

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de Technologies
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin de cycle

*En vue de l'obtention du diplôme de master en Electrotechnique,
Option: Electromécanique*

Thème

**Etudes des paramètres influant sur la tension de claquage de
l'huile Borak 22 utilisée dans les transformateurs de
puissance**

Réalisés par :

**Mr. ILILTEN Amine
Mr. HASNIOU Zakaria**

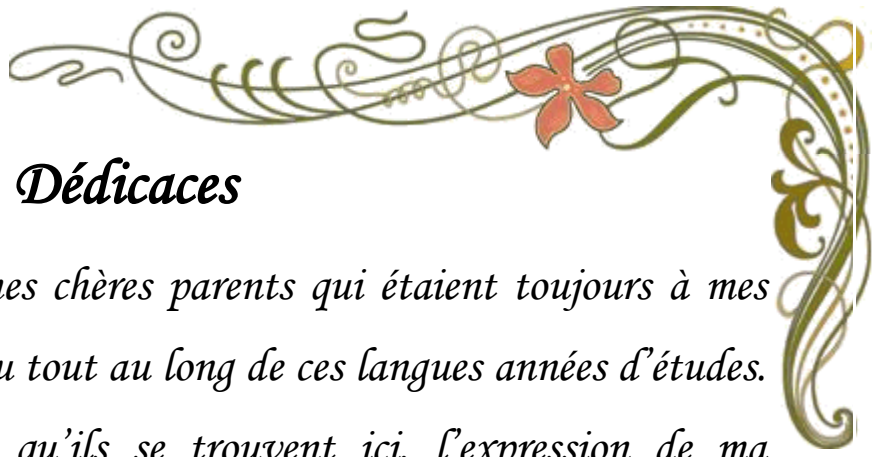
Devant le jury :

**Mr R.BOUDISSA
Mr.MS.HERZINE**

Encadreur:

Mr. A. LAIFAOU

Promotion : 2014/2015



Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes chères parents qui étaient toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance, qu'ils se trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

A mes frères Athmane, Juba,

A ma sœur Lynda, son époux Massinissa et leurs fils Youcef,

A la mémoire de mon grand père,

A mon grand père et mes grandes mères,

A toute la famille ILILTEN, SIDIALI et à tous ce qui sont proches de près ou de loin,

A ma chère cousine Kahina qui ma soutenu le long du travail,

A tous mes amis.



AMINE



Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes chères parents qui étaient toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance, qu'ils se trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

A mes deux chers frères Akram et Aymen,

A ma belle sœur,

A la mémoire de mon grand père,

A mon grand père Bachir,

A mes grandes mères, mes oncles, mes tantes, mes cousins et mes cousines,

A Melle Malika YAHIAOUI, qui ma soutenu et encouragé de long de ce travail,

A tous mes amis.



Zakaria

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 A.LAIFAOVI 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.

On tient également à remercier monsieur R. BOUDISSA, d'avoir accepté de présider le jury de notre mémoire.

On remercie monsieur M.S. HERZINE d'avoir accepté d'examiner notre travail de mémoire.

On est particulièrement au grand honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant cette tâche.

Sommaire

Sommaire	1
Liste des figures	6
Liste des tableaux.....	10
Glossaire.....	11
Introduction générale	14
Chapitre 1 : Généralités sur les transformateurs électriques de puissance.....	16
1. Introduction.....	16
2. Transformateurs de puissance.....	16
2.1 Description	16
2.2 Principe de fonctionnement.....	16
2.3 Constitution	17
2.4 Rôle et domaine d'application.....	18
2.5 Différents types de transformateurs	19
2.5.1 Classification selon le type de construction	19
2.5.2 Classification selon le domaine d'application	20
2.5.3 Classification selon le type de refroidissement.....	20
3. Conclusion	21
Chapitre 2 : Caractéristiques des isolants pour transformateurs de puissance.....	23
1. Introduction.....	23
2. Isolants électriques pour transformateurs	23
2.1 Caractéristiques des huiles minérales.....	23
2.1.1 Généralités	23
2.1.2 Choix de l'huile.....	24
2.1.3 Rôle des huiles isolantes	24

2.1.4	Analyses d'huile et diagnostic de transformateur	24
2.1.5	Propriétés des huiles pour transformateurs	26
2.2	Caractéristiques des papiers dits PSP (presspahn)	27
2.2.1	Propriétés physiques	27
2.2.2	Propriétés mécaniques.....	28
2.2.3	Propriétés diélectriques	29
2.3	Caractéristiques du papier imprégné	30
2.3.1	Hygroscopicité du papier imprégné	30
2.3.2	Propriétés diélectriques du papier imprégné.....	30
3.	Conclusion	31
Chapitre 3: Mécanismes disruptifs des isolants dans les transformateurs		32
1.	Introduction.....	32
2.	Phénomènes dans les transformateurs de puissances	32
2.1	Surtensions	32
2.2	La ferrorésonance	32
2.3	Surintensités / Surcharges	32
3.	Essais diélectriques normalisés.....	33
3.1	Essais de tenue au choc de foudre	33
3.2	Essais de tenue des enroulements basse tension et haute tension à la fréquence industrielle 34	
3.3	Essaie de tenue entre spires par tension induite	34
4.	Mécanismes de dégradations des isolants dans le transformateur	34
4.1	Phénomènes prédisruptifs dans les diélectriques solides	34
4.1.1	Vieillessement.....	34

4.1.2	Décharges partielles	34
4.1.3	Mécanismes de claquage.....	35
4.1.4	Arborescences	39
5.	Phénomènes prédisruptifs dans les diélectriques liquides	39
6.	Conclusion	40
	Chapitre 4 : Maintenance et traitement statistique	41
1.	Introduction.....	41
2.	Maintenance.....	41
2.1	Définition.....	41
2.2	Maintenance application au transformateur	41
2.2.1	Actions entreprises pour la maintenance des transformateurs	41
2.2.2	Démarches de diagnostic sur un transformateur	42
2.3	Les principaux défauts sur un transformateur	43
2.3.1	Défauts dus aux contraintes diélectriques	43
2.3.2	Défauts dus aux surintensités	44
2.3.3	Défauts électriques	45
2.3.4	Défauts thermiques	46
2.3.5	Défauts électromagnétiques	47
2.3.6	Défauts mécaniques	47
2.4	Protection des transformateurs	48
2.4.1	Protections électriques	48
2.4.2	Protections thermiques.....	49
2.4.3	Autres protections	49
2.5	Diagnostic de défauts par la méthode de l'arbre de défaillances	50

2.5.1	Définition	50
2.5.2	Principe	50
2.5.3	Objectifs	51
2.5.4	Logiciel Arbre-Analyste	51
2.5.5	Application à un réseau de distribution d'énergie électrique.....	51
2.5.6	Elaboration de l'arbre de défaillance du réseau de distribution de la région d'Ighil Ouazzoug	52
2.5.7	Elaboration de l'arbre de défaillance d'un transformateur de puissance.....	53
3.	Importance de l'huile dans un transformateur de puissance.....	54
4.	Modèles statistiques appropriés à la rupture diélectrique	54
4.1	Modèle statistique de Weibull.....	55
4.2	Modèle de la loi normale.....	56
4.2.1	Définition	56
5.	Méthodes de lissage linéaire	56
5.1	Principe de lissage linéaire par la méthode des moindres carrés.....	56
5.2	Lissage linéaire par la méthode du maximum de vraisemblance	58
6.	Intervalles de confiance	58
7.	Test d'adéquation.....	59
7.1	Test de khi-deux	60
7.2	Test de Kolmogorov-Smirnov.....	60
8.	Conclusion	61
Chapitre 5 : Partie expérimentale.....		62
1.	Introduction.....	62
2.	Dispositifs expérimentaux	62
3.	Déroulement des essais.....	63

Traitement statistique.....	65
4. Résultats et discussions.....	65
4.1 Influence de la vitesse de la rampe de tension	65
4.1.1 Diagrammes de Weibull.....	65
4.2 Influence de la distance interélectrode	70
4.2.1 Diagrammes de Weibull.....	70
4.3 Influence de la géométrie des deux électrodes	74
4.3.1 Géométrie similaire des deux électrodes	74
4.3.2 Géométrie de l'électrode active en sphère.....	77
4.3.3 Géométrie pointe de l'électrode active en pointe	80
4.3.4 Géométrie plane de l'électrode active en plan.....	83
4.3.5 Influence de la géométrie de l'électrode active et de l'électrode de terre passive	86
4.4 Influence de la nature des électrodes.....	89
4.4.1 Diagrammes de Weibull.....	89
4.5 Influence de l'état de l'huile	93
5. Conclusion	96
Conclusion générale.....	97
Annexe	99
Références bibliographique.....	100

Liste des figures

Fig. 1.1 : Principe de fonctionnement du transformateur	17
Fig. 1.2 : Coupe d'un transformateur de puissance	17
Fig. 1.3: Transformateur à colonnes	19
Fig. 1.4 : Transformateur type cuirassé	20
Fig. 2.1 : Processus de raffinage pour les huiles brutes	24
Fig. 2.2 : Dispositif de mesure Spintermètre	25
Fig.3.1:tension de choc normalisée	33
Fig. 4.1: Amorçage franc entre spires	44
Fig. 4.2: Effort électrodynamique franc	45
Fig. 4.3: Point chaud sur connexion boulonnée	46
Fig. 4.4: Echauffement excessif d'un enroulement	46
Fig. 4.5: Schéma d'une boucle de courant de défaut avec le circuit magnétique (CM)	47
Fig. 4.6: Problème de transport	48
Fig. 4.7 : Joint de traversée écrasé	48
Fig. 4.8: Schéma d'un relais Buchholz	49
Fig. 4.9 : Différents événement de l'arbre analyste.	51
Fig. 4.10 Schéma du réseau de distribution de la région d'Ighil Ouazzoug	52
Fig. 5.1 Schéma de dispositif des essais de claquage sous tension alternative sinusoïdale	63
Fig. 5.2 Cellule utilisée pour les mesures.	64
Fig.5.3 Différents natures, géométries et dimensions des différentes électrodes utilisée	64
Fig. 5.4 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe $V_1=0.87kV/s$	65

Fig. 5.5 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe $V_2=1.35\text{kV/s}$	66
Fig. 5.6 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe $V_3=1.73\text{kV/s}$	66
Fig. 5.7 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe $V_4=2.19\text{kV/s}$	67
Fig. 5.8 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe $V_5=2.7\text{kV/s}$	67
Fig. 5.9 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe $V_6=3.27\text{kV/s}$	68
Fig. 5.10 influence de la vitesse de tension de la rampe	69
Fig. 5.11 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour la distance $d=0.25\text{ cm}$	70
Fig. 5.12 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour la distance $d=0.5\text{ cm}$	71
Fig. 5.13 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour la distance $d=0.75\text{ cm}$	71
Fig. 5.14 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour la distance $d=1\text{ cm}$	72
Fig. 5.15 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour la distance $d=1.25\text{ cm}$	72
Fig. 5.16 influence la distance interélectrode	73
Fig. 5.17 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d l'électrode plan-plan	74
Fig. 5.18 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d l'électrode sphère- sphère	75
Fig. 5.19 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d l'électrode pointe- pointe	75
Fig. 5.20 Diagrammes de Weibull à deux paramètres pour différente configuration des électrodes	76

Fig. 5.21 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d l'électrode sphère-sphère	77
Fig. 5.22 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode sphère-plan	78
Fig. 5.23 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode sphère-pointe	78
Fig. 5.24 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode active sphérique.	79
Fig. 5.25 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d l'électrode pointe-pointe	80
Fig. 5.26 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d l'électrode pointe-plan	81
Fig. 5.27 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d l'électrode pointe-sphère	81
Fig. 5.28 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode active (pointe)	82
Fig. 5.29 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d l'électrode plan-plan	83
Fig. 5 30 Diagrammes de Weibull à deux paramètres pour une configuration d l'électrode plan-sphère	84
Fig. 5.31 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d l'électrode plan-pointe	84
Fig. 5 .33 Diagrammes de Weibull à deux paramètres pour	

les deux électrodes (pointe, sphère)	85
Fig. 5.32 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode active (plan)	87
Fig. 5.34 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour les deux électrodes (pointe, plan)	88
Fig. 5.35 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour les deux électrodes (sphère, plan)	89
Fig. 5.36 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour des électrodes en Aluminium	90
Fig. 5.37 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour des électrodes en Bronze	90
Fig. 5.38 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour des électrodes en acier	91
Fig. 5.39 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour des électrodes en Cuivre	91
Fig. 5.40 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour des électrodes en Inox	92
Fig. 5.41 Diagrammes de Weibull à deux paramètres pour les différentes natures des électrodes	93
Fig. 5.42 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour l'huile vieillie	94
Fig. 5.43 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour les deux huiles	95

Liste des tableaux

Tab. 4.1 Pourcentages des défauts dans un transformateur de puissance	54
Tab. 5.1 Résultats des paramètres de Weibull en fonction de la vitesse de montée de la rampe de tension et le teste d'adéquation Kolmogorov-Smirnov	69
Tab. 5.2 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour différentes distances	73
Tab. 5.3 Résultats des paramètres de Weibull et de test d'adéquation pour une configuration d'électrodes similaires	76
Tab. 5.4 Résultats des paramètres de Weibull et de test d'adéquation pour une configuration d'électrodes active (sphère)	79
Tab. 5.5 Résultats des paramètres de Weibull et de test d'adéquation pour une configuration d'électrodes active (pointe)	82
Tab. 5.6 Résultats des paramètres de Weibull et de test d'adéquation pour une configuration d'électrodes active (plan)	85
Tab. 5.7 Résultats du traitement statistique pour différentes configurations de l'électrode de terre	86
Tab. 5.8 Résultats des paramètres de Weibull et de test d'adéquation pour les différentes natures des électrodes	92
Tab. 5.9 Résultats du traitement statistique pour les mesures de tensions de claquage pour l'huile vieilli	95

Glossaire

CEI : Commission électrotechnique internationale.

