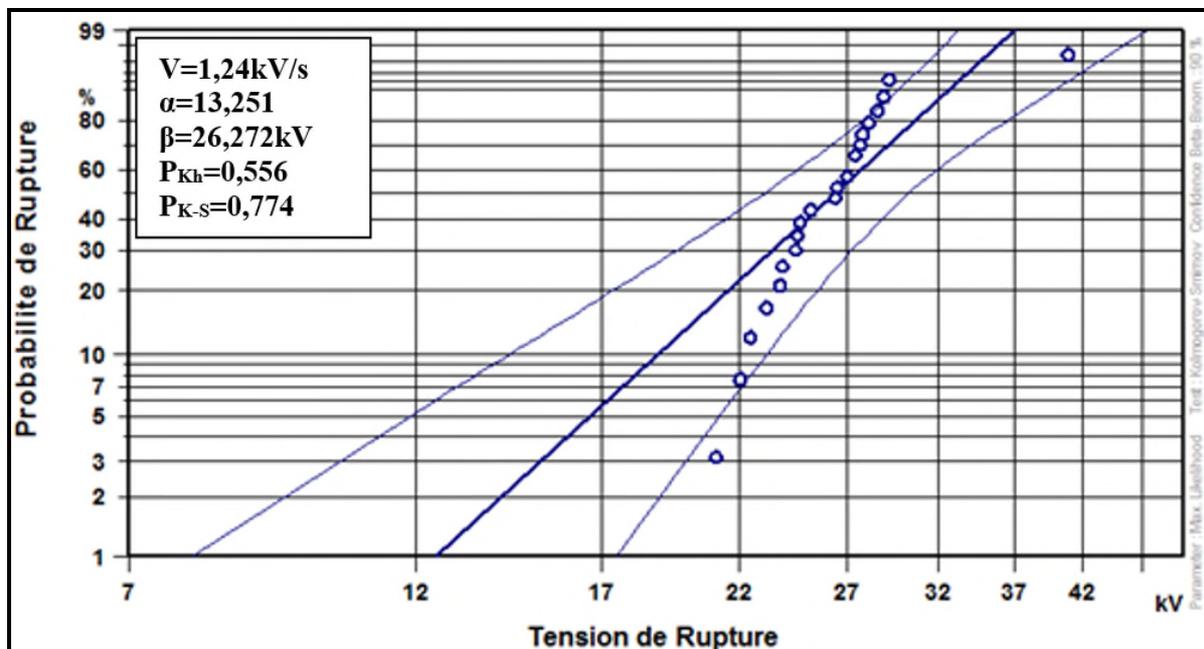


Figure IV. 9 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 1.24kV/s

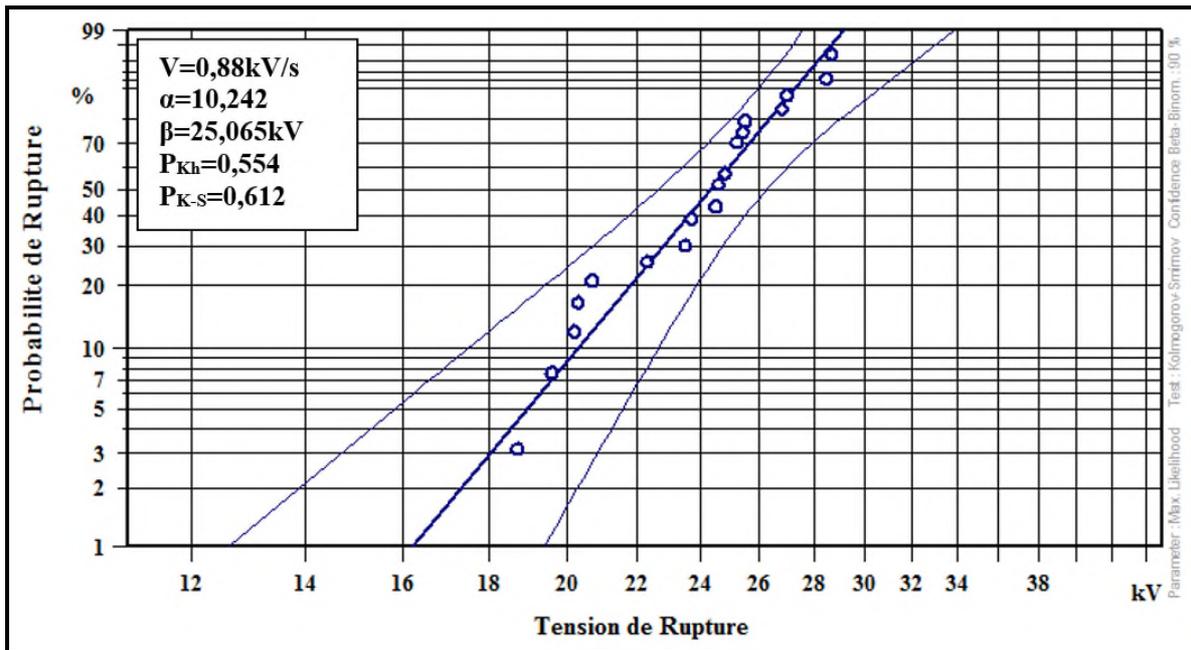


Figure IV. 10 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 0.88kV/s

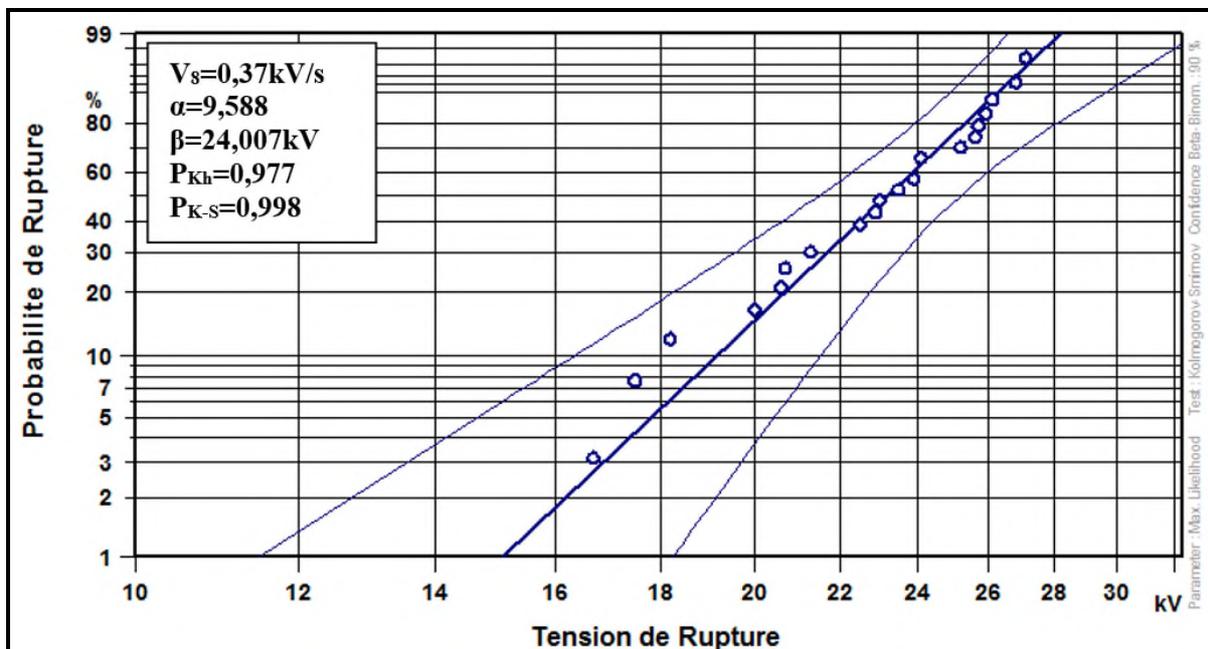


Figure IV. 11 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension alternative de 0.37kV/s

## 9.2 Résultats de l'analyse statistique

Les différents résultats des paramètres de Weibull à deux paramètres, sont représentés dans le tableau IV.1 suivant :

Tableau IV. 1 : Paramètres de Weibull des valeurs de rupture en tension alternative

AC 50Hz			
Rampe de tension (kV/s)	Paramètre de forme $\alpha$	Tension de claquage nominale $U_{cn}$ (kV)	Champ de claquage maximal (kV/mm)
0.37	9.588	24.007	121.863
0.88	10.242	25.065	127.234
1.24	13.251	26.272	133.360
1.45	8.471	26.683	135.447
1.87	14.114	26.877	136,431
2.2	11.973	27.804	141.137
2.69	10.923	27.836	141.299
3.66	12.562	28.235	143.325

## 9.3 Résultats des tests d'adéquation

Les différents résultats des paramètres des deux tests d'adéquation : de Kolmogorov-Smirnov et celui de Khi-deux, sont représentés dans le tableau IV.2 suivant :

Tableau IV. 2 : Résultats des tests d'adéquation des valeurs de rupture sous rampe de tension alternative

Tests	Rampe de tension (kV/s)	0.37	0.88	1.24	1.45	1.87	2.2	2.69	3.66
K-S	$P_{k-s}$	0.998	0.612	0.774	0.642	0.910	0.606	0.999	0.990
Khi-2	$P(x_{cal}^2 < x_{\nu}^2)$	0.977	0.554	0.556	0.776	0.0005	0.182	0.800	0.293

## 10. Essais sous tension continue de polarité positive

### 10.1 Diagrammes de Weibull

De la figure IV.12 à la figure IV.19; sont représentés les graphiques de Weibull à deux paramètres des valeurs de rupture à court terme de nos films en PE sous tension continue de polarité positive.

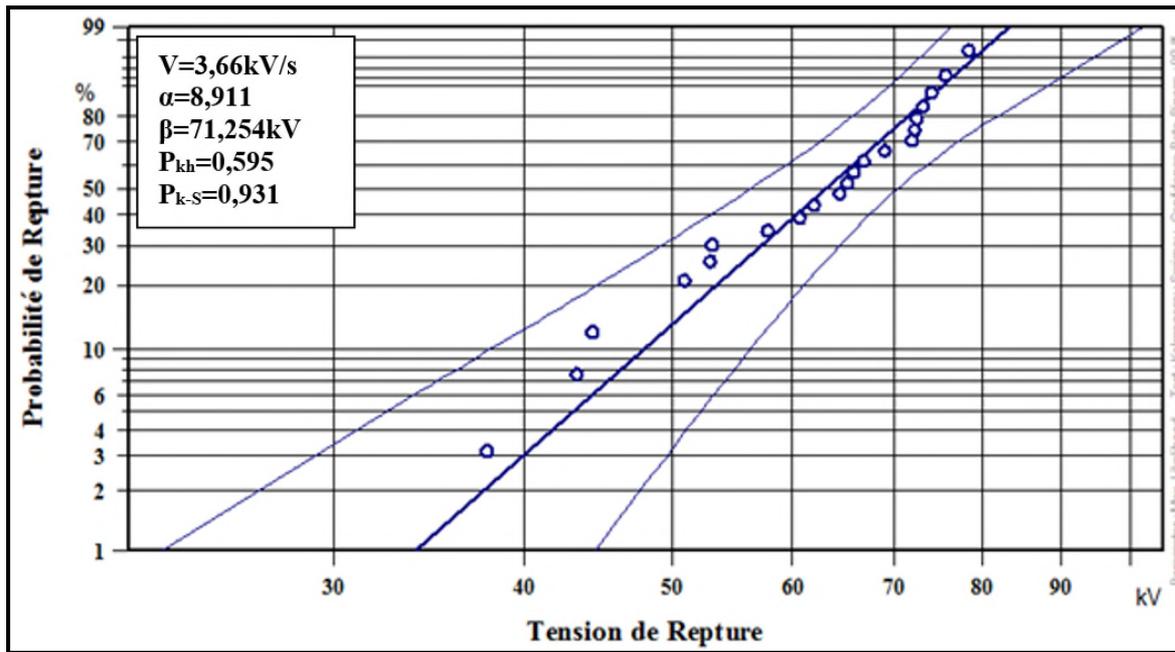


Figure IV. 12 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue positive de 3.66 kV/s

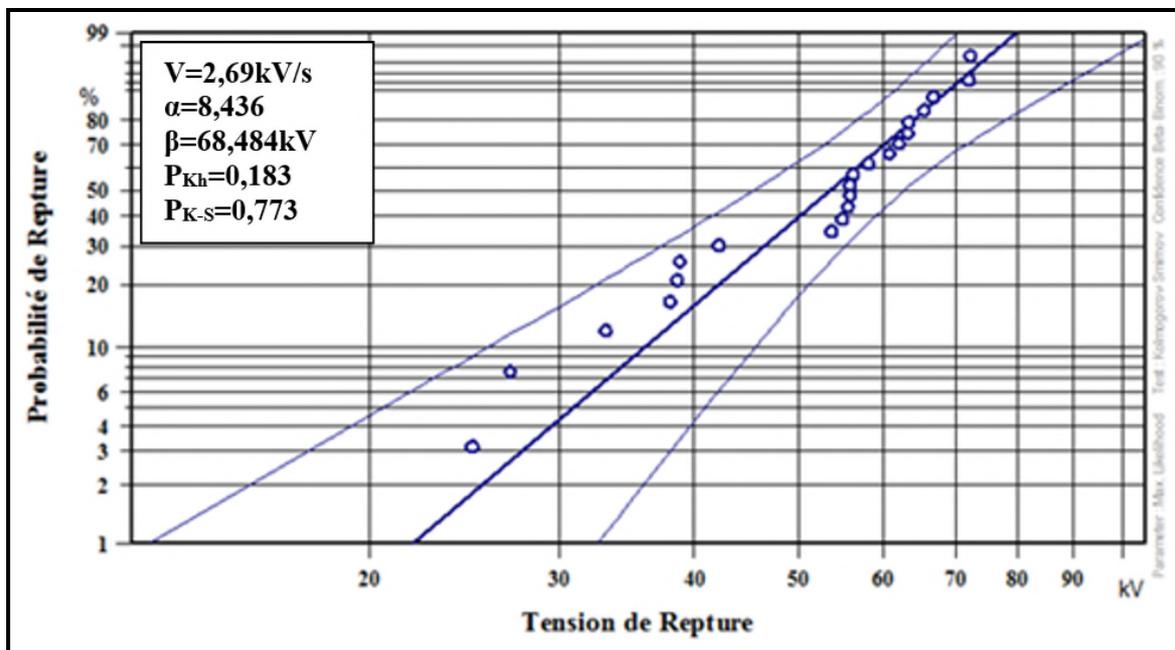


Figure IV. 13 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue positive de 2.69kV/s

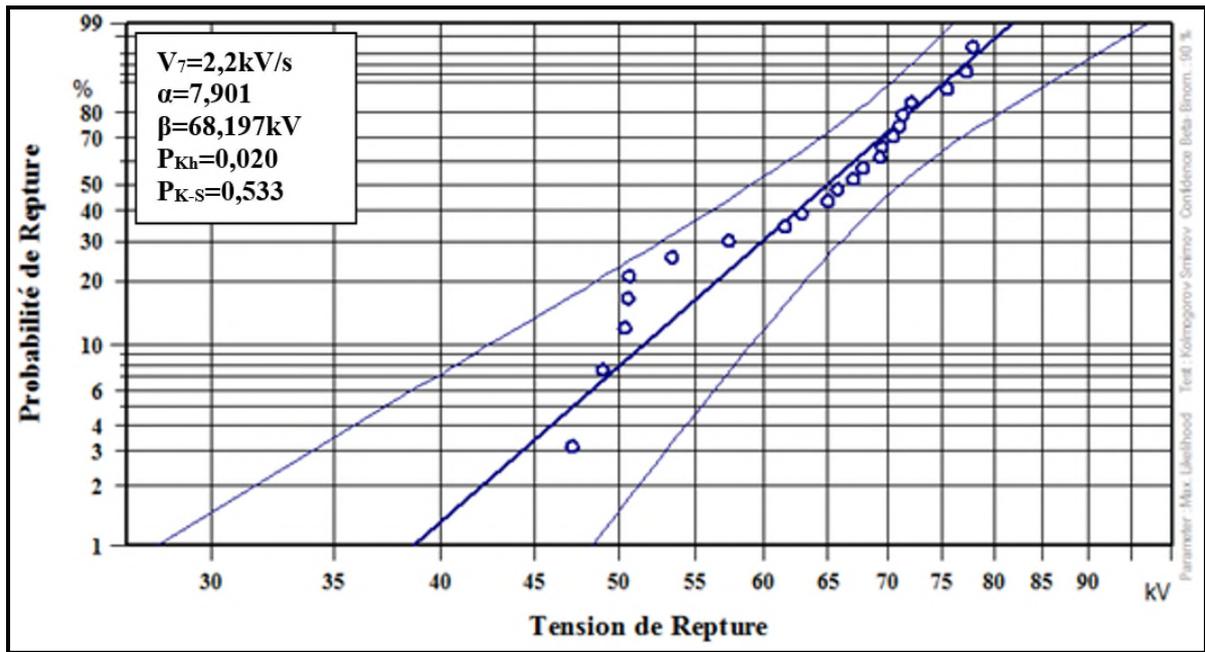


Figure IV. 14 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue positive de 2.2 kV/s

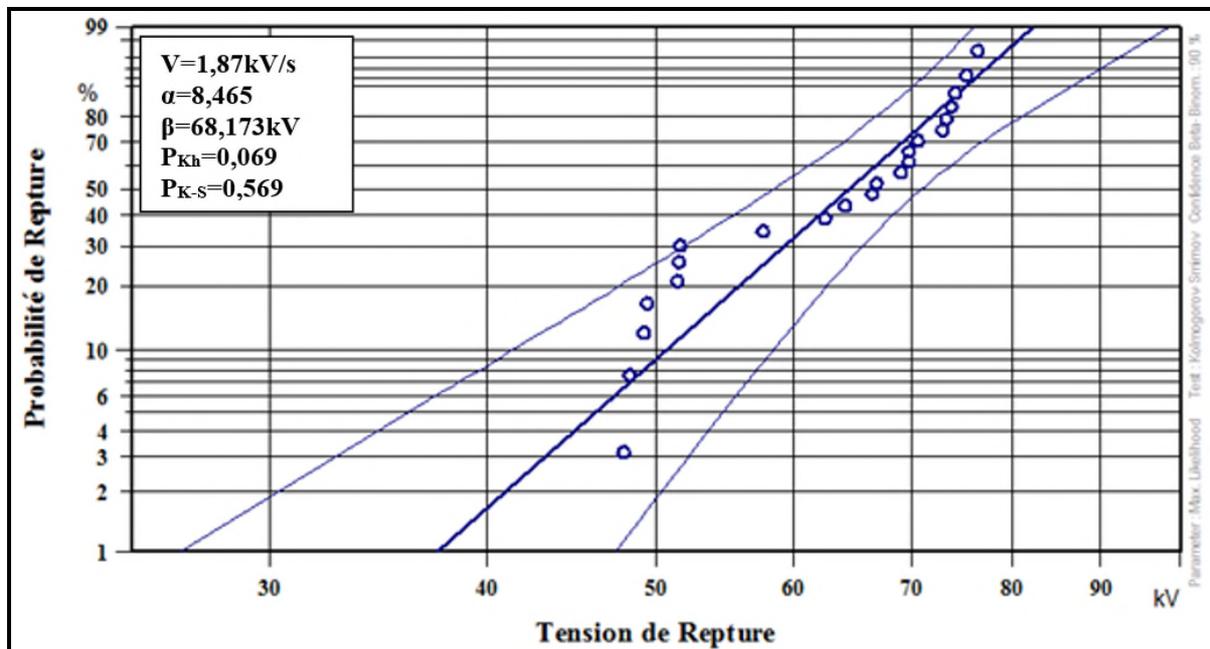


Figure IV. 15 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue positive de 1.87kV/s

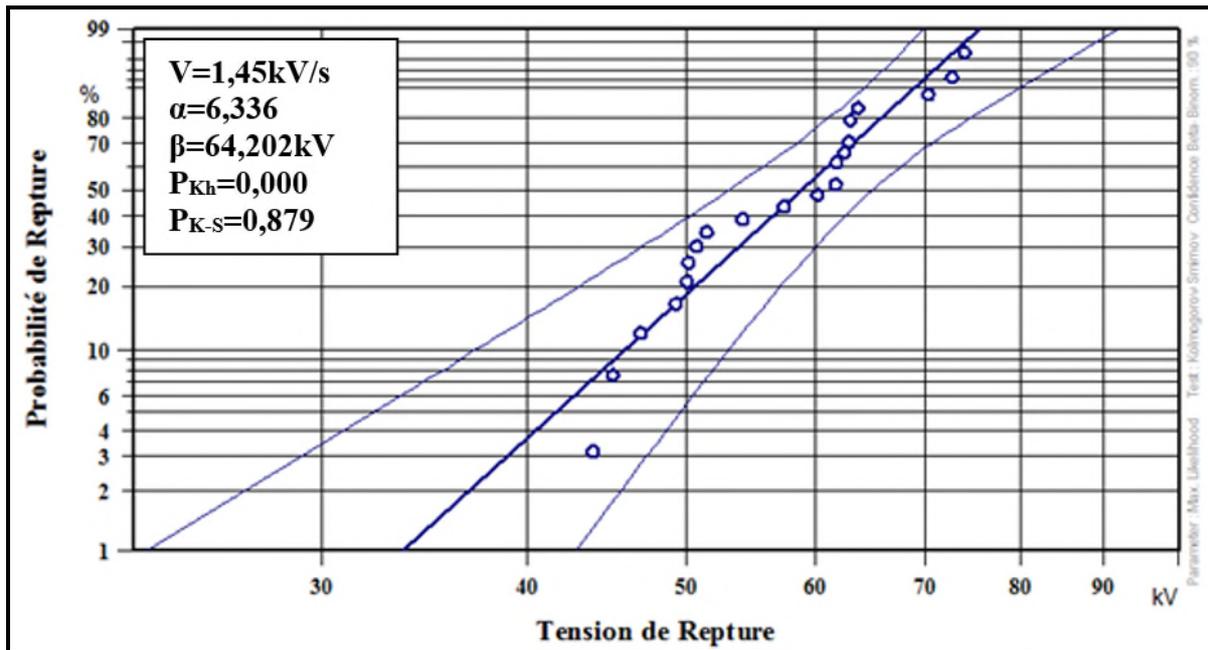


Figure IV. 16 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue positive de 1.45kV/s