AC : Alternatif courant (courant alternatif)

DC : Direct courant (courant continu)

I_1 : Courant au primaire du transformateur.

V_1 : Tension au primaire du transformateur

E_1 : Tension à vide idéales au primaire du transformateur

I_2 : Courant au secondaire du transformateur

V_2 : Tension au secondaire du transformateur

E_2 : Tension à vide idéale au secondaire du transformateur

MVA : Méga volts ampère

V : Volts

kVA : Kilo volts ampère

ESL: Electronic Sports League

DGA : Analyse des Gaz Dissous dans l'huile minérale

$\text{tg}\sigma$: Facteur de pertes

ξ : Permittivité

ρ : Résistivité

E_C : Rigidité diélectrique

μm : Micron mètre

PSP : Papiers presspahn

g : Gramme

cm^3 : Centimètre cube

m^2 : Mètre carrée

mm : Millimètre

Hz : Hertz

HT : Haute tension

kV : kilo volts

mV: Méga volts

kG: Kilo gramme

P : Probabilités

E_{max} : Valeur maximale du champ

eV : Electron volts

G_c : Champ critique

s : Secondes

NF : Normes Françaises

CM : Circuit magnétique

I_{max} : Courant maximum

TI : Transformateur du courant

RS : Relais statique

η : Paramètre d'echelle de la loi de Weibull.

γ : Paramètre de position de la loi de Weibull.

β : Paramètre de forme de la loi de Weibull.

λ : Taux de défaillance.

Ω : Unité de la résistance électrique (Ohm)

Ln : Logarithme népérienne

$E(x)$: Médiane

$V(x)$: Variance

$k\Omega$: Kilo Ohm

MU11 : Voltmètre de crête

V_{moy} : Vitesse moyenne

Test K-S : Teste d'adéquation de Kolmogorov - Smirnov

BT : Base tension

MT : Moyenne tension

n_i : Nombre d'individus (d'observations) de la $i^{\text{ième}}$ classe

n : Nombre d'individus total de l'échantillon.

np_i : Nombre d'individus attend théoriquement dans la classe i

p_i : Probabilité de se trouver dans la classe i

G_s : Champ de seuil

Introduction générale

Un transformateur de puissance est un composant électrique haute-tension essentiel dans l'exploitation des réseaux électriques. C'est un convertisseur dont la rentabilité dépend fortement de l'énergie électrique fournie. On les retrouve dans différents types d'applications : dans les réseaux de transmission électrique, dans la distribution électrique, dans les usines en amont de fours électriques notamment et dans les trains. Et chacun répondant à des contraintes et des usages très différents.

La fabrication de transformateurs de puissance haute tension ou moyenne tension nécessite des quantités importantes de papier et d'huile isolante. Ces quantités sont proportionnelles à la puissance assignée d'un transformateur et à sa tension de service. A titre indicatif, un transformateur de distribution 30 kV/400V a besoin en moyenne de 350 kg d'huile minérale et de 5 kg de papier isolant par phase. Le bon fonctionnement des transformateurs de puissance, repose en grande partie sur leur isolation électrique et sur le contrôle de leur température. Les transformateurs contiennent deux types de matériaux isolants majoritaires : de l'huile minérale, liquide diélectrique qui permet l'évacuation de la chaleur et l'isolement et des matériaux ligno-cellulosiques.

Nous exploitons les informations recueillies sur les postes de distribution d'énergie électrique MT 30kV/400V de la ville de Bejaia, au niveau de la société Sonalgaz, et on utilisant la méthode de l'arbre de défaillance pour diagnostiquer et mettre au claire la défaillance d'un système de distribution d'énergie électrique, deux arbres seront élaborés dans ce présent mémoire, la premier sur un réseau électrique de distribution de la région d'Ighil Ouazzoug - Bejaia, et la deuxième sur un transformateur de puissance du poste de la même région. Ces deux arbres nous ont montré que les majorités des pannes sont dues à l'isolation ou au refroidissement dans le transformateur. D'ailleurs, durant une défaillance ou un défaut, les intégrités mécanique, diélectrique et thermique du transformateur sont souvent affectées, et diminuent à des valeurs inférieures, par rapport à celles de leurs tenues normales. Les défauts latents peuvent évoluer dans le temps et provoquer une perforation d'isolement par de différentes causes telles que les courants de défaut (courant de court – circuit, courant d'enclenchement, ...) et les surtensions électriques (transitoire, manœuvre, ou de foudre). L'évaluation de l'état du transformateur est souvent réalisée à travers les diagnostics effectués. Le vecteur principal de l'évaluation de la condition du transformateur est généralement apportée par l'analyse de son huile où la majorité des informations recueillies sont données et exploitées pour des actions de maintenance. La décomposition de l'huile

selon les différents défauts et leurs intensités conduit à la formation des gaz qui peuvent être exploités pour le diagnostic.

Pour ces raisons, la suite de notre étude sera consacrée à la rupture diélectrique de l'huile isolante utilisée dans les transformateurs de puissance. Néanmoins, la rupture diélectrique est un phénomène aléatoire; pour des échantillons placés dans des conditions expérimentales identiques, on n'obtient pas une valeur unique du champ de rupture, mais une distribution de valeur. 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. Une base théorique sur les statistiques de la rupture diélectrique a été rapportée dans la littérature. Le modèle le plus adapté est celui de Weibull.

L'objectif principal de ce mémoire est de mettre en évidence le rôle important que joue l'huile isolante dans un transformateur de puissance. Le travail que nous présentons s'insère dans le cadre de l'évaluation de la tenue diélectrique du l'huile Borak22 sous tension alternative pour plusieurs situations. Plusieurs points seront abordés à savoir l'influence; de la rampe de tension, de la géométrie, de la configuration, de la nature des électrodes, de la distance interélectrodes ainsi que l'état neuf ou vieilli de l'huile, sur la tension de claquage dans l'huile isolante Borak22.

Ce travail comprend une introduction, cinq chapitres et une conclusion, il est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre, sera consacré au transformateur électrique de puissance, tels que sa description, son principe de fonctionnement, les éléments qui le constituent et les différents types de transformateurs de puissance

Le deuxième chapitre traitera les caractéristiques des isolants pour transformateurs de puissance, on présentera les huiles minérales, le papier presspahn ainsi que le papier imprégné

L'étude des phénomènes et des mécanismes prédisruptifs rencontrés dans les isolants utilisés dans les transformateurs de puissance seront abordés dans le troisième chapitre.

Par contre dans le quatrième chapitre, on donnera une revue élargie sur la maintenance et le traitement statistique.

Le dispositif expérimental utilisé et les résultats des mesures expérimentales obtenus, puis leurs traitements statistiques ainsi que leurs interprétations feront l'objet du cinquième chapitre.

Enfin nos; conclusions, recommandations et les différents horizons et perspectives sur ce sujet seront proposés pour les futurs travaux.

Chapitre 1 : Généralités sur les transformateurs électriques de puissance

1. Introduction

Le transformateur joue un rôle important dans le transport et la distribution de l'énergie électrique. Il permet à l'énergie électrique d'être transportée sur de longues distances, il permet ensuite sa distribution pour les industries et les habitations.

Ce premier chapitre introduit tout d'abord le contexte dans lequel s'inscrivent les transformateurs de puissance. Leurs principes de fonctionnement, leurs différents types et leurs principaux éléments, seront présentés.

2. Transformateurs de puissance

2.1 Description

Un transformateur de puissance est un appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et de courant de valeurs généralement différentes à la même fréquence dans le but de transmettre de la puissance électrique » norme (IEC 60076-1, 2000). « Les transformateurs sont réversibles et permettent, soit l'élévation, soit l'abaissement de la tension ; d'où la possibilité de choisir la meilleure tension pour la production, le transport, la distribution, l'utilisation de l'énergie électrique, et de passer facilement de l'une à l'autre. » Un transformateur électrique permet donc de faire transiter la puissance électrique en courant alternatif (AC) depuis la centrale de production d'électricité jusqu'à son utilisateur final avec un minimum de pertes, à différents niveaux de tensions. Le transformateur est l'élément du réseau qui permet le passage d'une tension alternative donnée à une autre : c'est un convertisseur AC/AC à fréquence fixe, celle du réseau [1]

2.2 Principe de fonctionnement

L'enroulement primaire est soumis à une tension sinusoïdale. Il est donc traversé par un courant sinusoïdal et donne naissance à travers le circuit magnétique à un flux sinusoïdal. Ce flux engendre alors une force électromotrice induite dans l'enroulement primaire et dans l'enroulement secondaire. Au niveau des bornes du secondaire, apparaît alors une tension sinusoïdale dont la fréquence est la même que celle de la tension appliquée au primaire, mais dont l'amplitude est différente.

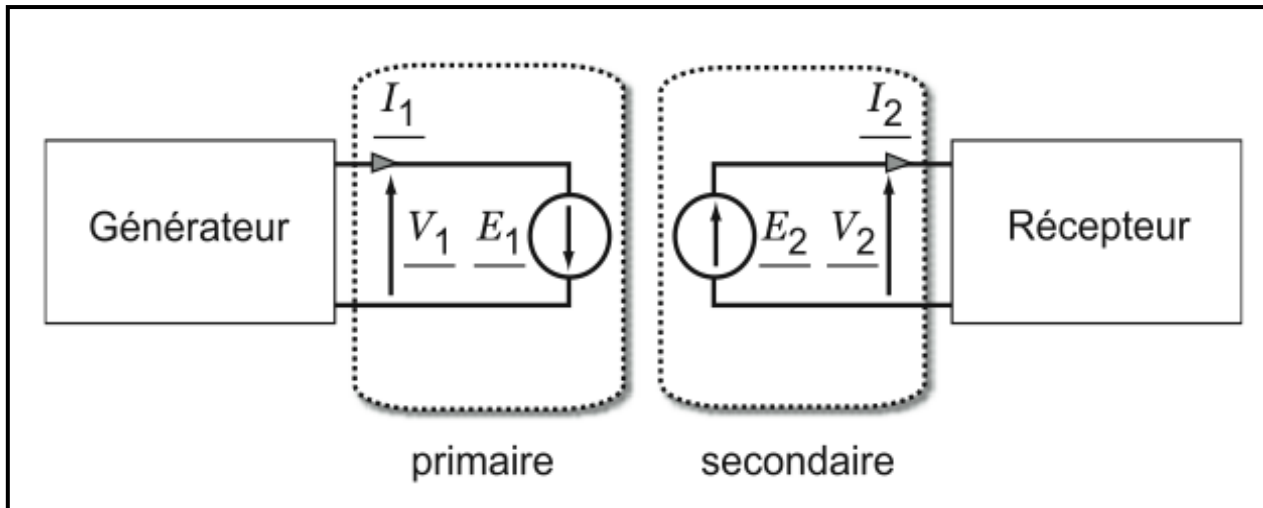


Fig. 1.1 : Principe de fonctionnement du transformateur

Le comportement du transformateur peut alors être appréhendé par le schéma reporté sur la (Figure 1.1) [1].

2.3 Constitution

La majorité des transformateurs de puissance sont de construction triphasée, et ses principaux organes sont représentés sur la (figure 1.2):

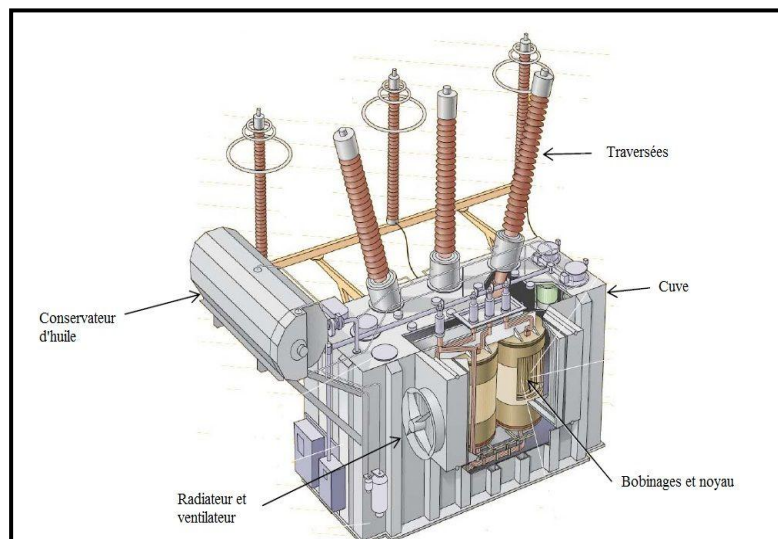


Fig. 1.2 : Coupe d'un transformateur de puissance

Dans cette figure sont représentés les éléments suivants [2, 3, 4] :

- ✓ Les bornes de traversées basses et hautes tensions qui peuvent être isolées respectivement par de la porcelaine et du papier imprégné d'huile ou de résine époxy. Elles permettent le transit de la puissance. Certaines sont immergées, notamment pour les très hautes tensions, d'autres sont sèches.

- ✓ La cuve constituée de tôles d'acier. Les parois de la cuve sont, selon les modèles, radiantes à ailettes ou rigides équipées de radiateurs amovibles connectés par une vanne d'arrêt. La structure et les soudures d'assemblage peuvent être renforcées dans le cas où une bonne tenue au vide est nécessaire.
- ✓ Le noyau magnétique constitué de tôles d'acier au silicium à grains orientés. L'empilage et l'assemblage des tôles doivent être réalisés de manière à ce que le transformateur ait les meilleures performances possible du point de vue électrodynamique, électrique et acoustique ;
- ✓ Les enroulements (feuillard ou rond, ou méplat de cuivre ou d'aluminium) sont montés sur le noyau. Les formes de bobinages, les sections et les nombres de spires sont conditionnés par les contraintes à maîtriser en termes électriques, thermiques et mécaniques. Chaque bobine est munie de canaux de refroidissement permettant d'assurer la circulation d'huile et les échanges thermiques ;
- ✓ Le conservateur d'huile (réservoir métallique (acier en général) est situé sur le dessus du transformateur. Il joue un rôle de vase d'expansion pour l'huile. Les variations de température de l'huile impliquent des variations du volume. Le conservateur permet au niveau d'huile de varier sans affecter la pression dans le transformateur, ni découvrir (mettre à nu) les parties actives. Dans certains cas, une poche souple est présente dans le conservateur ; elle permet d'éviter à l'huile d'entrer en contact avec l'air ambiant. Certains transformateurs sont munis d'assécheur permettant de limiter la teneur en eau de l'air pénétrant dans le conservateur.
- ✓ Les changeurs de prise en charge ou hors charge.
- ✓ Le fluide diélectrique (huiles minérales, synthétiques ou végétales).
- ✓ Les isolants solides (papiers à base de celluloses, rubans, vernis, résines époxydes, cartons, bois...).

2.4 Rôle et domaine d'application

Les transformateurs triphasés sont présents à différents endroits dans les réseaux électriques pour adapter les valeurs efficaces des tensions aux niveaux souhaitables. De façon simplifiée, l'énergie électrique est produite dans les centrales sous des tensions moyennes. Le transport à longue distance exige des hautes tensions afin de limiter les pertes par effet Joule et réduire le dimensionnement des conducteurs.

L'utilisation demande des tensions basses ou moyennes. Alors, des transformateurs élévateurs sont nécessaires au départ, et des transformateurs abaisseurs sont indispensables à l'arrivée côté consommateurs. [5]

2.5 Différents types de transformateurs

Il existe différents types de transformateur, nous nous intéressons ici, à l'étude des transformateurs de puissances des réseaux électriques triphasés. Ces transformateurs présentent le plus grand intérêt dans le développement de l'interconnexion des réseaux.

Pour différencier entre transformateurs, on distingue plusieurs types de classifications à savoirs :

2.5.1 Classification selon le type de construction

Du point de vue construction deux principales technologies sont distinguées, à savoir les transformateurs à colonnes et les transformateurs cuirassés [5].

2.5.1.1 Transformateur à colonnes

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses généralement de sections circulaires afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique. Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique (Figure 1.3) [5].

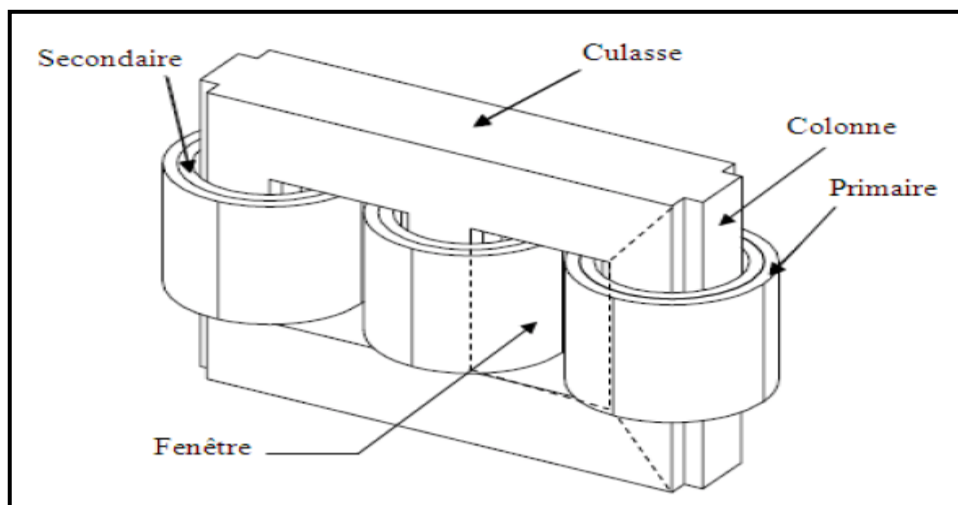


Fig. 1.3: Transformateur à colonnes

2.5.1.1 Transformateur cuirassé :

Dans cette technologie, le circuit magnétique entoure les enroulements formés de bobines rectangulaires à axe horizontal, de section rectangulaire est constitué de tôles posées à plat. La cuve assure le calage du circuit magnétique et d'enroulements .comme la montre la (figure I.4)

Ces transformateurs sont utilisés au sein des réseaux de transport et de répartitions ou les surtensions transitoires sont fréquentes. Dans cet environnement, ils doivent se prémunir des effets néfastes de ces surtensions sur les enroulements. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages. [5]

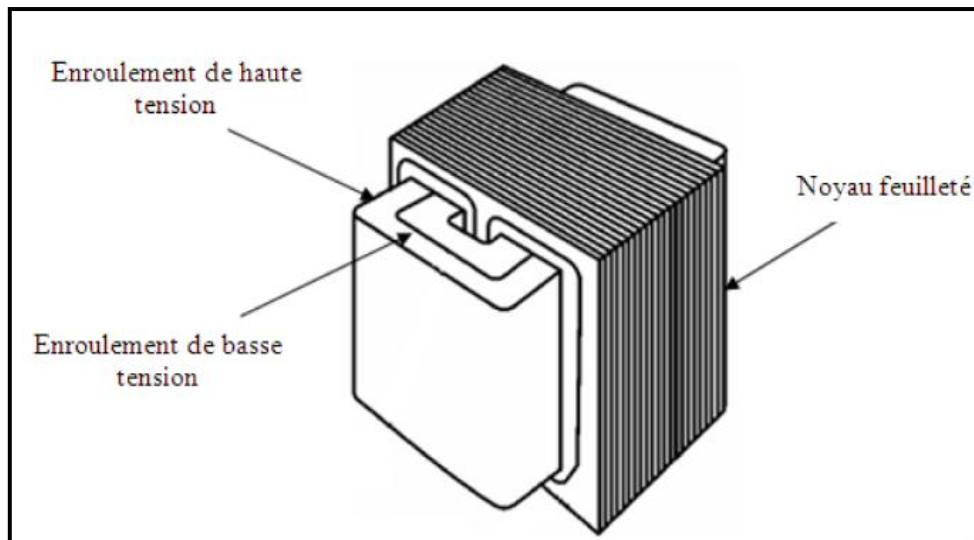


Fig. 1.4 : Transformateur type cuirassé

2.5.2 Classification selon le domaine d'application

Du point de vue de leurs applications, les transformateurs ordinaires de phase (monophasé, biphasé, et triphasé), groupés dans trois ou cinq colonnes se classent en trois catégories :

- Les transformateurs pour les grands réseaux et les grandes centrales, leur puissance varie de 100 à 400 MVA.
- Les transformateurs pour réseaux de répartition qui alimentent les lignes à moyenne tension, leur puissance varie de 5 à 30 MVA.

Les transformateurs de distribution, destinés à l'alimentation des utilisateurs de l'énergie électrique en basse tension (380 ou 220V), leur puissance varie de 5 à 1000 KVA. [5]

2.5.3 Classification selon le type de refroidissement

Selon le type de refroidissement, on distingue : les transformateurs à l'huile et les transformateurs secs. [5]

2.5.3.1 Transformateur à l'huile

Pour prévenir l'action néfaste de l'air sur l'isolation des bobines et améliorer le refroidissement du transformateur, on place le noyau magnétique avec les enroulements dans une cuve remplie d'huile minérale. Malgré ces propriétés avantageuses, l'huile de transformateurs a deux défauts principaux: elle est inflammable et sa vapeur forme avec l'air dans certaines conditions un mélange explosif. En plus de son rôle de réservoir au liquide diélectrique, la cuve assure le maintien mécanique du circuit magnétique et des enroulements. La construction de la cuve généralement de forme ovale est liée au calcul thermique du transformateur. Le refroidissement du transformateur est d'autant plus difficile à réaliser que la puissance du transformateur est grande. La cuve est tapissée de shunts magnétiques, dont on distingue deux types :

- ✓ Les shunts magnétiques formés d'un empilement de tôles magnétiques semblable au noyau et qui canalise le flux de fuite.
- ✓ Les shunts amagnétiques plus économiques, constitués de plaque de cuivre ou aluminium ayant pour rôle de repousser le flux de fuite. [5]

2.5.3.2 Transformateurs secs

Les transformateurs immergés dans l'huile liquide à base minérale ou de silicone sont plus répandus pour les plus fortes puissances et les niveaux de tension élevés, mais présentent des risques de fuite, d'incendie et la pollution de l'environnement. Cela a permis de laisser la place aux transformateurs avec technologie sèche, avec des enroulements enrobés (imprégnés). Le système d'isolation électrique est remplacé par une résine (époxyde) et l'air. Des résines ont été développées pour résister aux tensions électriques et aux contraintes mécaniques, thermiques qui apparaissent dans un transformateur en service. L'aspect favorable est son comportement non inflammable et léger. Ce genre de transformateur est le plus approprié pour la distribution de l'électricité en degré élevé de sûreté [Esl-2010]. [5]

3. Conclusion

Les transformateurs de puissance sont des appareils complexes, qui doivent tenir de nombreuses et fortes contraintes, de natures diverses, durant leur cycle de vie. De plus, dans le contexte actuel, les transformateurs seront soumis à des contraintes de plus en plus importantes, pendant encore plusieurs années à priori. Bien que leur fiabilité soit plutôt bonne, les transformateurs restent des éléments critiques de tout réseau électrique. Il est donc très important d'être capable de choisir les isolants les plus performants, afin d'optimiser l'exploitation du matériel

lui-même, et surtout de garantir la transmission importante d'énergie électrique qui transite par lui-même.