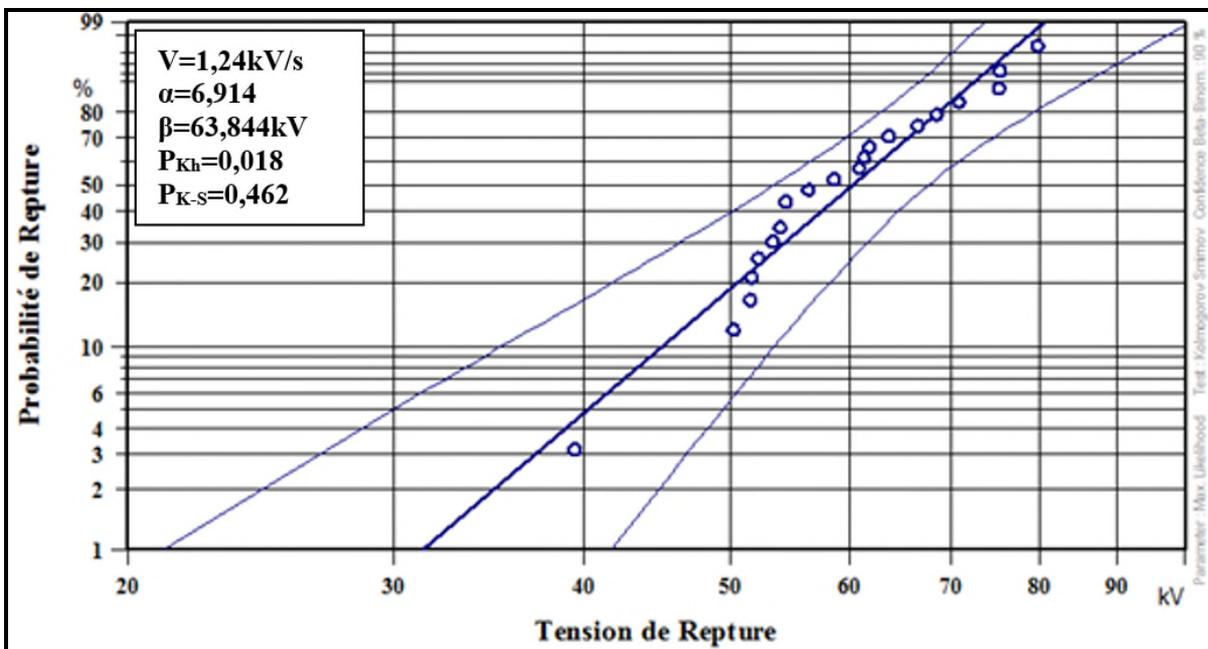


Figure IV. 17 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue positive de 1.24kV/s

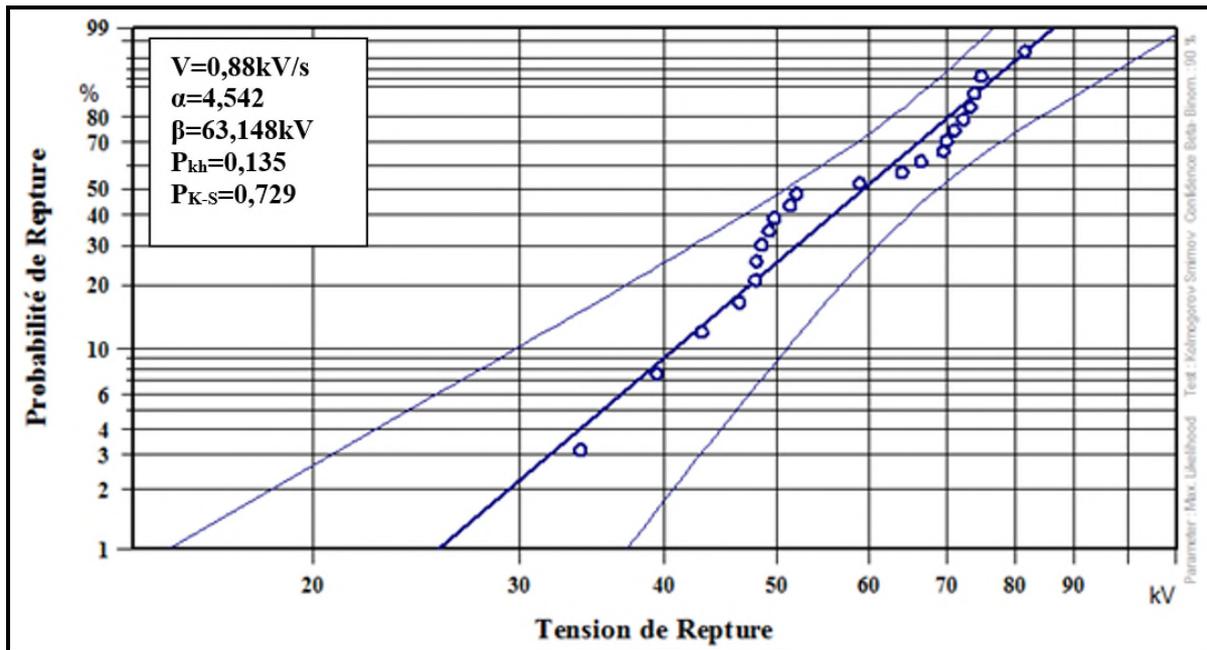


Figure IV. 18 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue positive de 0.88kV/s

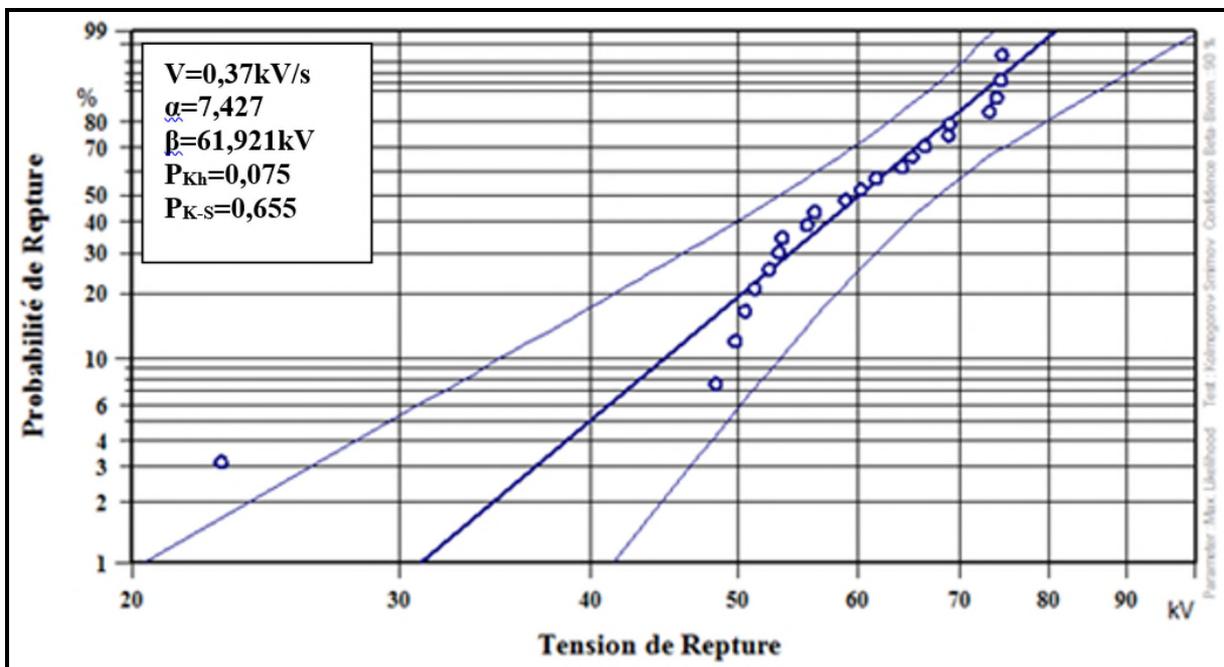


Figure IV. 19 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue positive de 0.37kV/s

## 10.2 Résultats de l'analyse statistique

Les différents résultats des paramètres de Weibull à deux paramètres, sont représentés dans le tableau IV.3 suivant :

Tableau IV. 3 : Paramètres de Weibull des valeurs de rupture en tension continue de polarité positive

DC +			
Rampe de tension (kV/s)	Paramètre de forme $\beta$	Tension de claquage nominale $U_{cn}$ (kV)	Champ de claquage maximal (kV/mm)
0.37	7.427	61.921	314.320
0.88	4.542	63.148	320.548
1.24	6.914	63.844	324.081
1.45	6.336	64.202	325.898
1.87	8.465	68.173	346.056
2.2	7.901	68.197	346.178
2.69	8.436	68.484	347.635
3.66	8.911	71.254	361.695

## 10.3 Résultats des tests d'adéquation

Les différents résultats des paramètres des deux tests d'adéquation : de Kolmogorov-Smirnov et celui de Khi-deux, sont représentés dans le tableau IV.4 suivant :

Tableau IV. 4 : Résultats des tests d'adéquation des valeurs de rupture sous rampe de tension continue de polarité positive

Tests	Rampe de tension (kV/s)	0.37	0.88	1.24	1.45	1.87	2.2	2.69	3.66
K-S	$P_{k-s}$	0.655	0.729	0.462	0.879	0.569	0.533	0.773	0.931
khi-2	$P(x_{cal}^2 < x_v^2)$	0.075	0.135	0.018	0,000	0.069	0.020	0.183	0.595

## 11. Essais sous tension continue de polarité négative

### 11.1 Diagrammes de Weibull

De la figure IV.20 à la figure IV.27; sont représentés les graphiques de Weibull à deux paramètres des valeurs de rupture à court terme de nos films en PE sous tension continue de polarité négative.

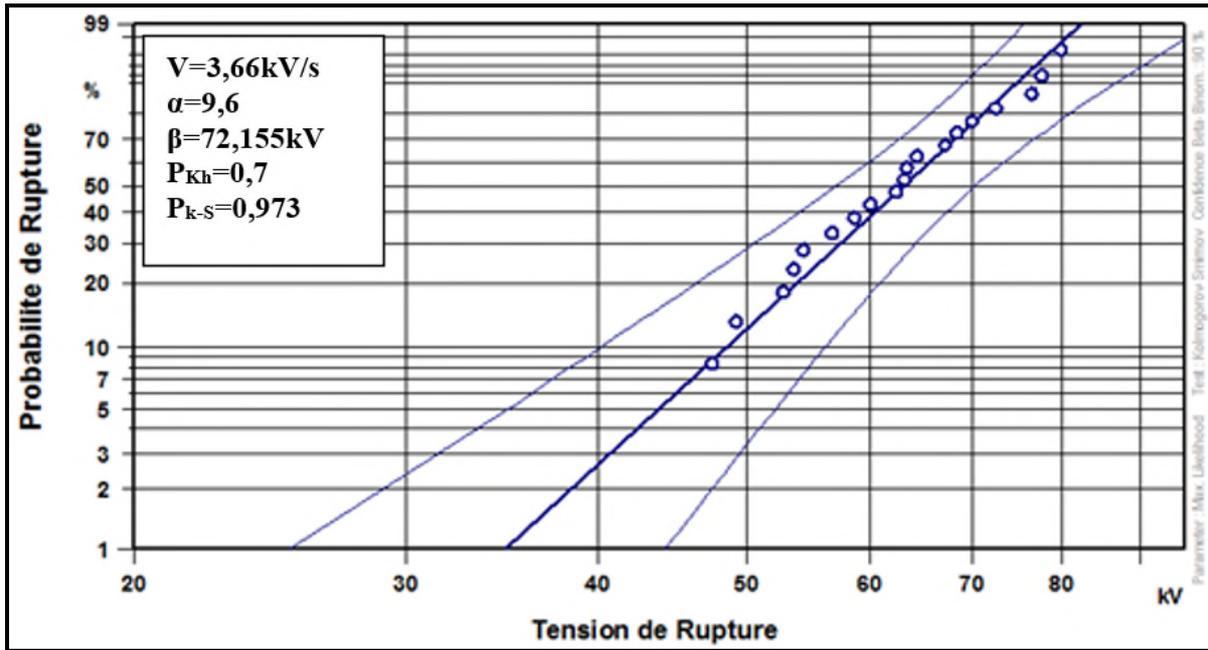


Figure IV. 20 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue négative de 3.66kV/s