Chapitre 2 : Caractéristiques des isolants pour transformateurs de puissance

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons principalement à l'isolation huile, papier et l'isolation mixte papier / huile utilisée dans les transformateurs de puissance.

Nous présentons les différents types d'huiles isolantes, leurs propriétés et leurs rôles dans les matériels électriques, ainsi que les isolants solides auxquels elles sont associées pour assurer le bon fonctionnement des appareillages en particulier celui des transformateurs de puissance.

2. Isolants électriques pour transformateurs

Le bon fonctionnement des transformateurs de haute tension repose en grande partie sur leur isolation électrique et sur le contrôle de leur température [2].

Les transformateurs contiennent deux types de matériaux isolants majoritaires : de l'huile minérale, liquide diélectrique qui permet l'évacuation de la chaleur et des matériaux ligno-cellulosiques.

Parmi ces derniers figurent les papiers de guipage qui entourent les fils de cuivre des bobinages et des écrans en carton permettant le support mécanique des bobinages et l'isolation électrique entre les différentes phases du transformateur. Les cartons présents dans les transformateurs de puissance ont plusieurs fonctions.

2.1 Caractéristiques des huiles minérales

2.1.1 Généralités

L'huile minérale est le liquide isolant le plus utilisé dans l'équipement électrique pour ses bonnes propriétés diélectriques et de transfert de chaleur, sa bonne compatibilité avec les isolants cellulosiques et son faible coût (ces derniers peuvent contenir entre 40 000 et 80 000 litres d'huile. C'est principalement pour cette raison technicoéconomique que cette huile est aussi la plus communément utilisée dans les transformateurs de puissance. Les caractéristiques principales requises pour l'huile minérale sont:

- Une faible viscosité et un bon point d'écoulement pour assurer sa circulation.
- Un point éclair élevé.
- Une bonne stabilité chimique vis-à-vis des phénomènes d'oxydation et de décomposition.
- Une rigidité diélectrique élevée. [2, 7]

2.1.2 Choix de l'huile

L'huile minérale est obtenue à partir du raffinage du pétrole brut. Selon l'origine du pétrole et du processus de raffinage, on peut identifier différents types d'huiles (figure 2.1).

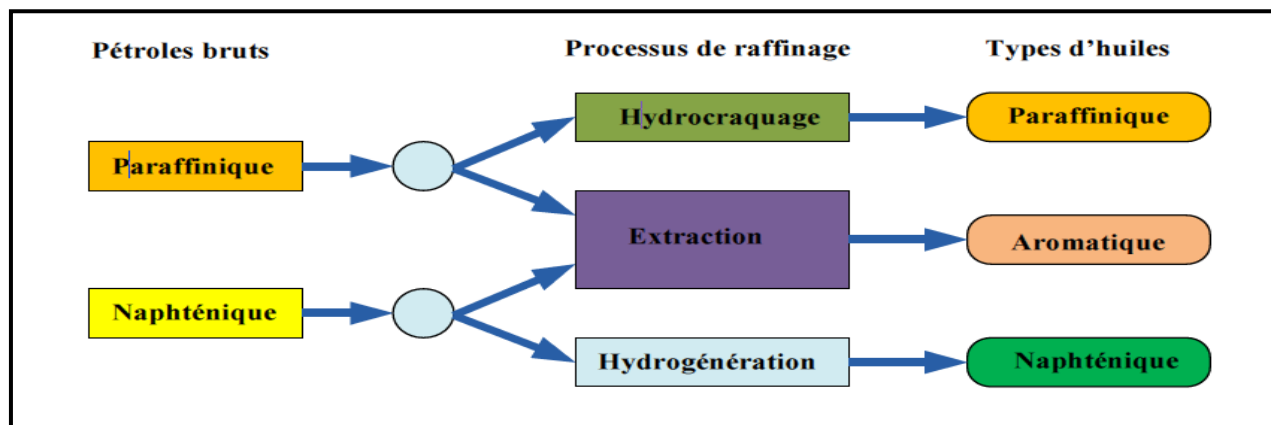


Fig. 2.1 : Processus de raffinage pour les huiles brutes [2].

2.1.3 Rôle des huiles isolantes

Le rôle principal des huiles est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer ses propriétés [6]. Elles jouent aussi le rôle de refroidissement en captant la chaleur dissipée par les éléments actifs pour la restituer à une source froide. L'huile isolante minérale joue aussi le rôle d'isolant entre les différentes parties des transformateurs :

- ✓ Isolation entre conducteurs sous tension.
- ✓ Isolation entre enroulements basse et haute tension.
- ✓ Isolation entre enroulement et cuve (terre).

2.1.4 Analyses d'huile et diagnostic de transformateur

On trouve diverses techniques d'analyse d'huile qui sont ; très fiables et à moindre coût. Et qui permet de diagnostiquer l'état interne d'un transformateur et de détecter d'éventuels défauts.

La norme CIE 604-22 propose des recommandations pour la maintenance et la surveillance des huiles minérales dans les matériels électriques, incluant les transformateurs. [1,8]

2.1.4.1 Analyse des gaz dissous dans l'huile

La méthode d'Analyse des Gaz dissous dans l'huile minérale (DGA en anglais) est un outil très puissant et reconnu pour détecter des défauts internes au transformateur. Basé sur la mesure de concentrations des Gaz ; en particulier, des gaz suivants : hydrogène (H_2), méthane (CH_4), éthane (C_2H_6), éthylène (C_2H_4), acétylène (C_2H_2). Ceux-ci, issus de la dégradation de l'huile, sont caractéristiques de certains défauts.

2.1.4.2 Tension de claquage en courant alternatif

La tension de claquage en courant alternatif est une mesure importante de la capacité de l'huile à supporter une contrainte électrique. La mesure de cette caractéristique se fait à l'aide d'un spintermètre à électrodes sphériques, voir (figure.2.2). Cette tension est fortement influencée par la présence d'humidité ou autres impuretés se présentant sous forme de corps étrangers. Cette tension de claquage doit nécessairement être vérifiée lors du remplissage de la cuve. Par la suite il sera procédé à des vérifications périodiques pour se rendre compte de l'évolution de ce paramètre. [9, 10].



a. Vue de dessus



b. Vue de face

Fig. 2.2 Dispositif de mesure Spintermètre

2.1.4.3 Teneur en eau

- Les propriétés diélectriques de l'huile sont fortement affectées par son humidité. L'eau peut se trouver sous deux formes:

- ✓ L'eau libre, en solution sous forme de vapeur d'eau, jusqu'à la concentration de saturation, concentration au-delà de laquelle se forment des gouttelettes. La concentration en eau libre est déterminée par la température et la tension de vapeur du gaz en équilibre avec l'huile.
- ✓ L'eau liée est fixée à certaines molécules du liquide par des liaisons chimiques faibles. La quantité d'eau liée est proportionnelle à la quantité d'impuretés contenues dans l'huile. La solubilité de l'eau dans l'huile, exprimée en ppm ou mg/kg, dépend de l'état de l'huile, de la température et du type d'huile. L'absorption d'eau par l'huile isolante dépend en partie de la quantité de molécules polaires [7, 11, 12].

2.1.4.4 Facteur de pertes diélectriques et résistivité

Le facteur de dissipation ou facteur de pertes ($\text{tg}\sigma$), qui est une valeur adimensionnelle, est directement lié à la résistivité et la permittivité en tension alternative.

2.1.5 Propriétés des huiles pour transformateurs

2.1.5.1 Propriétés électriques

La permittivité (ξ), la résistivité (ρ), le facteur de perte ($\text{tg}\sigma$) et la rigidité diélectrique (E_C) sont les caractéristiques électriques principales. Outre la structure du liquide et le conditionnement, ces propriétés dépendent de la tension appliquée, de la fréquence et de la température. Dans l'industrie, ces mesures sont souvent rapportées à la température moyenne de fonctionnement d'un transformateur, soit 90°C [7]

Ces propriétés électriques dépendent de leur formulation (composition, constitution moléculaire, ...etc.) et de leurs conditions d'utilisation. Il faut donc comprendre l'élimination de tout ce qui ne constitue pas le liquide lui-même comme: résidus de synthèse, particules, gaz ou molécules d'eau. Ces impuretés peuvent être plus ou moins éliminées par des opérations de traitement qui comprennent des phases de déshydratation et de dégazage sous vide et en température, ainsi que des opérations de filtration de l'ordre du μm

2.1.5.2 Propriétés chimiques

Les propriétés chimiques de l'huile qui peuvent intéresser l'ingénieur en charge de l'exploitation d'un transformateur sont [10]:

- sa stabilité vis-à-vis de l'oxydation.

- Sa teneur en inhibiteur d'oxydation.
- Sa teneur en soufre corrosif.
- Sa teneur en eau.

2.1.5.3 Propriétés physiques

Concernant les propriétés physiques de l'huile, celles qui intéressent le plus l'exploitant de transformateurs sont données ci-après. [10]:

- la viscosité.
- L'aspect.
- La densité.
- Le point d'écoulement.
- La tension inter faciale.
- le point d'éclair

2.2 Caractéristiques des papiers dits PSP (presspahn)

Le papier presspahn est utilisé comme isolation entre les spires et entre couches de transformateurs. Étant donné l'étendue importante du domaine d'application du papier, il existe un grand nombre de qualités à usage électrique, obtenues par divers processus de fabrication, et dont les propriétés sont choisies pour répondre aux contraintes imposées par la tenue en service de l'isolation à laquelle elle est destinée.

2.2.1 Propriétés physiques

Les propriétés physiques du papier sont sensiblement influencées par sa teneur en eau qui dépend elle-même de l'humidité de l'atmosphère ambiante [13, 14].

2.2.1.1 Épaisseur

L'épaisseur peut varier d'un papier à un autre selon l'application à laquelle il est destiné. Les papiers utilisés dans les condensateurs ont les plus faibles épaisseurs, comprises entre 5 et 25 μm environ. Les papiers de guipage des conducteurs, trouvés dans des enroulements de transformateurs, par exemple, sont encore assez fins ne dépassant pas 75 μm . Par contre, les papiers de câbles ou les papiers entre couches des transformateurs sont plus épais [13, 15]. Une meilleure tenue diélectrique est obtenue, en effet, en superposant plusieurs couches d'un papier très fin plutôt qu'en utilisant une seule couche d'un papier plus épais [13, 15, 16].

2.2.1.2 Masse volumique et perméabilité à l'air

Le papier se présente sous forme d'une association de cellulose et d'air, et sa masse volumique varie d'une qualité de papier à une autre selon son procédé de fabrication. La masse volumique de la cellulose proprement dite est de $1,4 \text{ g/cm}^3$, celle d'un papier de condensateur est comprise entre $1,1$ et $1,3 \text{ g/cm}^3$. Les papiers de transformateurs et de câbles ont des masses volumiques plus faibles, de $0,7$ à $1,0 \text{ g/cm}^3$ [13, 15]. La masse volumique, de même que la perméabilité à l'air sont des caractéristiques particulièrement importantes à considérer dans la mesure où le papier, une fois imprégné, doit supporter une tension élevée et assurer une bonne tenue, spécialement, aux ondes de choc.

2.2.1.3 Hygroscopicité du papier

La teneur en eau du papier dépend de la température et de la pression partielle de vapeur d'eau. Les caractéristiques dimensionnelles d'un papier varient avec sa teneur en eau. De même que la résistance à la traction croît avec l'augmentation de sa teneur en eau, par contre sa tension de claquage diminue considérablement [13, 16].

Une teneur élevée en eau du papier est enfin incompatible avec de bonnes propriétés électriques et, de plus, l'eau est un agent d'accélération du vieillissement du papier. On peut pallier l'hygroscopicité élevée du papier en modifiant chimiquement la chaîne de cellulose [13, 15].

2.2.2 Propriétés mécaniques

Les principales caractéristiques à prendre en compte lors de la mise en œuvre du papier sont la résistance à la traction et au déchirement, ainsi que la résistance au pliage, et pour certains usages spéciaux, une résistance à l'éclatement [13, 15].

2.2.2.1 Résistance à la traction

On caractérise généralement cette propriété par la longueur à la rupture qui est la longueur que devrait avoir une bande de papier de largeur uniforme, pour que, suspendue par l'une de ses extrémités, elle se rompe sous son propre poids. Résistance au déchirement

Elle est définie comme la force moyenne exercée pour poursuivre le déchirement amorcé par une entaille initiale, dans une éprouvette constituée généralement d'une liasse de feuilles de papier.