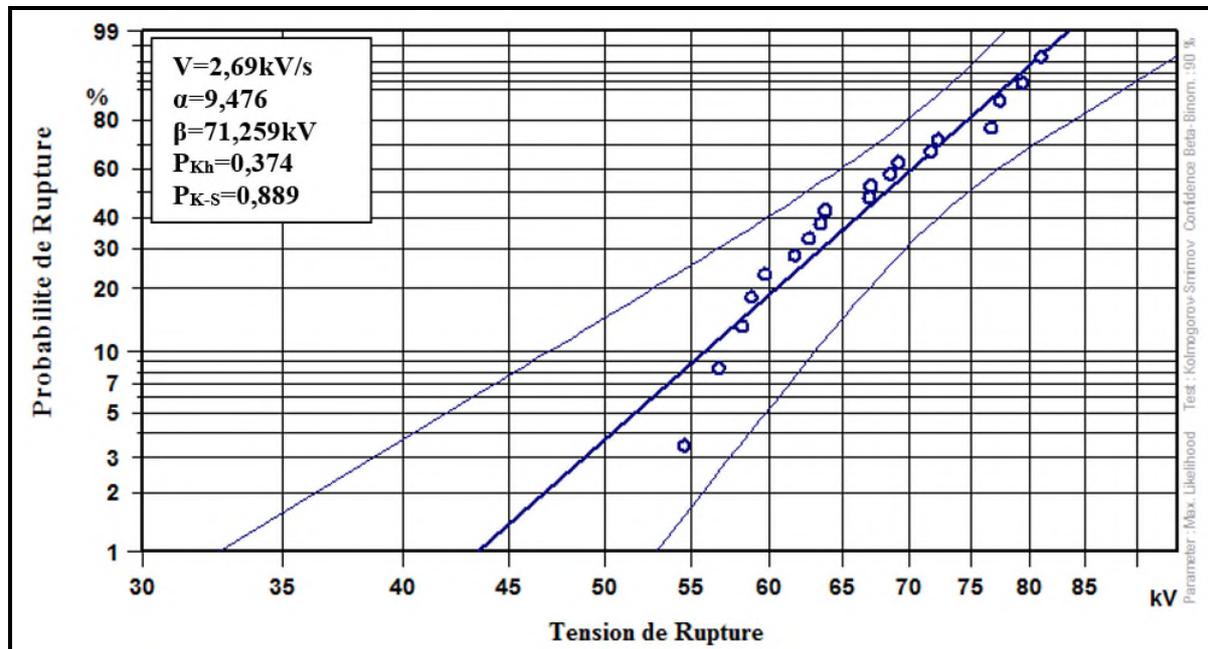


Figure IV. 21 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue négative de 2.69kV/s

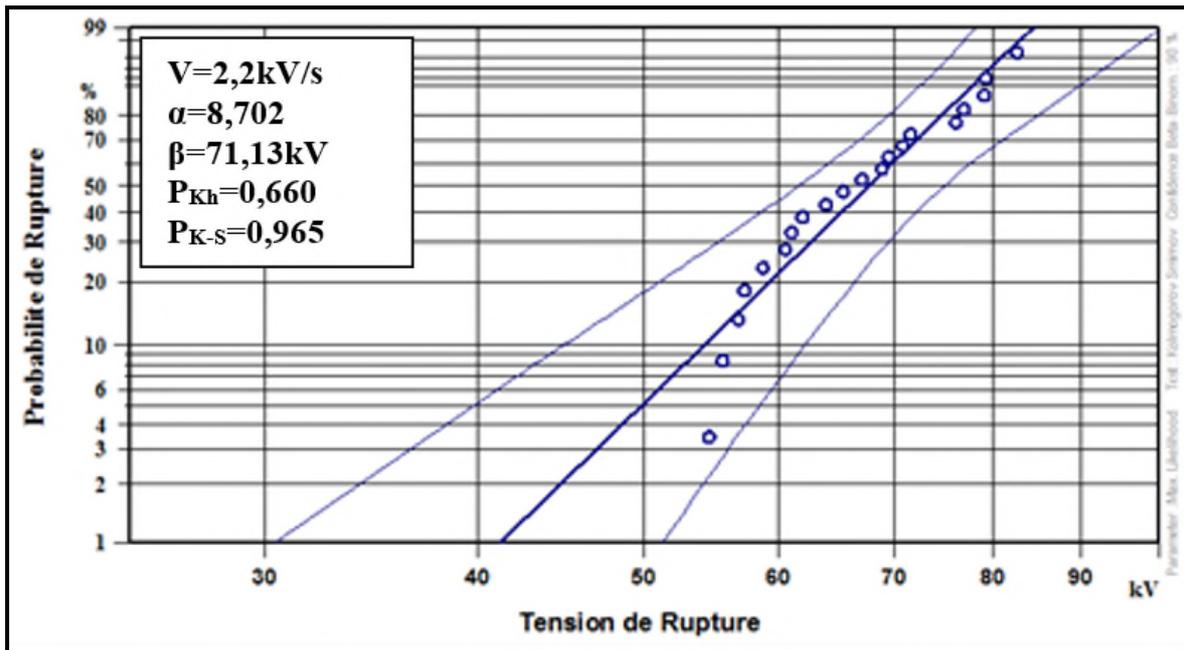


Figure IV. 22 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue négative de 2.2kV/s

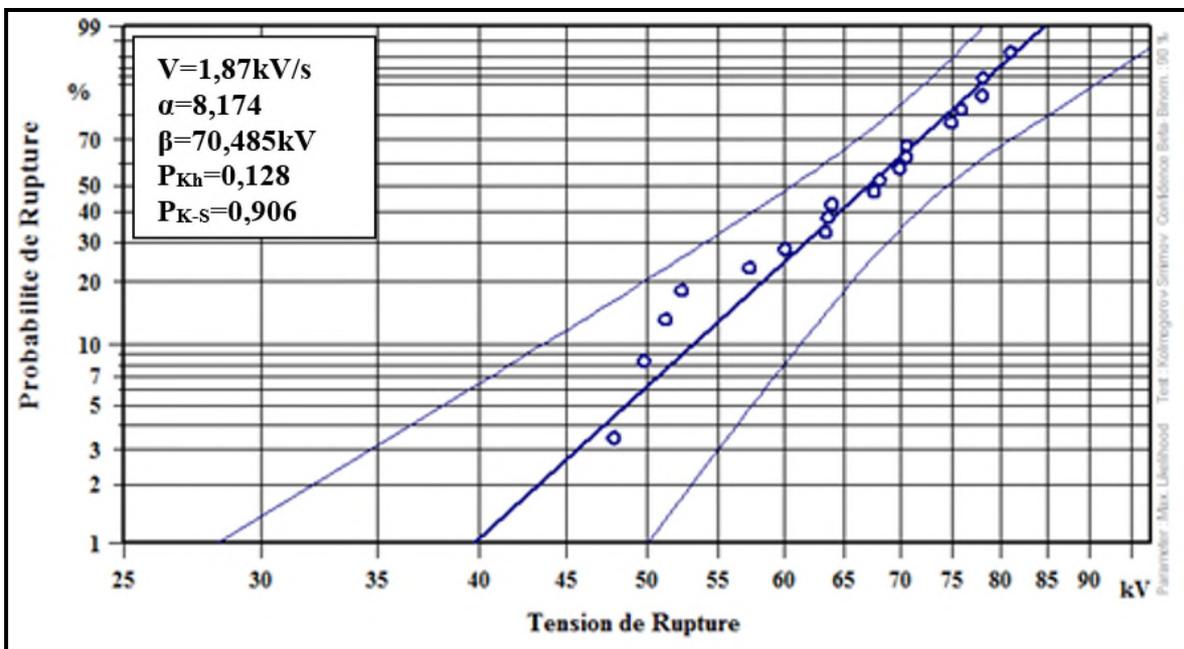


Figure IV. 23 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue négative de 1.87kV/s

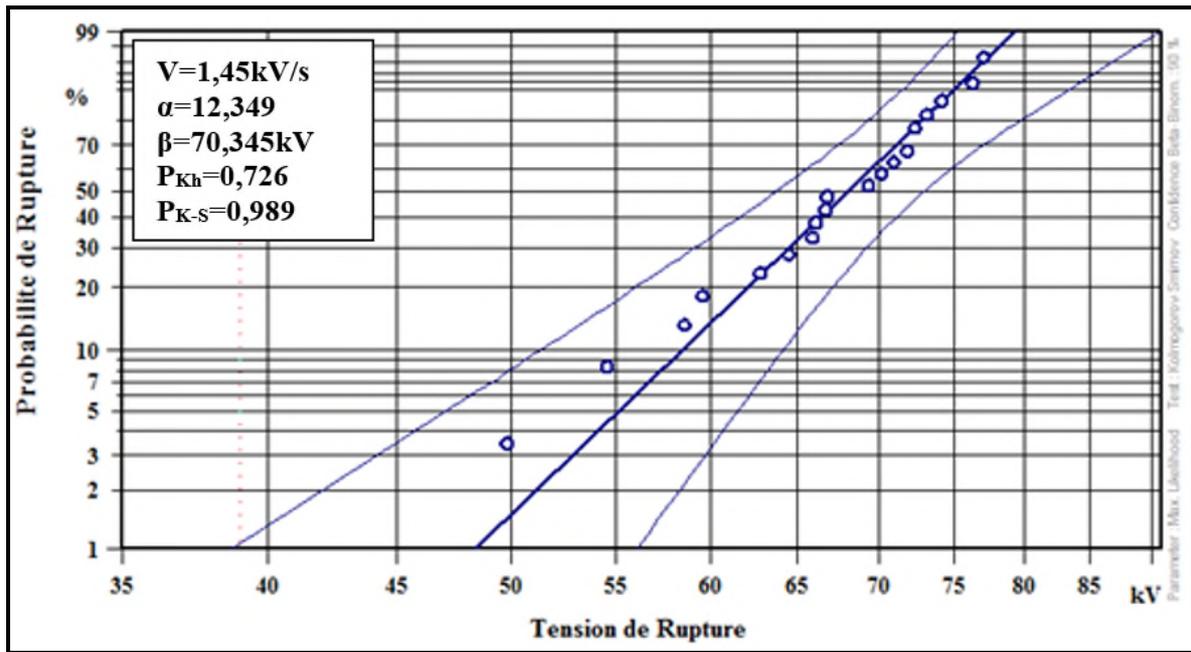


Figure IV. 24 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue négative de 1.45kV/s