2.2.2.2 Résistance au pliage

Cette résistance est mesurée au moyen d'un dispositif normalisé, elle représente le nombre de doubles plis que peut supporter une bande de papier, sous tension mécanique constante, avant de se rompre.

2.2.2.3 Résistance à l'éclatement

Elle est évaluée par son indice qui est égal au quotient de la pression hydraulique, exprimée en millibars, exercée sur une éprouvette de papier par l'intermédiaire d'une membrane en caoutchouc, dans des conditions normalisées, à l'instant de l'éclatement, par la masse du papier en g/m^2 .

2.2.3 Propriétés diélectriques

2.2.3.1 Permittivité relative et facteur de dissipation diélectrique

Le papier non imprégné peut être considéré, par sa constitution, comme l'association en série de deux condensateurs dont les diélectriques sont respectivement la cellulose et l'air et cela sous l'effet de faibles contraintes électriques. La présence des groupements hydroxyle dans la cellulose provoque l'apparition d'une bande d'absorption diélectrique, localisée à basse température, mais ayant une influence encore sensible sur les pertes diélectriques du papier à la température ambiante [13, 15].

L'association en série cellulose-air doit être responsable également, vers les températures plus élevées et aux basses fréquences, d'un phénomène de dispersion du type Maxwell - Wagner.

La conductivité de la cellulose étant susceptible de provoquer une accumulation de charges aux interfaces cellulose- air. Les impuretés ioniques existantes dans un papier provenant du bois lui-même ou absorbées pendant la fabrication de ce dernier provoqueront une augmentation des pertes vers les plus hautes températures. Outre les impuretés ioniques, un autre facteur d'augmentation des pertes diélectriques et de la permittivité relative du papier, vers les températures élevées, est la présence d'humidité [13, 15].

2.2.3.1 Rigidité diélectrique

Les papiers font, à l'état non imprégné, l'objet d'un certain nombre de contrôles ayant pour but d'en détecter les points faibles, en particulier, la présence d'inclusions conducteur, susceptible de réduire la tenue diélectrique du papier, quand il sera à l'état imprégné [13, 15].

Le papier non imprégné à une rigidité diélectrique médiocre qui est à peine supérieure à celle d'un film d'air de la même épaisseur, elle est de l'ordre de 5 kV/mm pour le papier presspahn et de 3 kV/mm environ pour l'air à 50 Hz [13, 16].

2.3 Caractéristiques du papier imprégné

2.3.1 Hygroscopicité du papier imprégné

Le papier imprégné est immergé dans l'huile s'humidifiera comme s'il était à l'air, quand le système papier-huile est exposé à une atmosphère humide. Toutefois, l'évolution de l'humidité de chacun des constituants est relativement complexe, quand il y a échange d'humidité entre : d'une part, air et l'huile et d'autre part, huile et papier [13, 15].

2.3.2 Propriétés diélectriques du papier imprégné

Les propriétés diélectriques du papier imprégné dépendent de l'imprégnant, mais aussi, dans une certaine mesure, de la qualité du papier et de sa masse volumique [13, 15].

2.3.2.1 Permittivité relative et facteur de dissipation diélectrique

Le papier imprégné peut, comme à l'état non imprégné, être considéré comme une association en série de la cellulose et de l'imprégnant. La permittivité et le facteur de dissipation diélectrique du papier imprégné varient avec sa teneur en eau.

D'autres facteurs peuvent influencer sur la permittivité et le facteur de pertes diélectriques tels que la masse volumique du papier, la pureté de l'huile ainsi que le traitement chimique de la pâte de bois lors de la fabrication. La mesure du facteur de pertes diélectriques en fonction de la température nous renseigne sur la contamination d'une isolation par des impuretés ioniques [13, 15].

2.3.2.2 Rigidité diélectrique

La présence d'un imprégnant est responsable de l'amélioration notable de la rigidité diélectrique d'un papier à l'état imprégné. Toute fois, cette propriété dépend d'un grand nombre de facteurs liés au papier lui-même tels que sa géométrie, son épaisseur et sa densité volumique, et les conditions dans lesquelles elle a été déterminée.

Sous tension continue ou sous forme d'impulsions, la rupture diélectrique du papier imprégné début pas des décharges au niveau de l'imprégnant, conduisant à la rupture totale de l'isolation dès l'apparition de la première décharge [13, 17].

Par contre, en courant alternatif, les premières décharges apparaissant généralement a une tension inférieure à la tension pour laquelle il y a rupture de l'isolation, cette dernière étant également plus faible que les valeurs correspondantes relevées en continu ou en impulsions [13, 17].

3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les principales propriétés des huiles et isolants solides utilisés dans l'appareillage électrique et plus particulièrement dans les transformateurs de puissance. Il apparaît que l'utilisation d'une huile isolante dans un transformateur de puissance ne peut être envisagée que si cette dernière remplit certains critères dont les principaux sont : une bonne tenue diélectrique, un faible facteur de pertes (ou de dissipation), un bon point d'écoulement (faible viscosité) pour assurer un bon transfert de chaleur.

Il ressort de cette analyse que les deux types d'isolation, papier et huile, sont essentiels dans la vie du transformateur. Lorsque le transformateur est en service, il est soumis à plusieurs contraintes (électriques, chimiques, mécaniques, thermiques) qui altèrent son système d'isolation.

Chapitre 3: Mécanismes disruptifs des isolants dans les transformateurs

1. Introduction

Dans ce chapitre on va donner un aperçu théorique et des concepts physiques de base concernant les diélectriques de différentes natures tels que (solides, liquide), ainsi que les phénomènes qui les accompagnent tels des phénomènes et des mécanismes pré-disruptif rencontré en présence d'un champ électrique.

2. Phénomènes dans les transformateurs de puissances

2.1 Surtensions

On désigne par surtension toute différence de potentiel anormal apparaissant dans les circuits électriques et qui est susceptible d'endommager les éléments de ces circuits (lignes, machines, etc.).

On distingue deux sortes de surtensions: [18]

- ✓ **transversales** apparaissant entre un conducteur et la terre ou entre deux conducteurs,
- ✓ **longitudinales** ou entre spires, correspondant à un accroissement exagéré de la différence de potentiel entre deux points voisins d'un même conducteur.

Elles peuvent exister simultanément ou séparément.

Les surtensions peuvent avoir trois origines, telles:

- ✓ atmosphériques,
- ✓ manœuvres sur le réseau (phénomènes transitoires),
- ✓ surtensions à la fréquence de service dues au déclenchement de charges ou aux lignes à vide.

2.2 La ferrorésonance

Ce phénomène, de nature oscillatoire, peut prendre naissance par interaction de la capacité d'un réseau avec une inductance non linéaire, en particulier celle représentée par un transformateur à vide. Il en résulte des surtensions entretenues ou non sur des réseaux à forte capacitance (câbles) qui peuvent entraîner des avaries aux transformateurs et câbles. [10]

2.3 Surintensités / Surcharges

Par leur conception et les dispositions constructives adoptées pour leur réalisation, les transformateurs doivent pouvoir résister, sans dommage, aux surintensités auxquelles ils sont soumis. Ces surintensités sont principalement dues [19,20]:

- ✓ à l'appel de courant à la mise sous tension et les surcharges ;

- ✓ aux courants de court-circuit extérieurs sur le réseau secondaire.

Les surintensités ont pour effet :

- de créer des efforts électrodynamiques entraînant des contraintes mécaniques élevées entre bobines et entre bobinage et câblages ;
- de provoquer, dans les enroulements et l'isolant liquide des contraintes thermiques par l'élévation excessive de température.

Parmi les différents défauts de surcharges, on citera [19, 20]:

- les surcharges accidentelles ou récurrentes.
- Les surcharges permanentes.
- Les surcharges de très courtes durées.

3. Essais diélectriques normalisés

3.1 Essais de tenue au choc de foudre

L'essai de choc consiste à appliquer une onde unidirectionnelle, en général de forme normalisée, à l'objet à essayer. Elle simule un coup de foudre tombant sur le réseau. La CEI définit la tension de choc normalisée suivante, figure si dessous [18]:

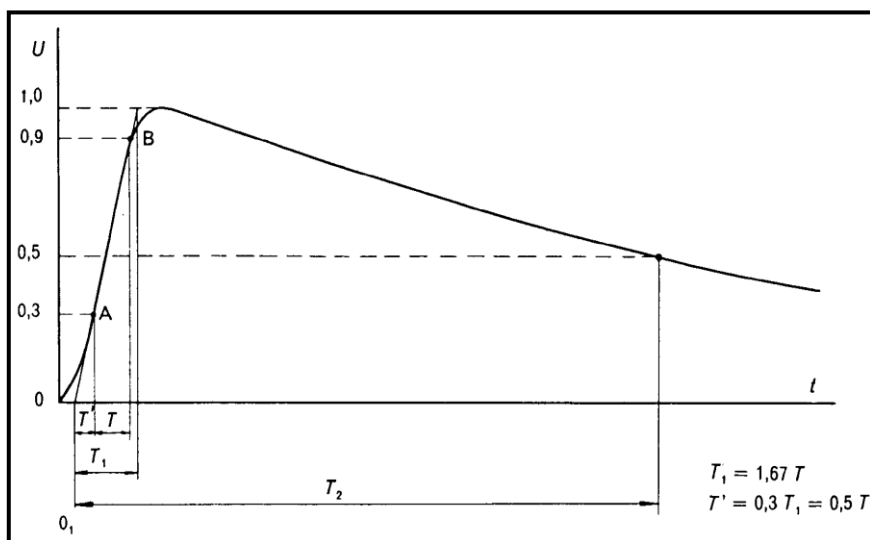


Fig. 3.1: Tension de choc normalisée [18]

3.2 Essais de tenue des enroulements basse tension et haute tension à la fréquence industrielle

En fonction de la tension primaire du transformateur, le niveau d'isolement est régi par la norme CEI 76. Dans cet essai, après connexion des enroulements HT, les autres parties sont mises à la terre. Ce qui permet de vérifier la tenue de l'huile du transformateur. Cet essai de tenue à fréquence industrielle simule les manœuvres opérées lors des mises en service. Pour un transformateur de 30kV au primaire, la tension de tenue appliquée aux enroulements est de 70kV pendant 1 min ; un temps qui apparaît très grand comparativement au temps de claquage très insignifiant compté en μs [10]

3.3 Essai de tenue entre spires par tension induite

Cet essai exigé par la norme CEI 76 est un essai sévère, car la fréquence est quatre fois la fréquence de service et l'enroulement est porté à deux fois sa tension nominale, ce qui rend les Champs électriques très grands et les isolants entre spires sont soumis à de rudes épreuves pendant 30seconds. [10]

4. Mécanismes de dégradations des isolants dans le transformateur

4.1 Phénomènes prédisruptifs dans les diélectriques solides

4.1.1 Vieillessement

Le vieillissement des isolants est le résultat d'une détérioration graduelle due à des réactions physiques et chimiques affectant la tenue mécanique et diélectrique du système d'isolation. Plus exactement, le vieillissement est défini par la dégradation irréversible des propriétés du système d'isolation électrique due à l'action d'un ou plusieurs facteurs. Il s'ensuit de cette définition que l'un des paramètres déterminants pour qualifier le vieillissement d'un transformateur est le vieillissement des matériaux. [2]

4.1.2 Décharges partielles

Les décharges partielles sont des décharges disruptives ne réalisant pas un pont complet entre électrodes principales. Cependant, ces décharges peuvent à long terme conduire au claquage diélectrique par dégradation progressive d'une partie de l'isolation. Cette dégradation se produirait par cheminement ou par perforation. Les décharges partielles créent dans le transformateur des perturbations sur les tensions relevées aux extrémités d'enroulement par transmission inductive, résistive ou capacitive. Elles créent également des perturbations ultrasoniques qui se transmettent jusqu'aux parois de cuve. Ce sont ces deux types de

manifestations extérieures électriques et acoustiques qui permettent leur mesure et leur localisation. [7, 10]

4.1.3 Mécanismes de claquage

On appelle claquage, la perte subite de la propriété isolante d'un diélectrique soumis à un champ électrique. Selon les mécanismes responsables des claquages, on peut les classer comme suit: [21, 22]

- Le claquage thermique.
- Le claquage intrinsèque.
- Le claquage électromécanique.
- Le claquage pratique.