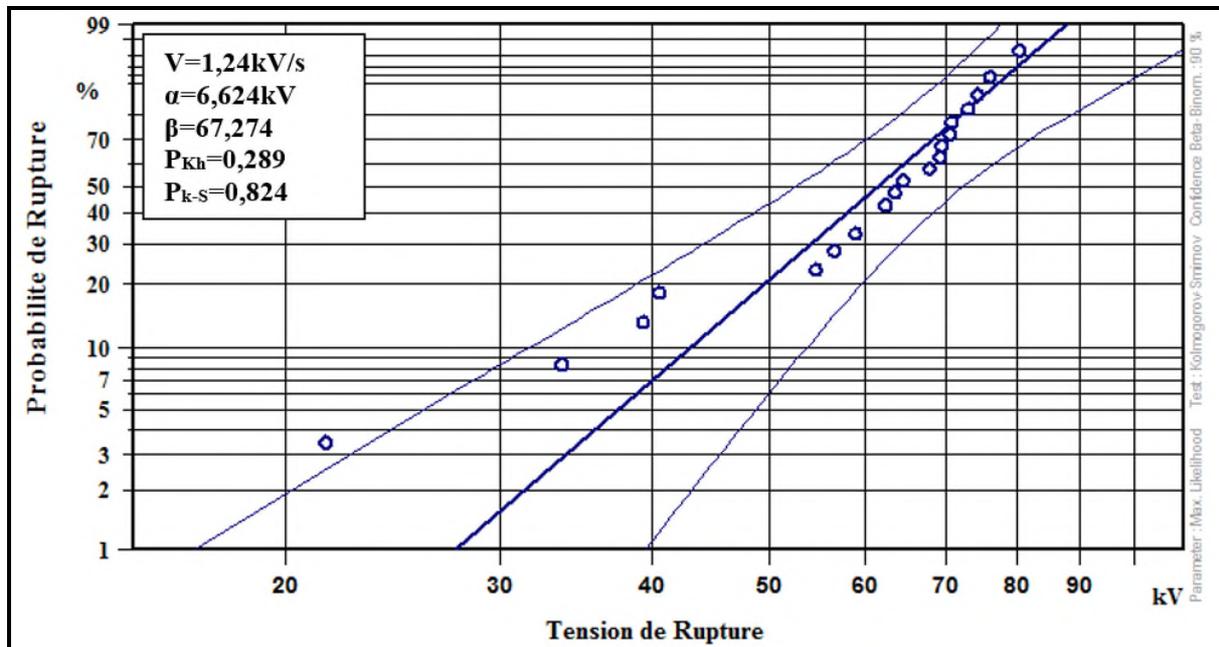


Figure IV. 25 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue négative de 1.24kV/s

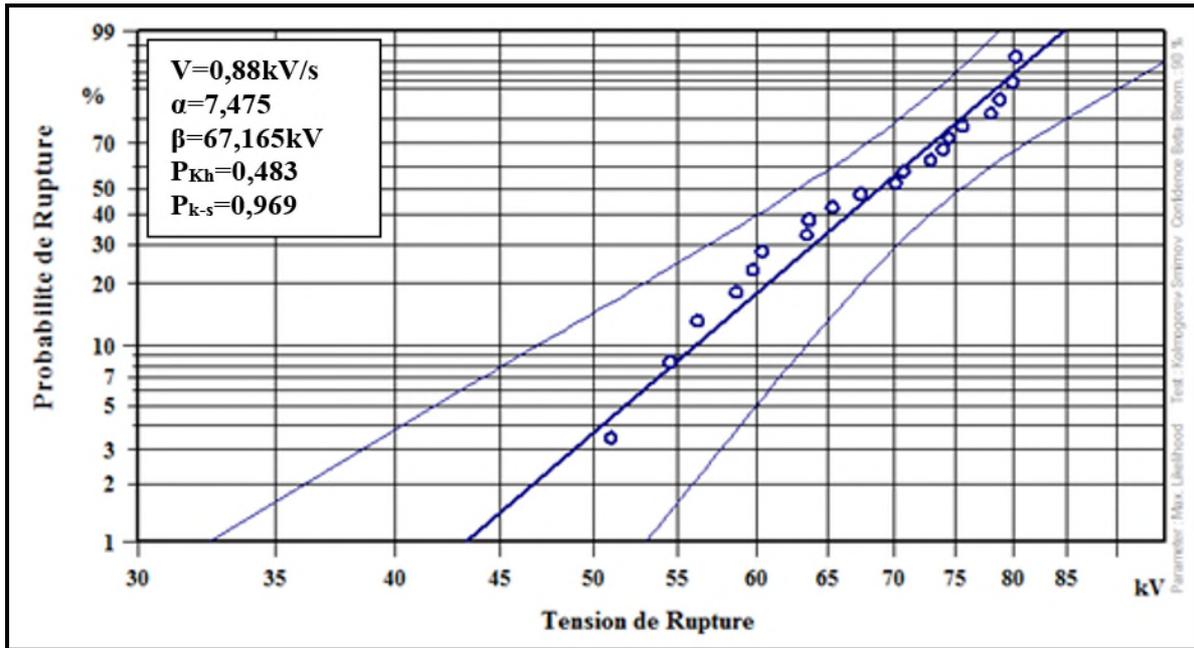


Figure IV. 26 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue négative de 0.88kV/s

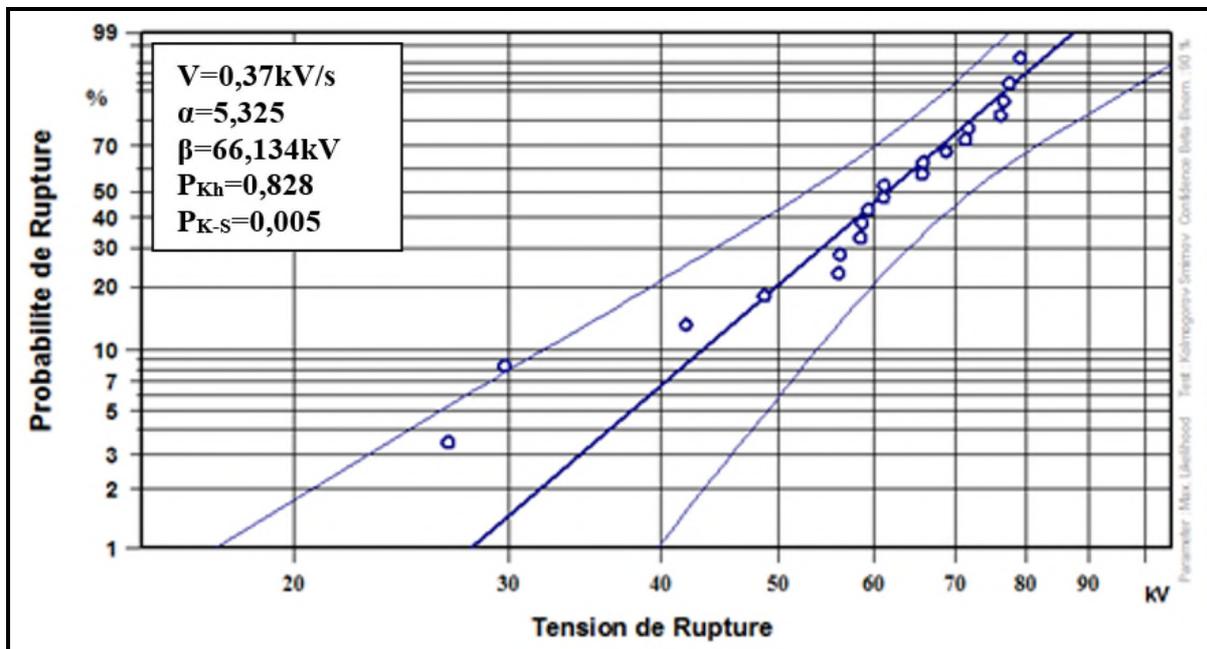


Figure IV. 27 : Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe de tension continue négative de 0.37kV/s

## 11.2 Résultats de l'analyse statistique

Les différents résultats des paramètres de Weibull à deux paramètres, sont représentés dans le tableau IV.5 suivant :

Tableau IV. 5 : Paramètres de Weibull des valeurs de rupture en tension continue de polarité négative

DC -			
Rampe de tension (kV/s)	Paramètre de forme $\beta$	Tension de claquage nominale $U_{cn}$ (kV)	Champ de claquage maximal (kV/mm)
0.37	5.325	66.134	335.706
0.88	7.475	67.165	340.939
1.24	6.624	67.274	341.492
1.45	12.349	70.345	357.081
1.87	8.174	70.485	357.792
2.2	8.702	71.130	361.066
2.69	9.476	71.259	361.721
3.66	9.600	72.155	366.269

## 11.3 Résultats des tests d'adéquation

Les différents résultats des paramètres des deux tests d'adéquation : de Kolmogorov-Smirnov et celui de Khi-deux, sont représentés dans le tableau IV.6 suivant :

Tableau IV. 6 : Résultats des tests d'adéquation des valeurs de rupture sous rampe de tension continue de polarité négative

Tests	Rampe de tension (kV/s)	0.37	0.88	1.24	1.45	1.87	2.2	2.69	3.66
K-S	$P_{k-s}$	0.005	0.969	0.824	0.989	0.906	0.965	0.889	0.973
khi-2	$P(x_{cal}^2 < x_v^2)$	0.828	0.483	0.289	0.726	0.128	0.660	0.374	0.700

## 12. Discussions

### 12.1 Diagrammes de Weibull

Tous les diagrammes de Weibull à deux paramètres précédents et qui représentent les distributions de valeurs des tensions de rupture, peuvent être partiellement ou totalement à l'intérieur des intervalles de confiance indiqués par des lignes droites discontinues et, la largeur de ces intervalles est plus grande pour les plus faibles probabilités de rupture. D'où, la

non nécessité d'aller à la représentation à trois paramètres et de se contenter de celle à deux paramètres.

Lors de l'étude du vieillissement électrique à court terme du matériau polyéthylène, Chauvet a montré que les résultats sont moins dispersés lorsque le facteur de forme est grand [102]. Il en résulte que la distribution est plus dispersée pour la vitesse de 0.88kV/s sous tension continue de polarité positive et moins dispersée pour la vitesse de 1.87kV/s sous tension alternative sinusoïdale.

Le paramètre de forme  $\beta$  varie d'une distribution à l'autre. Cette variation est attribuée à la taille de la distribution et le type de défauts présents dans le diélectrique et/ou créés lorsque la tension lui est appliquée [103]. Les valeurs plus élevées de paramètre de forme correspondent à des défauts plus étroits.

Les valeurs les plus élevées du paramètre de forme  $\beta$  correspondent à un petit nombre de défauts et sont plus étroites [103]. Elles conduisent à un claquage retardé. Au contraire, les valeurs inférieures du paramètre de forme, sont attribuées à un plus grand nombre de défauts, plus larges, qui produisent une défaillance soudaine ou catastrophique [103].

En outre, la diminution de  $\beta$  est attribuée à la diminution de la densité de défauts critique nécessaire pour former un chemin pour le claquage. Coppard et al [104]. Ont démontré que le paramètre de forme est lié à la taille de la distribution des défauts dans le Polyéthylène. Aussi, Katsuta et al ont rapporté que le paramètre de forme dépend du type et de la taille des défauts dans les câbles isolés aux PRC.

## 12.2 Tests d'adéquation

En ce qui concerne les tests d'adéquation, on a opté pour les deux tests de distributions théoriques suivants ; khi-deux et celui de Kolmogorov-Smirnov pour lesquels on a testé l'ajustement des résultats de rupture obtenus et observés depuis le modèle de Weibull à deux paramètres adopté.