4.1.3.1 Claquage thermique

Une explication du phénomène de claquage thermique est donnée par Coelho et Aladenize [23, 24]. 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, si ce qu'on appelle le claquage thermique. Ce type de claquage ne se produit jamais d'une manière homogène. En effet, la moindre augmentation locale de la température est autoamplifiée par l'augmentation de la conductivité correspondante. Par la suite, une telle augmentation locale de la température inévitable en pratique provoque la création et la propagation d'un canal chaud conduisant à un claquage thermique ponctuel.

Un processus d'emballement thermique aboutissant à une rupture par fusion et/ou par évaporation est essentiellement causé par un phénomène d'injection et/ou de conduction de nature électronique [23, 24].

Goffaux et Coelho [25] parlent d'interactions existantes entre les électrons mobiles, les électrons piégés dans les états de surface localisés (par exemple aux interfaces entre zones amorphes et zones cristallines), et les ions mobiles résiduels ou créés par électrodissociation, ces interactions peuvent aboutir à la formation transitoire de canaux par lesquels l'énergie cumulée dans l'échantillon et éventuellement dans la source pourrait se dissiper et amorcer un claquage thermique.

Un matériau légèrement conducteur, mais en mauvais contact thermique avec le milieu ambiant pourra être détruit par un champ relativement faible de l'ordre de 0.05MV/cm ou même

moins, mais une telle rupture d'origine thermique est un processus lent qui peut prendre des heures et même des jours si la capacité calorifique de l'ensemble est élevée [26].

Bien que d'autres phénomènes puissent intervenir (ionisation par collision, injection d'électrons par la cathode,...), l'ionisation thermique reste la cause essentielle de la présence de charges libres [27]. L'existence d'un gradient de température et un champ électrique dans l'épaisseur d'un isolant provoque une polarisation par charge d'espace [27, 28].

On distingue 2 cas: [29]

- la température augmente consécutivement à un échauffement par conduction électrique et cet effet s'accroît avec la tension : c'est la rupture thermique en régime permanent;
- la rupture apparaît par suite d'une instabilité thermique consécutive à un échauffement par conduction (qui peut être faible) non compensé par la diffusion thermique: c'est la rupture thermique en régime impulsionnel

Le claquage intervient si rapidement que le processus de conduction joue un rôle négligeable. Si des polymères sont utilisés à haute température, leurs pertes diélectriques peuvent augmenter fortement et induire des claquages thermiques.

4.1.3.2 Claquage électromécanique ou électrodynamique

Un tel mécanisme est dû à la pression électrostatique qu'exercent les électrodes sur l'isolant. Si cette pression est trop importante, l'épaisseur de l'isolant peut diminuer et augmenter ainsi le champ électrique. Un tel effet peut être accru par une température élevée ou un échauffement du matériau. Il est cependant très rare dans les systèmes électriques.[10]

Stark et Garton [30] ont introduit l'hypothèse d'un claquage électromécanique dans le polyéthylène, au-dessus de 50°C. Ils ont montré que pour des films minces de 50µm, le claquage se produit à 5MV/cm. A cette contrainte, la pression électrostatique a été évaluée à 26 Kg/cm². La pression qui s'exerce sur le diélectrique lorsque les électrodes sont fixes, ou force de compression de Maxwell est de la forme [31]:

$$P = \frac{1}{2} \epsilon E_{\max}^2 \quad (3.1)$$

Où (ϵ) permittivité du diélectrique.

E_{\max} : Valeur maximale du champ appliqué.

4.1.3.3 Claquage intrinsèque / électronique

4.1.3.3.1 Claquage d'origine électronique

Pour qu'un claquage purement électronique puisse survenir, une condition nécessaire, mais non 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) [6].

Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer ce gain d'énergie fournie aux électrons. On distingue le claquage intrinsèque, le claquage par avalanche et celui associé au volume libre.

4.1.3.3.2 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 on utilisant des électrodes permettant l'évacuation de la chaleur, on peut assister à un claquage brutal qui n'est pas précédé par une augmentation progressive de la température, c'est ce qu'on appelle le claquage intrinsèque [26].

La théorie de la rupture intrinsèque conduit à des valeurs du champ électrique pour lesquelles l'ionisation devient un facteur important. Cette théorie ne tient compte que des phénomènes en volume ; elle ignore l'influence des électrodes, le champ étant supposé uniforme. La théorie la plus connue est celle de Fröhlich [32].

Selon O 'Dwyer [33], le déclenchement d'un claquage intrinsèque dans un diélectrique soumis à un champ électrique (G) initialement uniforme passe par les étapes suivantes:

- ✓ Pour ($G > G_c$) (champ critique), un taux significatif de collisions ionisantes apparaît dans le diélectrique;
- ✓ ces collisions produisent des électrons relativement mobiles, est des trous de moindre mobilité. Dans leur déplacement vers la cathode, les trous créent une charge d'espace qui déforme le champ, le renforçant au niveau de la cathode et le diminuant près de l'anode;
- ✓ le taux de collisions ionisantes s'accroît donc près de la cathode, dont le courant d'émission électronique est augmenté par le renforcement local du champ;
- ✓ les conditions pour une évolution divergente du processus étant ainsi réunies, le diélectrique est détruit rapidement par une émission massive d'électrons provenant de la cathode elle-même (émission de champ) et du diélectrique qui l'entoure immédiatement.

4.1.3.4 Claquage par avalanche

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

Coelho et Aladenize donnent une explication du processus [24]: lors de la collision ionisante avec un atome du matériau, l'électron incident peut céder, à l'atome assez d'énergie pour l'ioniser sans être piégé. L'atome se charge positivement en libérant un nouvel électron de sorte qu'on a alors 2 électrons libres qui peuvent acquérir dans le champ assez d'énergie pour provoquer chacun une nouvelle collision ionisante donc 2 électrons et ainsi de suite. Chaque électron libre accéléré produirait une avalanche exponentielle d'ions positifs fixes et un nuage d'électrons libres balayé par le champ. Toutefois, ce schéma est grossièrement inexact en phase condensée. En effet, la quasi-totalité des électrons libres dans un matériau condensé est incapable d'acquérir l'énergie ionisante dans un champ électrique qui les accélère car un couplage résonant les forces à échanger de l'énergie avec les vibrations thermiques ou (phonon) et avec les défauts du matériau dès que leur énergie est voisine de l'énergie de ces phonons (de l'ordre de $2,5 \cdot 10^{-2}$ eV à la température ambiante). Le claquage par avalanche est caractérisé par un seuil de 10^8 V/m nécessaire pour des collisions ionisantes puissent se produire et le processus qui en découle est rapide.

Après la i ème génération, on aura 2^i électrons entre la cathode et l'anode. D'après Seitz [34], le claquage n'a lieu qu'après 40 générations. En d'autres termes, le nombre d'électrons requis pour une avalanche destructive est $2^{40} = 10^{12}$, mais ce chiffre a été établi après plusieurs hypothèses. C'est ce que l'on appelle la théorie des 40 générations.

4.1.3.5 Claquage pratique

Dans la pratique, le claquage diélectrique des isolants se produit toujours au point le plus faible du volume de l'isolation soumise à la contrainte du champ électrique. Ce point correspond généralement à la présence de défauts parmi lesquels on peut citer:

- ✓ Les inclusions gazeuses qui peuvent provenir lors du remplissage d'huile si le vide n'est pas atteint d'air à ce moment-là, il est introduit dans la cuve du transformateur.
- ✓ Les parties d'électrodes à faible rayon de courbure ; par exemple les points dus à des mauvaises soudures lors de la connexion des phases des enroulements aux parties externes des transformateurs qui sont les isolateurs de haute tension.
- ✓ Les inclusions (impuretés). [10]

4.1.4 Arborescences

De nombreux phénomènes sont susceptibles d'altérer un diélectrique au cours du temps, provoquant en particulier une diminution de la rigidité diélectrique. Ils sont en majorité responsables des claquages intervenant des mois, voire des années après la mise sous tension. L'altération des isolants conduit à la réduction du champ critique E_c quand il y a présence de défauts d'homogénéité, cavités et inclusions de particules étrangères. Les décharges partielles prenant naissance au voisinage de ces défauts dès que le champ est suffisant peuvent, par érosion, fusion localisée, transformations chimiques induites, créer dans l'isolant des réseaux de canaux plus ou moins conducteurs, appelés arborescences en raison de leur ressemblance avec les branches d'un arbre. Les arborescences croissent au cours du temps provoquant un claquage dès que leur taille est suffisante. La présence d'humidité dans les isolants favorise l'apparition et la croissance des arborescences. Les arborescences sont répertoriées en deux catégories selon l'endroit où elles prennent naissance.

- ✓ Les arborescences ouvertes qui se développent à l'interface de l'isolant.
- ✓ Les arborescences à l'interface à partir de microcavités ou des inclusions internes.
- ✓ Les arborescences peuvent être de type électrochimique ou électrique. [10]

5. Phénomènes prédisruptifs dans les diélectriques liquides

Il est généralement admis que quel que soit la géométrie et la polarité, le claquage d'un liquide est précédé d'une phase de préclaquage durant laquelle une perturbation dénommée "streamer" prend naissance dans une région de champ élevé.

Dans un système d'électrodes pointe plan, les streamers positifs produits lorsque la pointe est anode, sont filamentaires et leur vitesse moyenne est 2 à 50 fois celles des streamers négatifs ; elle excède la vitesse du son ($\approx 1\text{km/s}$).

L'étude des phénomènes prédisruptifs ne peut pas être limitée aux aspects strictement électriques. En effet, l'apparition d'une phase gazeuse au sein du liquide soumis à un champ électrique est très souvent observée et elle est suivie généralement par le claquage du liquide [10].

6. Conclusion

Vu qu'on aura à travailler sur l'huile Borak 22, on a présenté dans ce chapitre un aperçu théorique et des concepts physiques de base concernant les diélectriques de différentes natures. On a vu que le claquage est un phénomène qui résulte non seulement d'un effort direct du champ électrique sur le matériau, mais aussi de la combinaison des effets d'origine thermique, mécanique, chimique,... qui entrent en jeu dans la dégradation des matériaux

Chapitre 4 : Maintenance et traitement statistique

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons dans un premier temps, des concepts de la maintenance appliquée à l'étude des transformateurs de puissance, en citant les différents défauts qui peuvent survenir durant son service, ainsi que, les moyennes de protection appropriés contre ces défauts.

En deuxième lieu, une base théorique sur les statistiques de la rupture diélectrique ainsi que les deux principales lois utilisées en fiabilité à savoir la loi de Weibull et la loi normale.

2. Maintenance [1]

2.1 Définition

C'est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

Selon la norme NF EN 13306 X60-319, la maintenance est déclinable en deux approches :

- ✓ Préventive : qui sera déclinée en une maintenance systématique ou conditionnelle
- ✓ Corrective : qui sera appliquée d'urgence ou en différé

2.2 Maintenance application au transformateur

2.2.1 Actions entreprises pour la maintenance des transformateurs

Selon l'exploitation plus ou moins intensive du transformateur et sa criticité, l'espacement des actions de maintenance préventive variera dans le temps. Les actions réalisées, ainsi que leurs fréquences, seront le résultat d'une politique de maintenance définie par l'exploitant. Il est possible que tout, ou partie, de ces actions soient sous-traitées à des entreprises spécialisées.

La tendance dans les politiques de maintenance des parcs de transformateurs évolue plutôt d'une maintenance systématique sur tous les appareils, à intervalles réguliers, vers une maintenance conditionnelle afin d'optimiser les coûts. Dans ce cas, il est nécessaire d'établir l'état d'un appareil, principalement par le suivi des analyses d'huile ou des conditions d'exploitation, avant d'engager des opérations, un entretien ou une réparation de celui-ci.

Les principales opérations de maintenance préventive sont :

- ✓ le prélèvement d'huile, son analyse et son suivi dans le temps ;
- ✓ le changement de joints (fuyards), ou de traversées ;
- ✓ l'adaptation d'une nouvelle réfrigération ;
- ✓ le resserrage de la partie active.

Les principales opérations de maintenance corrective suite à une avarie sont :

- ✓ le diagnostic après incident pour cibler l'état précis du transformateur ;
- ✓ le remplacement d'accessoires ;
- ✓ la réparation du matériel ;
- ✓ le traitement voire le remplacement d'huile selon les défauts engendrés ; ou l'achat d'un transformateur neuf.

La connaissance des opérations passées de maintenance, ou réparation, effectuées sur un appareil peut faciliter le diagnostic en expliquant ou excluant certaines faiblesses.

2.2.2 Démarches de diagnostic sur un transformateur

La démarche de diagnostic sur un transformateur se déroule selon l'acheminement des étapes suivantes :

1. **Observation** : on obtient des données diverses sur un cas considéré.
2. **Diagnostic** : c'est la reconnaissance/détection d'un état de défaut suivant un processus dédié, par comparaison avec des fonctionnements en état normal ou anormal.
3. **Localisation de défauts** : en repartant de l'étape 1, et demandant plus d'informations par des questions et/ou des essais, on réitère le processus jusqu'à ce que le défaut soit identifié, ou l'absence de défaut confirmée.
4. **Remise en état** : du système avec des propositions pour aller dans ce sens.

Un exemple d'un cas réel, cette démarche se traduit par :

1. Observation :

- Un exploitant appelle avec un problème ou une question sur un transformateur. Il est la première source d'information sur le transformateur et son environnement.
- L'interlocuteur de l'exploitant organise les informations fournies utiles pour le diagnostic. Ce seront les premières entrées du processus itératif qui suit.

2. Diagnostic

- Un expert fait la synthèse des informations disponibles et émet des hypothèses sur le(s) défaut(s) le(s) plus probable(s).

3. Localisation de défauts

- L'expert, s'il a des doutes, préconise des mesures complémentaires pour mieux localiser le défaut, ou infirmer sa présence, sans découvrir le transformateur dans la mesure du possible. Les étapes 2 et 3 sont répétées jusqu'à atteindre une confiance suffisante dans le diagnostic établi.

4. Remise en état

- Une fois le diagnostic posé, l'expert propose les actions nécessaires pour rétablir le fonctionnement normal du transformateur.

La méthodologie de diagnostic mise en œuvre ici a prouvé son efficacité, mais repose entièrement sur l'expert. Or l'expertise en Algérie, est difficile et longue à acquérir, cela est dû à plusieurs facteurs, à savoir : le nombre d'experts techniques est faible ou inexistant, une seule entreprise de conception et de fabrication de transformateurs est disponible et les modules d'enseignement des matières de maintenance et de fiabilité au sein des universités manquent de pratiques et d'application.

Dans ce contexte, un outil systématique d'aide au diagnostic, formalisant l'interprétation des informations et résultats de mesure, et en particulier les liens logiques récurrents qui peuvent l'être a l'avantage notable de faciliter le travail de l'expert.

2.3 Les principaux défauts sur un transformateur [1, 18,20]

2.3.1 Défauts dus aux contraintes diélectriques

Si les caractéristiques des isolants se dégradent trop, due à une humidité interne excessive par exemple, ou ses contraintes sont au-delà de leurs limites, alors il peut se développer plusieurs défauts, tels :

- ✓ **Un amorçage des pièces sous tension :**
 - **entre elles**, comme entre enroulements ou entre spires (Fig. 4.1)
 - **avec la masse**, comme l'amorçage d'une traversée ou d'un enroulement à la cuve ou au circuit magnétique.
- ✓ **Des décharges partielles :** Ce sont des micros décharges locaux au sein d'un isolant solide, qui tend à se propager dans le temps.
- ✓



Fig. 4.1: Amorçage franche entre spires

Tous ces défauts créent du carbone, qui est conducteur, impactant ainsi la tenue diélectrique localement. Ce phénomène étant irréversible, il est impossible de retrouver un fonctionnement normal suite à un amorçage diélectrique.

2.3.2 Défauts dus aux surintensités

Les conséquences de ces surintensités sont de trois ordres :

- ✓ **Efforts électrodynamiques** dus aux forces de Laplace dans les bobinages entraînant des contraintes mécaniques élevées. Ces efforts peuvent être particulièrement significatifs lors des efforts de court-circuit, jusqu'à quelques centaines de tonnes. Le livre (ABB Short-circuit Duty of Power Transformers, 2007) est particulièrement complet sur le sujet. Un exemple franc de déformation mécanique d'enroulement est visible sur la (Fig. 4.2). Pour s'en affranchir en partie, les enroulements en usine sont serrés jusqu'à plusieurs centaines de tonnes, pour les empêcher d'avoir un degré de liberté malgré les efforts développés.
- ✓ **Échauffements élevés des enroulements**, dégradant les isolants solides en particulier.
- ✓ **Chute de tension au secondaire**, perturbant la stabilité du réseau.



Fig. 4.2: Effort électrodynamique franche

2.3.3 Défauts électriques

Les effets de ces contraintes électriques sont principalement des points chauds dus à des échauffements locaux anormaux sur les éléments suivants :

- ✓ **Connexions dans certains changeurs de prises en charge**, en particulier les contacts mobiles de l'inverseur s'ils sont peu manipulés, alors qu'ils voient passer en permanence le courant de charge du transformateur.
- ✓ **Connexions des changeurs de prise hors tension**. Les contacts mobiles sur les positions en service qui ne sont jamais bougés peuvent se dégrader avec le temps.
- ✓ **Connexion entre le cuivre des enroulements et une connexion interne**, comme pour les prises de réglage ou les connexions qui passent dans les traversées. Ces différentes connexions sont brasées, serties ou boulonnées, et suivant la qualité du contact et les conditions d'exploitation, certains de ces raccords peuvent chauffer anormalement. Un point chaud très avancé sur un contact boulonné est visible sur la (Fig. 4.3). La formation de points chauds, constitués de particules de carbone solides dues à la décomposition de l'huile, peut dans certains cas provoquer la dégradation d'isolants. Dans les stades les plus avancés, la formation de carbone sous forme solide peut diminuer des distances diélectriques internes, allant jusqu'à un amorçage interne dans le pire des cas.



Fig. 4.3: Point chaud sur connexion boulonnée

2.3.4 Défauts thermiques

Dans tous les cas, ces contraintes thermiques provoquent le vieillissement :

- ✓ **des papiers isolants**, et la dégradation de leurs propriétés diélectriques par voie de conséquence. Ceux-ci sont d'autant plus critiques qu'ils ne sont pas, sauf reconstruction, remplaçables au long de la vie d'un transformateur. Par exemple dans le cas extrême de la (Fig. 4.4) toute la bobine est noircie de l'intérieur à cause d'un fonctionnement à des températures excessives.
- ✓ **de l'huile isolante**. La température, l'humidité et l'oxygène accélèrent le vieillissement de l'huile, qui perd donc ses qualités d'origine, ce qui peut mener à un défaut.

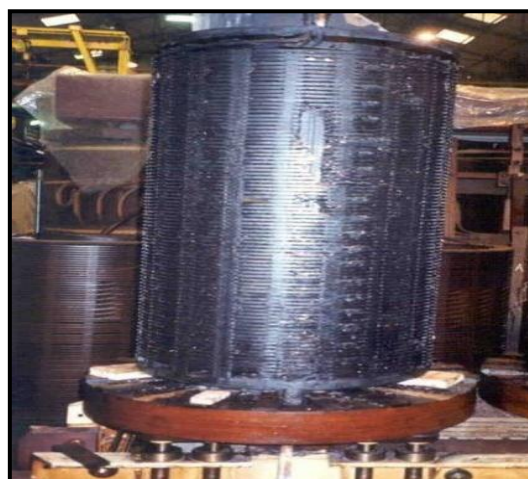


Fig. 4.4: Échauffement excessive d'un enroulement

2.3.5 Défauts électromagnétiques

En cas de mises à la masse en plusieurs points du circuit magnétique (Fig. 4.5) ou des éléments métalliques de serrage de la partie active, on peut avoir comme défauts typiquement des points chauds dus à :

- ✓ **des courants de Foucault induits**, anormalement importants ;
- ✓ **des dégradations d'isolants internes** dus à ces courants de Foucault anormaux.

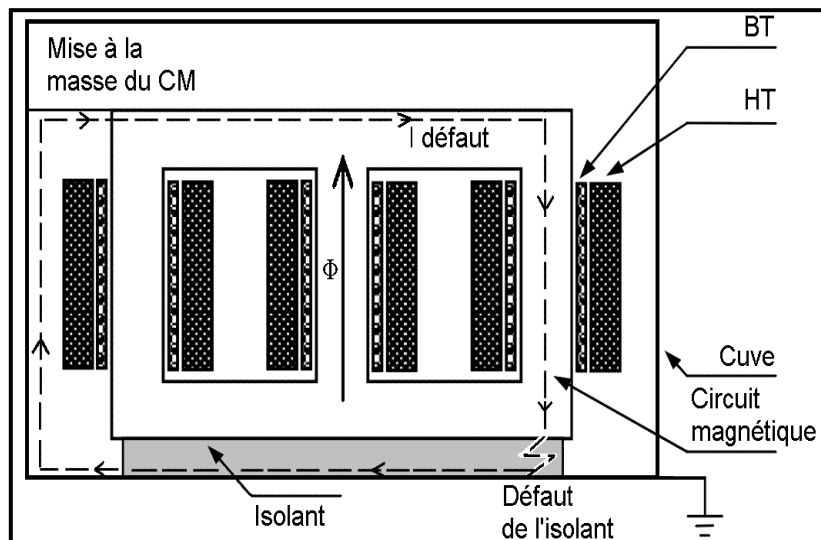


Fig. 4.5: Schéma d'une boucle de courant de défaut avec le circuit magnétique (CM)

2.3.6 Défauts mécaniques

Les principaux défauts liés aux contraintes mécaniques sont :

- ✓ **Des points chauds sur des régleurs de prises** si ceux-ci sont mécaniquement mal alignés.
- ✓ **La diminution de distances diélectriques**, dues au déplacement interne massif d'un circuit magnétique de plusieurs centimètres, suite à un choc mécanique comme lors de la chute d'un transformateur (Fig. 4.6)
- ✓ **Des dégradations d'isolants internes** dues à des vibrations anormales, elles-mêmes dues à un manque de serrage interne à la construction, ou suite à des chocs importants.
- ✓ **Les fuites de joints** mécaniquement trop serrés et/ou chauffés (Fig. 4.7) lors de leur installation puis leur exploitation.



Fig. 4.6: Problème de transport



Fig. 4.7 : Joint de traversée écrasé

2.4 Protection des transformateurs [1, 18,20]

La protection des transformateurs a une triple mission :

1. protéger le transformateur contre les perturbations extérieures, courts-circuits, surtensions, surcharges ;
2. préserver les réseaux connectés et l'environnement des effets des défauts se produisant dans le transformateur ;
3. surveiller le fonctionnement du transformateur, avertir d'une évolution dangereuse et limiter les dégâts en cas d'avarie.

2.4.1 Protections électriques

2.4.1.1 Protection par relais à maximum d'intensité (I_{max})

Des relais reliés à des transformateurs de courant (équivalents d'un ampèremètre en haute tension) déclenchent le transformateur suite à une surintensité temporaire, fixée selon un seuil.

2.4.1.2 Protection « masse cuve »

Très souvent la cuve est isolée du sol par des plaques isolantes au niveau de ses galets, et est mise en un unique point à la terre. Si un courant de défaut passe du circuit électrique (enroulement, connexion) à la masse à l'intérieur du transformateur, celui-ci sera drainé inévitablement par cette connexion unique de mise à la masse de la cuve. Sur celle-ci se trouve alors un transformateur de courant, appelé couramment « TI masse-cuve » qui au-delà d'une certaine valeur de courant, de défaut donc, déclenche alors le transformateur.

2.4.1.3 Protection différentielle

Elle compare les courants entrant et sortant du transformateur, et décèle ainsi les courts-circuits internes et les amorçages à la masse.

2.4.1.3.1 Protections contre les surtensions

Pour se protéger des surtensions sont souvent mises en place : soit des éclateurs sur les traversées, soit des parafoudres à l'extérieur, voire dans certains cas à l'intérieur, du transformateur.

2.4.2 Protections thermiques

Sur le transformateur sont montés plusieurs thermomètres et des images thermiques donnant une image de la température du cuivre. Depuis quelques années des fibres optiques sont aussi installées dans les enroulements permettant une mesure plus fine et plus rapide de cette température.

2.4.3 Autres protections

2.4.3.1 Relais Buchholz

Le relais Buchholz (Fig. 4.8) est installé sur tous les transformateurs de puissance immergés dans l'huile entre le haut de la cuve et le conservateur. Tout accident interne important se traduit par :

- ✓ un dégagement de gaz, qui fait descendre un flotteur et active une alarme (1er stade).
- ✓ Un mouvement d'huile importante en partie supérieure de la cuve, où se place le relais, qui fait basculer un flotteur et provoque le déclenchement du transformateur (2ème stade).