Les résultats de ces tests sont donnés dans les trois tableaux ; tableau IV.2, tableau IV.4 et IV.6 précédents.

Le principe des deux tests est de comparer la distribution observée ou issue du modèle adopté à la distribution théorique du test [105-108].

Depuis les trois tableaux, on remarque :

- ✓ les valeurs émanantes du test de khi-deux sont tous supérieures à la valeur 0.05 à l'exception de quelques tests pour les vitesses suivantes : 1.24 ; 1.45 et 2.2kV/s sous tension continue de polarité positive. Ainsi que la vitesse de 1.45kV/s de la tension alternative sinusoïdale,
- ✓ les valeurs du test de Kolmogorov-Smirnov sont tous supérieures à 0.05. à l'exception d'une seule vitesse en tension continue de polarité négative (0.37kV/s),
- ✓ seul 4.16% des résultats d'adéquation ne sont pas favorables par le test de Kolmogorov-Smirnov,
- ✓ 16,66% des résultats d'adéquation ne sont pas favorables par le test de Khi-deux,
- ✓ les résultats d'adéquation qui ne sont pas favorables par un test, le sont favorables par l'autre test.

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

### **12.3 Influence de la forme et de la rampe de tension appliquée sur la tension et le champ de rupture**

À partir des trois tableaux : IV.1, IV.3 et IV.5, nous avons tracé les caractéristiques donnant la variation de la tension nominale de claquage (figure IV.28) et du champ nominal de rupture en fonction de la vitesse de la rampe de tension appliquée (figure IV.28).

La figure IV.28 montre l'évolution de la tension nominale de claquage en fonction de la rampe de tension ; alternative, continue de polarité positive et de polarité négative.

Pour ces trois types de tensions appliquées, toutes les caractéristiques ont la même allure. Nous constatons que la tension de claquage croît légèrement, d'abord linéairement pour les faibles vitesses. Au-delà d'une vitesse de 1,2kV/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 3kV/s.

On remarque aussi, que pour les trois 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 négative que dans le cas d'une tension de polarité positive. Ces valeurs sont moins importantes lors de l'application d'une tension alternative.

Lorsqu' un matériau isolant est soumis à un champ électrique, des décharges partielles se produisent dans les cavités se trouvant à l'intérieur de cet isolant; ce qui provoque l'apparition de l'arborescence électrique [103]. Au final, cela conduit à la rupture du matériau.

Au cours des essais de rupture au laboratoire, on a observé des décharges couronne autour de la surface des échantillons. Ces dernières sont soupçonnées d'avoir chauffé l'isolant et accéléré sa rupture.

Au cours du temps de conditionnement duquel s'opère l'accumulation de défauts et de charges provoquant la rupture [111, 109,112]. La vitesse de la rampe de tension appliquée à l'isolant joue un rôle important sur sa tension de claquage [111, 109,110].

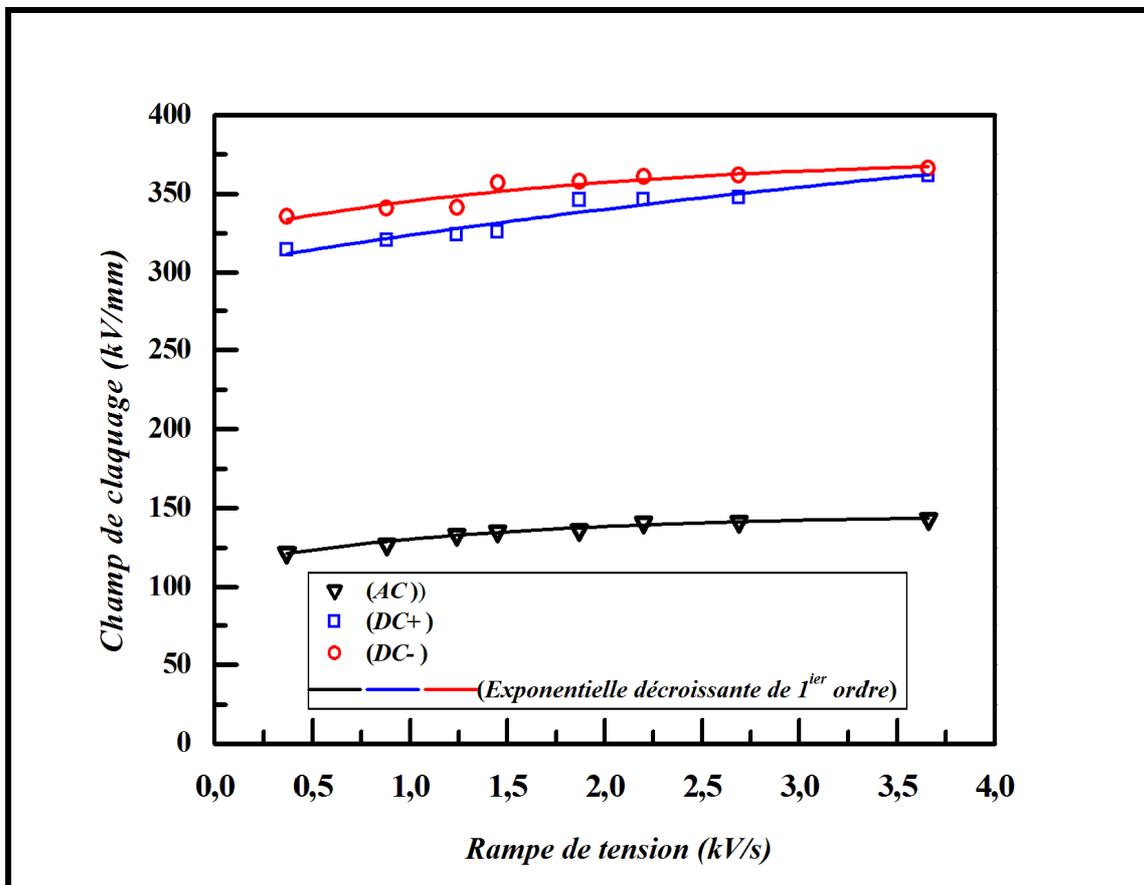


Figure IV. 28 : Champ de claquage en fonction des vitesses de la tension appliquée

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 [113] et confirmé par Fanggao Cheng [114], 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 [111, 109,110]. 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 [114, 111, 109,110].

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, et sont supérieures sous tension de la polarité négative que celles sous tension de polarité positive. 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 [115-119].

La tension de claquage sous rampe de tension continue, dépend de la polarité [111, 109, 110, 116, 120-123].

On note que la tension de rupture tend, vers une certaine saturation qui 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 [111, 109,110].

On note que pour les trois formes de tension, la tension nominale de rupture prend une forme exponentielle avec un palier de saturation qui correspond à des vitesses sensiblement plus élevées, et ceci confirme la loi d'Arrhenius.

### **13. Conclusion**

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 isolant 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, 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 avérée la plus adéquate que celle à trois paramètres. Il en résulte que le seuil de rupture est nul durant ces essais.

Par conséquent, la dispersion de valeurs de rupture nous a imposé des intervalles de confiance pour bien cerner les points dont la dispersion est grande pour les points à faibles probabilités. D'ailleurs, ce caractère statistique pourrait s'expliquer par l'existence d'hétérogénéités et/ou de défauts microscopiques locaux dans le matériau diélectrique.

Les résultats des tests d'adéquation se sont avérés favorables pour les deux tests utilisés ; le test de khi-deux et celui de Kolmogorov-Smirnov. D'ailleurs, ce dernier test s'impose, vu le petit nombre des échantillons testés.

La rigidité diélectrique de ce matériau est plus importante dans le cas où une tension continue est appliquée que celle obtenue en alternative, encore meilleure si la polarité de la tension continue est négative. La valeur maximale de la rigidité diélectrique du matériau PE étudié est de 366.27kV/mm, elle correspond à la valeur 3.66kV/s qui est la vitesse maximale de la tension continue de polarité négative appliquée. Tandis qu'en tension alternative sinusoïdale et sous sa faible vitesse de 0.37kV/s, la valeur de la rigidité est minimale et elle est de 121.86kV/mm.

## **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion générale

Le travail présenté a été consacré à l'étude d'un matériau polymère synthétique de la famille des thermoplastiques et de nature apolaires. Il s'agit des films en polyéthylène PE. Le travail s'inscrit dans le cadre de l'évaluation de la tenue diélectrique de ce matériau utilisé dans les systèmes d'isolation sous tension alternative sinusoïdale et sous tension continue.

Les isolants électriques en polymère, sont souvent semi-cristallins, cette structure complexe dicte les propriétés physiques, mécaniques et électriques des matériaux isolants où ils sont employés. D'ailleurs cette structure présente un désordre d'ordre chimique et un autre désordre d'ordre physique, joue un rôle important dans la complexité de la réponse de ces matériaux à une contrainte qui leurs est appliquée.

La fiabilité est le problème majeur lors du dimensionnement de l'isolation des dispositifs électriques. Lors des essais de rupture diélectrique sur des échantillons placés dans des conditions expérimentales identiques, on n'obtient pas une valeur unique de la tension de claquage mais une distribution de valeurs. Il est donc nécessaire de faire une série de mesure sur un grand nombre d'échantillons identiques et de mener une analyse statistique sur la dispersion des valeurs de rupture. Dans le domaine de la rupture diélectrique des isolant solides, le modèle statistique de Weibull est le plus utilisé vu sa capacité à aller chercher un seuil de rupture s'il y a lieu.

L'analyse statistique effectuée sur les résultats de rupture, montre qu'un tracé à deux paramètres s'avère plus correcte et la recherche d'un seuil de rupture n'est pas nécessaire. La dispersion en temps est plus importante que celle en champ et, que lorsque le paramètre de forme est important, les résultats sont moins dispersés.

Nous avons montré lors de l'étude de la rupture à court terme sur notre matériau, que la rupture diélectrique est un phénomène aléatoire qui se traduit toujours par la formation de chemins préférentiels à forte conductivité. Les conditions dans lesquelles elle se développe dépendent de la configuration du champ électrique, du niveau et de la forme de tension appliquée. Les résultats montrent que la vitesse de montée de la rampe de tension a une influence considérable sur la tension de claquage. En effet, pour les faibles vitesses de la rampe, la tension da claquage croit linéairement. Pour des vitesses plus élevées, on assiste à une variation de forme exponentielle. Enfin un palier de saturation a été constaté au-delà d'une certaine vitesse de la rampe de tension appliquée.

La rigidité diélectrique du matériau étudié est plus importante dans le cas où une tension continue est appliquée que celle obtenue en alternative, encore plus grande si la polarité de la tension continue est négative.

En perspectives, des travaux complémentaires d'analyse des produits de dégradation du matériau étudié par des méthodes physico-chimiques, des mesures de charge d'espace ou encore des analyses par spectroscopie diélectrique sont à envisager dans le cadre de la suite à donner à ce travail.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] : Mandana TALEB, « Modélisation du vieillissement des isolants organiques sous contrainte électrique application à la fiabilité des matériaux », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2011
- [2] : Labri BOUKEZZI, «Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du Polyéthylène Réticulé Chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension», Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- [3] : Cours «Chapitre 7 : Diélectriques Amar TILMATINE.».
- [4] : Sefelec Edition «Notes d'informations techniques : Étude des facteurs d'influences sur les essais de rigidités», édition 2002.
- [5] : R. Coelho, B. Aladenize, Les diélectriques, propriétés diélectriques des matériaux isolants, édition Hermes, 1993.
- [6] : Goffaux, R. Coelho, Sur la rupture filamentaire différée dans les isolants électriques, Revue Phys. Appliquée, 17, pp. 55-64, 1982.
- [7] : Artbauer, Elektrische Festigkeit Von Polymeren, Kolloid Z. und Z. Polymere, Vol. 202, pp. 15-25, 1965.
- [8] : M. Ieda, Dielectric breakdown process of polymers, IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. EI-15 N°3, pp. 206-224, 1980.
- [9] : Nedjar, Weibull statistics in the effect of dioctyl phthalate ratio on the polyvinyl chloride properties, Annales de Chimie, Science des Matériaux, Vol. 35/3, pp. 81-88, 2010.
- [10] : M. Nedjar, Effect of plasticizer ratio on the properties of polyvinyl chloride used in insulation of high voltage cables, 10th International Electrical Insulation Conference (INSUCON) Birmingham, UK, May 2006.
- [11] : L.A. Dissado, J.C. Fothergill, Electrical degradation and breakdown in polymers, G.C. Stevens, 1992.
- [12] : E. Hallen, Electromagnetic theory, Chapman and Hall, pp. 35-73, 1962.
- [13] : K.H. Stark, G.C. Garton, Electric strength of irradiated polyethylene, Nature 176, 60, pp. 1225-1226, 1955.
- [14] : R. Fournié, Les isolants en électrotechnique, essais, mécanismes de dégradation, applications industrielles, édition Eyrolles, 1990.
- [15] : C. Laurent, La rupture diélectrique dans les polymères, RGE, N°10, pp. 745-755, 1985.
- [16] : S. Péliou, H. St-Onge, M.R. Wertheimer, Dielectric breakdown in polyethylene at elevated temperatures, IEEE Trans. On Elect. Insul., Vol. EI-19, N°3, pp. 241-244, June 1984.
- [17] : J.J. OD'wyer, The theory of dielectric breakdown of solids, Oxford University Press, London, 1964.

- [18] : G.A. Vorob'ev, N.I. Lebedeva, G.S. Nadorava, Dependence of the breakdown voltage of the thickness of sample for some alkali halide crystals, Soviet Physics-Solid State, Vol. 13, pp 736-737, 1971.
- [19] : J.C. Dubois, Propriétés diélectriques, Techniques de l'ingénieur, A3140, 1990.
- [20] : K. D. Wolter, J.F. Johnson, J. Tanaka, Polymer Degradation and its Measurement, chapter 5, Engineering dielectrics, Vol.II-A, Electrical properties of solid insulating materials: measurement techniques, Editor R. Bartnikas, pp. 313-439, 1987.
- [21] : J. Verdu, Vieillissement des plastiques, édition Eyrolles, 1984.
- [22] : A.K. Jonscher, R. Lacoste, On a cumulative model of dielectric breakdown in solids, IEEE Trans. On Elect. Insul., Vol. EI-19, N°6, pp. 567-577, December 1984.
- [23] : D.M. Robinson, Dielectric phenomena in high-voltage cables, Chapman and Hall, 1936.
- [24] : C. Laurent, C. Mayoux, A. Sergent, Electrical breakdown due to discharges in different types of insulation, IEEE Trans. on Elect. Insul. Vol. E1-16, N°1, pp. 52-58, February 1981.
- [25]: Bui Ai, Contribution à l'étude de la dégradation des isolants en feuilles sous l'action des décharges partielles, Thèse de Doctorat Sciences Physique, Toulouse, 1966.
- [26]: J.H. Mason, The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharges , Proc. IEE, 98, pp. 44-59, 1951.
- [27]: J.H. Mason, Breakdown of solid dielectrics in divergent fields, Proc. IEE, 102C, 2, pp. 254-263, 1955

- [28]: G. Bahder, C. Katz, J. Lawson, W. Wahlstrom, Electrical and electrochemical treeing effect in polyethylene and cross-linked polyethylene cables, IEEE Trans. PAS-93, pp. 977-987, 1974.
- [29]: R. Croxford, Initiation of trees from conducting points or edges in solid insulation, Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques , 15.06, 1973.
- [30]: G. Bahder, T.W. Dakin, J.H. Lawson, Analyse du claquage par arborescence, Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, 15.05, 1974.
- [31] :M. Nawata, H. Kawamura, M. Ieda, Voltage and temperature dependence of treeing breakdown in plastic insulators, International Symposium on High Voltage Technology, pp. 428-434, 1972.
- [32]: T.W. Billing, J. H. Masson, The effect of additives on discharge channel propagation in polyethylene, IEE Conference on Dielectric Materials Measurements and Applications, pp. 93-96, 1970.
- [33]: R.M. Eichhorn, Treeing in solid extruded electrical insulation, IEEE Trans. on Elect.Insul, Vol. EI-12, N°1, pp. 2-18, February 1976.
- [34]: F. Noto, N. Yoshimura, Voltage and frequency dependence of tree growth in polyethylene, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 207- 217, 1974.
- [35]: F. Noto, N. Yoshimura, Initiation and growth of trees of polymeric dielectric materials, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 274-281, 1973.
- [36]: F. Noto, N. Yoshimura, Growth and forms of trees in polyethylene studied using intermittent applied voltages, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 165-170, 1972.
- [37]: Y. Shibuya, S. Zoledziowski, J.H. Calderwood, Void formation and electrical breakdown in epoxy resin, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS- 96, N°1, pp. 198-207, 1977.
- [38]: J. Perret, Y. Le Gall, P. Recoupé, Contribution à l'étude des mécanismes de formation et de propagation des arborescences dans le polyéthylène pour câbles à haute

tension, RGE, Tome 85, N°9, pp. 737-747, 1976.

[39]: M. Stoica, F. Tanasesco, G. Giurgiu, A. Ifrim, Le phénomène d'arborescences dans les matériaux diélectriques synthétiques destinés à l'isolation des câbles de force, Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, 15.11, 1978.

[40]: M. Nawata, H. Kawamura, Deterioration and breakdown due to treeing from a needle-shaped void in organic insulators, Electrical Engineering in Japan, Vol. 88, N°10, pp. 45-49, 1968.

[41]: J.H. Lawson, W. Vahlström, Investigation of insulation deterioration in 15 and 22 kV polyethylene cables removed from service, part II, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, pp. 824-835, 1973.

[42]: F.W. Peek, Dielectric phenomena high in voltage engineering, MC Graw Hill, 1929.

[43]: IEEE Guide for the statistical analysis of electrical insulation voltage endurance data, ANSI/ IEEE Std. 930, 1987.

[44]: M. Nedjar, A. Bérroual, Electrical aging of polyurethane under AC voltage, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 109, pp. 789-794, 2008.

[45]: M. Nedjar, A. Bérroual, Weibull statistics in electrical aging of polyesterimide under AC voltage, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 116, pp. 1593-1596, 2010.

[46]: Abdelkrim LAIFAOU, « Étude d du vieillissement la tenue diélectrique des gaines en polychlorure de vinyle sous tension alternative et continue », Thèse de Doctorat en Sciences, université de Bejaia, 2016.

[47]: Melle AIT-SAADI ZOHRA, « Vieillissement électrique du polyester-imide et du polyamide imide utilisés dans les machines électriques », magister Spécialité : Électrotechnique Option : Entraînements électriques, université MOULOUD MAMMARI de TIZI OUZOU faculté de génie électrique et d'informatique, département d'électrotechnique, 2012.

[48]: J.F. Lawless, "Statistical Models and Methods for Lifetime Data", John Wiley & Sons, 2011.

[49]: W. Weibull, "A statistical distribution function of wide applicability", J. Appl. Mechanics, Vol. 18, pp. 293-297, 1951.

[50]: A. Laifaoui, J.M. Reboul, H. Ait Said et al, "Isolant solide, liquide ou gazeux : quelle méthode statistique choisir pour estimer la tension AC de claquage?" 9ème conférence de la

Société Française d'Electrostatique, 27-29 août 2014, Toulouse, France, Proceedings SFE'2014, ISBN 978-2-9549467-0-2, EAN 9782954946702, pp. 55-61.

[51]: A. Laifaoui, M. Aissou, M.S. Herzine et al, "Mesure de la tension de rupture diélectrique du polychlorure de vinyle dans un système coaxial et en alternatif sinusoïdal", 7th Conference of the French Society of Electrostatics, 30/08/201001/09/2010, Montpellier, France, Proceedings SFE'2010, ISBN 2-9505432-7-8, EAN 9782950543271, pp. 300-304.

[52]: A. Laifaoui, M. Aissou, M.S. Herzine et al, "Etude du vieillissement électrique à court terme du polychlorure de vinyle", First International Conférence on Power Electronics and Electrical Drives ICPEED'10, Oran, Algérie, 06-07 octobre 2010.

[53]: A. Laifaoui, M. Aissou, M.S. Herzine et al, "Etude du vieillissement électrique à court terme du polychlorure de vinyle sous tensions alternative et continue", Third International Meeting on Dielectric Materials IMDM'3, Monastir, Tunisia December 14-18, 2011.

[54]: A. Laifaoui, M. Aissou, M.S. Herzine et al, "Etude de la rupture diélectrique du polychlorure de vinyle", 8ème conférence de la Société Française d'Electrostatique, 3-5 juillet 2012, Cherbourg-Octeville, France, Proceedings SFE'2012, ISBN 978-29542540-0-5, EAN 9782954254005, pp. 291-295.

[55]: A. Laifaoui, J.M. Reboul, M. Aissou and al, "Study of the dielectric failure of polyvinyl chloride sheaths under AC and DC high voltages", International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control, ICEEAC'2013, Setif, Algeria, 24-26 November 2013.

[56]: A. Laifaoui, J.M. Reboul, M. Aissou et al, "Influence de la rampe de tension ainsi que de sa forme sur la tension de claquage des gaines en PVC", cinquième Conférence Internationale sur l'Electrotechnique, ICEL'13, Oran, Algérie, 03-04 décembre 2013.

[57]: A. Laifaoui, J.M. Reboul, M. Aissou et al, "Etude du vieillissement électrique des gaines en polychlorure de vinyle sous tension alternative sinusoïdale", 9ème conférence de la Société Française d'Electrostatique, 27-29 août 2014, Toulouse, France, Proceedings SFE'2014, ISBN 978-2-9549467-0-2, EAN 9782954946702, pp. 121-126.

[58]: A. Laifaoui, J.M. Reboul, M.S. Herzine and al, "Breakdown strength measurements on cylindrical polyvinyl chloride sheaths under AC and DC voltages" Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 2014, vol. 21, no 5, pp. 2267-2273.

- [59]: F. Chang, "Electrical properties of flexible polypropylene based cable insulation materials", *J. Mater. Sci.*, Vol. 41, pp. 2037–2043, 2006.
- [60]: V. Englund, R. Huuva, S.M. Gubanski and T. Hjertberg, "High efficiency voltage stabilizers for XLPE cable insulation", *Science Direct: Polymer Degradation and Stability* No. 94, pp. 823–833, 2009.
- [61]: K. Wu, Y. Wang, Y. Cheng, L.A. Dissado and X. Liu, "Statistical behavior of electrical breakdown in insulating polymers", *J. Appl. Phys.*, Vol. 107, 064107, pp. 064107-1-064107-6, 2010.
- [62]: "Systèmes d'isolation : évaluation de l'endurance électrique des systèmes d'isolation électrique, procédure d'évaluation basée sur des distributions de valeurs extrêmes", Commission Electrotechnique Internationale, comité d'étude N°63, Septembre 1989.
- [63]: J.M. Oudin, "Evaluation de la fiabilité des réseaux de câbles isolés à partir d'essais statistiques de claquage sur échantillons. Limites de l'extrapolation et anomalies statistiques possibles", *REG*, tome 80, N° 4, 1971, pp. 330-334.
- [64]: C. Simon, "Recherche de la fiabilité des câbles exposés à des contraintes du gradient électrique", *REG*, tome 80, N° 11, 1971, pp. 831-836.
- [65]: L.A. Dissado, "Theoretical basis of dielectric breakdown", *J. Phys. D: Phys.*, Vol. 23, 1990, pp. 1582-1591.
- [66]: M. Ugur, A. Kuntman, A. Ersoy, "A study on the ageing process for polyester resin using improved Weibull statistics", *Electrical Engineering* N°85, 2003, pp 283–288.
- [67]: M. Nedjar, "Evaluation de la tenue diélectrique à court et à long termes des polymères utilisés dans les dispositifs haute tension", Thèse doctorat, Université de Tizi Ouzou, Algérie 2003.
- [69]: E. Tuncer, D.R. James, I. Sauers, A.R. Ellis and M.O. Pace, "On dielectric breakdown statistics", *J. Phys. D : Appl. Phys.* N°39, 2006, pp 4257–4268.
- [70]: J.M. Oudin, Y. Reyrolle, H. Thevenon, "Théorie statistique du claquage électrique", *REG*, N°4, 1968, pp. 403-436.
- [71]: C. Manski, "Regression", *Journal of Economic Literature*, vol. 29, no 1, mars 1991, pp. 34-50.
- [72]: 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", *REG*, 10/85, Octobre 1985, pp. 769-775.

- [73]: C. Laurent, C. Mayoux, "Comportement à long terme des isolants solides : vers la prévision des seuils de dégradation", REG, N° 8, Septembre 1990, pp. 30-36.
- [74]: C. Chauvet, C. Laurent, "Weibull statistics in short-term dielectric breakdown of thin polyethylene films", IEEE Trans. On Elect. Insul, Vol. 28, N°1, February 1993, pp. 18-29.
- [75]: A. Darhouani, "Caractérisation de la tenue diélectrique des polyéthylènes sous champ alternative à 50Hz", thèse de doctorat 3èmé cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1985.
- [76] : M. Cacciari, G.C. Montanari, L. Simoni, A. Cavallini, A. Motori, "Long-term electrical performance and life model fitting of XLPE and EPR insulated cables", IEEE, Transactions on Power Delivery, Vol. 7, N° 2, pp. 634-641, April 1992.
- [77] : R. Lacoste, "Nouveaux développements sur la notion de champ seuil", S.E.E, Mai 1986, pp. 13-18.
- [78] : A. Laifaoui, J.M. Reboul, M. Aissou and al, "Study of the dielectric failure of polyvinyl chloride sheaths under AC and DC high voltages", International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control, ICEEAC'2013, Setif, Algeria, 24-26 November 2013.
- [79] : A. Laifaoui, J.M. Reboul, M. Aissou et al, "Influence de la rampe de tension ainsi que de sa forme sur la tension de claquage des gaines en PVC", cinquième Conférence Internationale sur l'Electrotechnique, ICEL'13, Oran, Algérie, 03-04 décembre 2013.
- [80] : A. Laifaoui, J.M. Reboul, M. Aissou et al, "Etude du vieillissement électrique des gaines en polychlorure de vinyle sous tension alternative sinusoïdale", 9ème conférence de la Société Française d'Electrostatique, 27-29 août 2014, Toulouse, France, Proceedings SFE'2014, ISBN 978-2-9549467-0-2, EAN 9782954946702, pp. 121-126.
- [81] : A. Laifaoui, J.M. Reboul, M.S. Herzine and al, "Breakdown strength measurements on cylindrical polyvinyl chloride sheaths under AC and DC voltages" Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 2014, vol. 21, no 5, pp. 2267-2273.
- [82] : P. Jaffard, "Initiation aux méthodes de la statistique et du calcul des probabilités", édition Masson, 1976.
- [83] : B. Escoubès, "probabilités et statistiques à des physiciens", édition Ellipses, 1998.
- [84] : "Évaluation et qualification des systèmes d'isolation électrique", Norme Internationale, IEC International Standard 60505, Deuxième édition, 1999.
- [85] : B. Grais, "Méthodes statistiques", Édition Dunod, 1990.
- [86] : J.F. Lawless, "Confidence interval estimation for the Weibull and extreme-value distribution", Technometrics, Vol. 20, N° 4, November 1978, pp. 355-363.

- [87] : J.F. Lawless, "Construction of tolerance bounds for the extreme-value and Weibull distributions", *Technometrics*, Vol. 17, N° 2, May 1975, pp. 255-261.
- [89] :G. Saporta, "Probabilités, analyse des données, statistique", édition Technip,1990.
- [88] : "Systèmes d'isolation : évaluation de l'endurance électrique des systèmes d'isolation électrique, procédure d'évaluation basée sur des distributions de valeurs extrêmes", Commission Electrotechnique Internationale, comité d'étude N°63, Septembre 1989
- [90] : "Guide de pratique d'utilisation des lois statistiques de Weibull dans l'étude de la fiabilité des câbles", Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, groupe de travail 21-09, 1984.
- [91] :G.C. Stone, R.G. Van Heeswijk, "Parameter estimation for the Weibull distribution", *IEEE Trans. On Elect. Insul*, Vol. EI-12, N° 4, August 1977, pp. 253-261.
- [92] :G.C. Stone, "Personal computer software to analyse extreme-value and Weibull statistical data", Ontario Hydroresearch division, May 1986.
- [93] : P. Chapouille, R. de Paizzis, "Fiabilité des systèmes", Édition Masson, 1965.
- [94] :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", *REG*, 10/85, Octobre 1985, pp. 769-775.
- [95] :C. Laurent, C. Mayoux, "Comportement à long terme des isolants solides : vers la prévision des seuils de dégradation", *REG*, N° 8, Septembre 1990, pp. 30-36.
- [96] :C. Chauvet, C. Laurent, "Weibull statistics in short-term dielectric breakdown of thin polyethylene films", *IEEE Trans. On Elect. Insul*, Vol. 28, N°1, February 1993, pp. 18-29.
- [97] :L. Simoni, "Dielectric proprieta e comportamento nel tempo", Universitaria Editrice, Bologna, 1974.
- [98] : M. Cacciari, G.C. Montanari, L. Simoni, A. Cavallini, A. Motori, "Long-term electrical performance and life model fitting of XLPE and EPR insulated cables", *IEEE, Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, N° 2, pp. 634-641, April 1992.
- [99] : Abdelkrim LAIFAOU, « Etude d du viellesemente la tenue diélectrique des gaines en polychlorure de vinyle sous tension alternative et continue », Thèse de Doctorat en Sciences, université de Bejaia, 2016.
- [100] : Labri BOUKEZZI, «Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du Polyéthylène Réticulé Chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension», Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger.

- [101] : Jean Sanchez, "Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance ". Université de Grenoble, 2011. France.
- [102] : C. Chauvet, "Mise au point d'une méthodologie pour les essais de rupture à court terme en vue de la caractérisation des isolants synthétiques", thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1992.
- [103] : M. Nedjar, "Statistical Study On Short-Term Dielectric Breakdown of Poly (vinyl chloride)", Wiley Online Library , Journal Of Vinyl & Additive Technology, 2013.
- [104] : R.W. Coppard, J. Bowman, L.A. Dissado, S.M. Rowland, and R.T. Rakowski, "The effect of aluminium inclusions on the dielectric breakdown of polyethylene", J. Phys. D. Appl. Phys., Vol. 23, Num. 12, 1990, 1554.
- [105] : P. Chapouille, R. de Paizzis, "Fiabilité des systèmes", édition Masson, 1965.
- [106] : 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", REG, Octobre 1985, 10/85, pp. 769-775.
- [107] : C. Chauvet, C. Laurent, "Weibull statistics in short-term dielectric breakdown of thin polyethylene films", IEEE Trans. On Elect. Insul., Vol. 28, N°1, February 1993, pp. 18-29.
- [108] : L. Simoni, "Dielectrici proprieta e comportamento nel tempo", Universitaria Editrice, Bologna, 1974.
- [109] : A. Laifaoui, J.M. Reboul, M.S. Herzine and al, "Breakdown strength measurements on cylindrical polyvinyl chloride sheaths under AC and DC voltages" Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 2014, vol. 21, no 5, pp. 2267-2273.
- [110] : A. Laifaoui, J.M. Reboul, M. Aissou and al, "Study of the dielectric failure of polyvinyl chloride sheaths under AC and DC high voltages", International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control, ICEEAC'2013, Setif, Algeria, 24-26 November 2013.
- [111] : A. Laifaoui, J.M. Reboul, M. Aissou et al, "Influence de la rampe de tension ainsi que de sa forme sur la tension de claquage des gaines en PVC", cinquième Conférence Internationale sur l'Electrotechnique, ICEL'13, Oran, Algérie, 03-04 décembre 2013.
- [112] : A.K. Jonscher, R. Lacoste, "On a cumulative model of dielectric breakdown in solids" IEEE Transaction on Electrical Insulation". Vol EI-19, N°6, December 1984, pp 567-577.
- [113] : A.K. Jonscher and R. Lacoste, "On a cumulative model of dielectric breakdown in solids", Electrical Insulation, IEEE Transactions on, no 6, 1984, pp. 567-577.
- [114] : F. Chang, "Electrical properties of flexible polypropylene based cable insulation materials", J MATER SCI 41, 2006, pp. 2037-2043.

- [115] : 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", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2012 Annual Report Conference on. IEEE, 2012, pp. 375-378.
- [116] : M. Nedjar, Y. Mecheri, A. Lamure, M. Aufray, C. Drouet, "Effect of moisture on breakdown voltage of Polyesterimide used in electrical machines", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2010 Annual Report Conference on. IEEE, 2010. pp. 1-4
- [117] : S. Grzybowski, E.A. Feilat, P. Knight, L. Doriott, "Breakdown voltage behavior of pet thermoplastics at DC and AC voltages", Southeastcon'99. Proceedings IEEE. IEEE, 1999. pp. 284-287.
- [118] : E. Gockenbach, G. Schiller, "The breakdown behavior of XLPE samples at voltages of different shapes, ninth international symposium of high voltage engineering", august 28-septembre 1, 1995, pp 1493-1-1493-4.
- [119] : K. Katsutsa, A. Toya, S. Katakai, M. Kanoaka, Y. Sekkii, "Influence of defects on insulating properties on XLPE cable", 3rd international conference on properties and applications of dielectric materials, july 8-12, 1991, pp. 485-489.
- [120] : J.P. Crine, "AC and DC electrical aging of polyethylene", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 26 - 29 October 2008, pp. 60-62.
- [121] : J.P. Crine, "On the interpretation of some electrical aging and relaxation in solid dielectrics", IEEE Trans. DEI, vol. 12, 2005 pp. 1089-1107.
- [122] : J.P. Crine, "A molecular model for the electrical aging of PE", Proc. CEIDP, 2007.
- [123] : J.P. Crine, "On the interpretation of some electrical aging and relaxation in solid dielectrics", IEEE Trans. DEI, vol. 12, 2005 pp. 1089-1107.