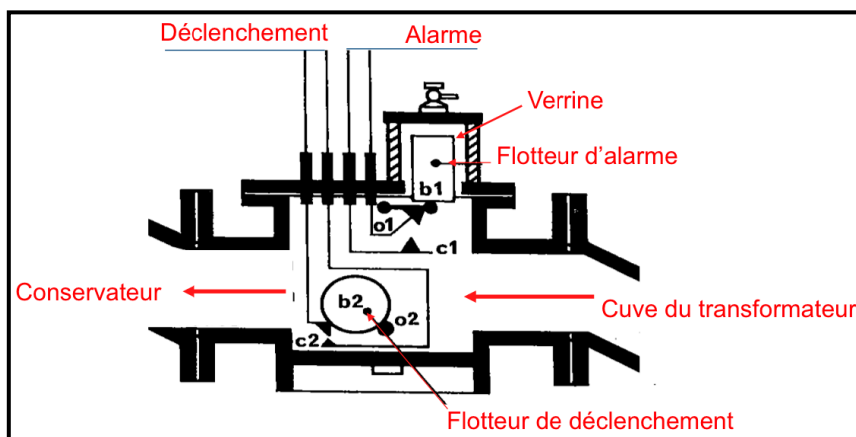


Fig. 4.8: Schéma d'un relais Buchholz

2.4.3.2 Le relais RS 1000

Le compartiment hermétique du régleur en charge, le commutateur, possède toujours aussi sa propre protection qui déclenche le transformateur sur mouvement d'huile : le relais« RS 1000 ».

2.4.3.3 Soupape de surpression

Une soupape de surpression est une ouverture fermée par une plaque sous pression d'un ressort. En cas de surpression interne soudaine, due à un arc de forte puissance typiquement, l'huile peut mécaniquement s'évacuer par la soupape, évitant la déformation de la cuve.

2.4.3.4 Protections incendie

Des protections incendie constituées de billes thermofusibles liées à un contact peuvent être placées sur la cuve, pour en cas de feu déclencher une alarme et/ou un système d'extinction d'incendie.

2.5 Diagnostique de défauts par la méthode de l'arbre de défaillances

2.5.1 Définition

La méthode de l'arbre de défaillance ou (AdD) (en anglais Fault Tree Analysis ou« FTA ») est aussi appelée méthode de l'arbre des causes. Souvent utilisée en conjonction avec une AMDEC. L'arbre de défaillance est une représentation graphique de type arbre généalogique. Il représente une démarche d'analyse d'événement. Elle est construite en recherchant l'ensemble des événements élémentaires, ou les combinaisons d'événements, qui conduisent à un événement redouté.

La méthode de l'arbre de défaillance est une méthode d'analyse technique concernant la fiabilité/sécurité qui, partant des défaillances du système, descend jusqu'aux causes individuelles ou combinées tracées en cascade

2.5.2 Principe

Cette méthode déductive de l'effet vers ses causes, a pour objet la recherche de toutes les combinaisons de défaillances élémentaires pouvant aboutir à un événement redouté. A partir de ce événement sommet, on construit une arborescence (schéma graphique en forme d'arbre inversé) représentant l'enchaînement logique des (événements intermédiaire) jusqu'à la mise en cause des (événements élémentaires). Cela par utilisation du symbolisme logique de l'algèbre de Boole. Il est ainsi possible d'identifier toutes les défaillances élémentaires pouvant conduire à l'évènement redouté.

2.5.3 Objectifs

L'objectif est de suivre une logique déductive en partant d'un événement redouté pour déterminer de manière exhaustive l'ensemble de ses causes jusqu'aux plus élémentaires.

Ce type d'analyse permet, dans le domaine de la maintenance :

- ✓ D'améliorer la conception.
- ✓ De faire un diagnostic rapide.
- ✓ De prévoir une meilleure logistique.

2.5.4 Logiciel Arbre-Analyste

Arbre analyste est conçu par des ingénieurs spécialistes dans le domaine de la sûreté de fonctionnement dans le but de proposer un outil qui réponde aux mieux aux besoins des études de sécurité et de fiabilité des systèmes.

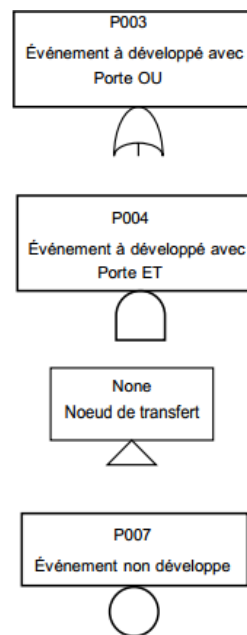


Fig 4.9 : Différents événement de l'arbre analyste.

2.5.5 Application à un réseau de distribution d'énergie électrique

D'après la carte du réseau électrique de la ville de Bejaia, récupérée au niveau du service technique de la société Sonalgaz sis à la cité Tobal (voir Annexe), on a élaboré le schéma du réseau de distribution de la région d'Ighil Ouazzoug, (figure 4.10)

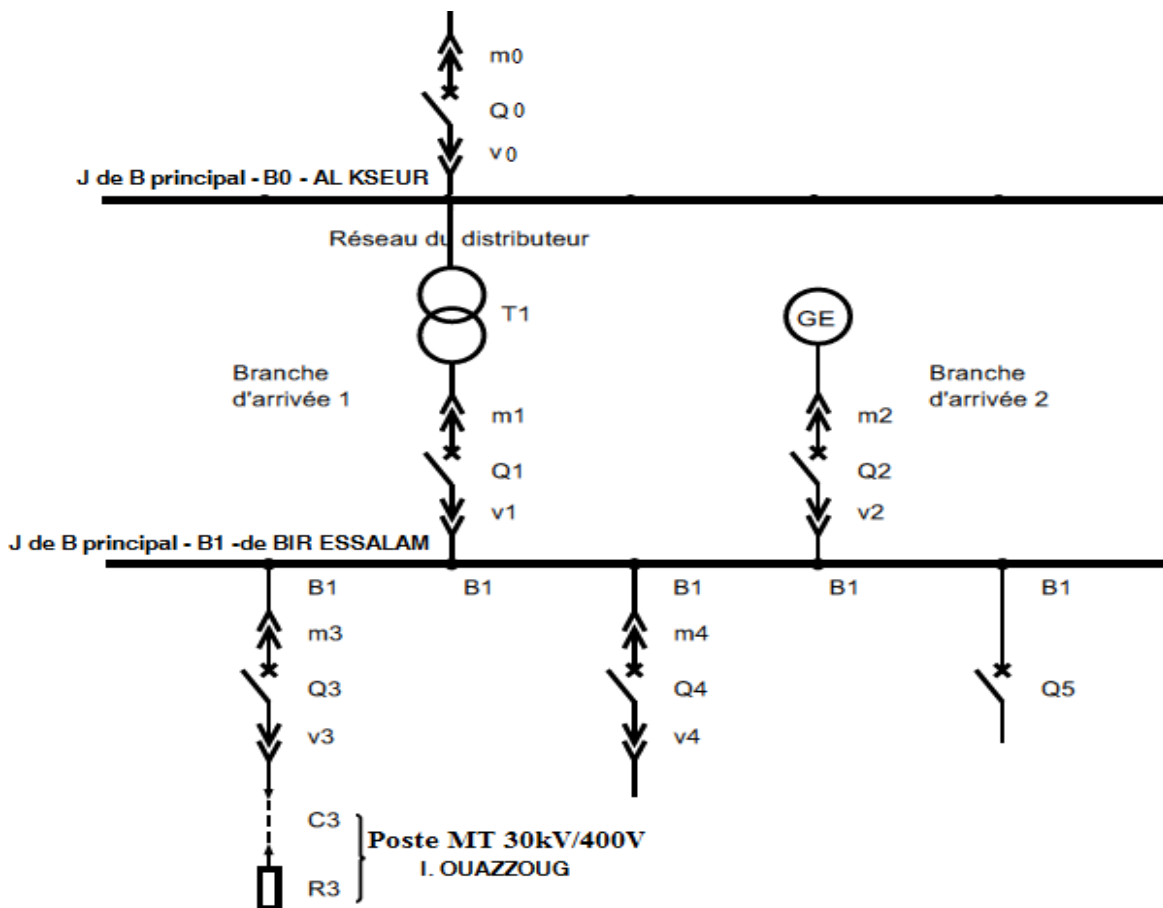


Fig. 4.10 Schéma du réseau de distribution de la région d'Ighil Ouazzoug

2.5.6 Elaboration de l'arbre de défaillance du réseau de distribution de la région d'Ighil Ouazzoug

Pour l'élaboration de l'arbre de défaillance du réseau de distribution d'énergie électrique de la région d'Ighil Ouazzoug, on a suivi une méthode déductive, qui fournit une démarche systématique pour identifier les causes d'un événement unique intitulé événement redouté, c'est à dire: panne d'électricité au niveau de la région. Ce point de départ de la construction de l'arbre est l'événement redouté lui-même (également appelé événement sommet). Il est essentiel qu'il soit unique et bien identifié. À partir de là, le principe est de définir des niveaux successifs d'événements tels que chacun est une conséquence d'un ou plusieurs événements du niveau inférieur. La démarche est la suivante : pour chaque événement d'un niveau donné, le but est d'identifier l'ensemble des événements immédiats nécessaires et suffisants à sa réalisation. Des opérateurs logiques (ou portes) permettent de définir précisément les liens entre les événements des différents niveaux.

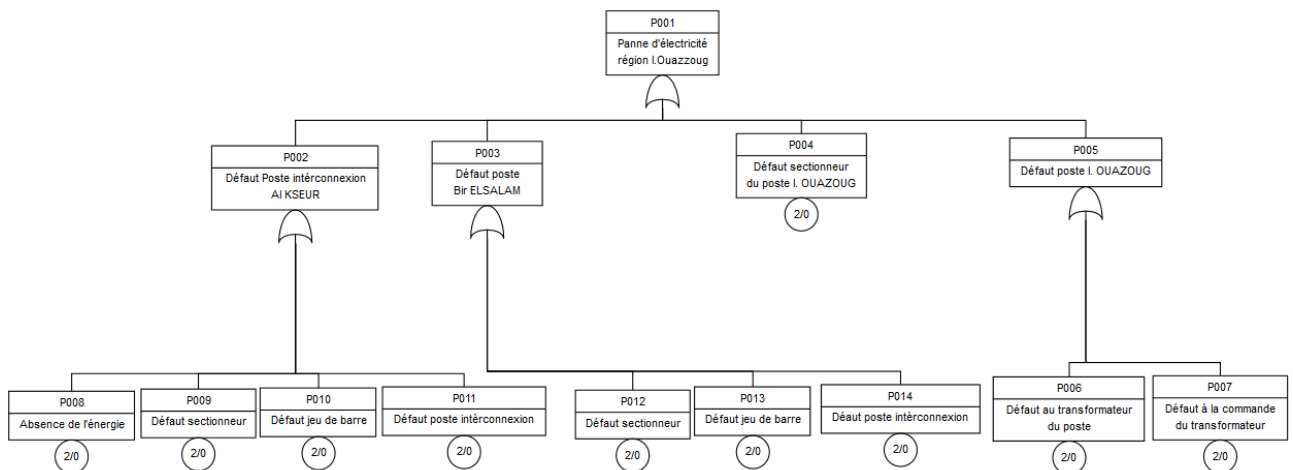
Ce processus déductif est poursuivi niveau par niveau jusqu'à ce que les spécialistes concernés ne jugent pas nécessaire de décomposer des événements en combinaisons d'événements de niveau inférieur, notamment parce qu'ils disposent d'une valeur de la

probabilité d'occurrence de l'événement analysé. Ces événements non décomposés de l'arbre sont appelés événements élémentaires (ou événements de base).

Notons que :

- ✓ Il est nécessaire que les événements élémentaires soient indépendants entre eux.
- ✓ Leur probabilité d'occurrence doit pouvoir être quantifiée (condition nécessaire seulement dans le cas où l'arbre est destiné à une analyse quantitative, et ce n'est pas le cas de notre étude).
- ✓ Contrairement à l'approche inductive de l'AMDE (Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité) qui ne cible pas les conséquences des défaillances élémentaires, l'approche déductive de l'arbre de défaillance permet de se focaliser exclusivement sur les défaillances contribuant à l'événement redouté.

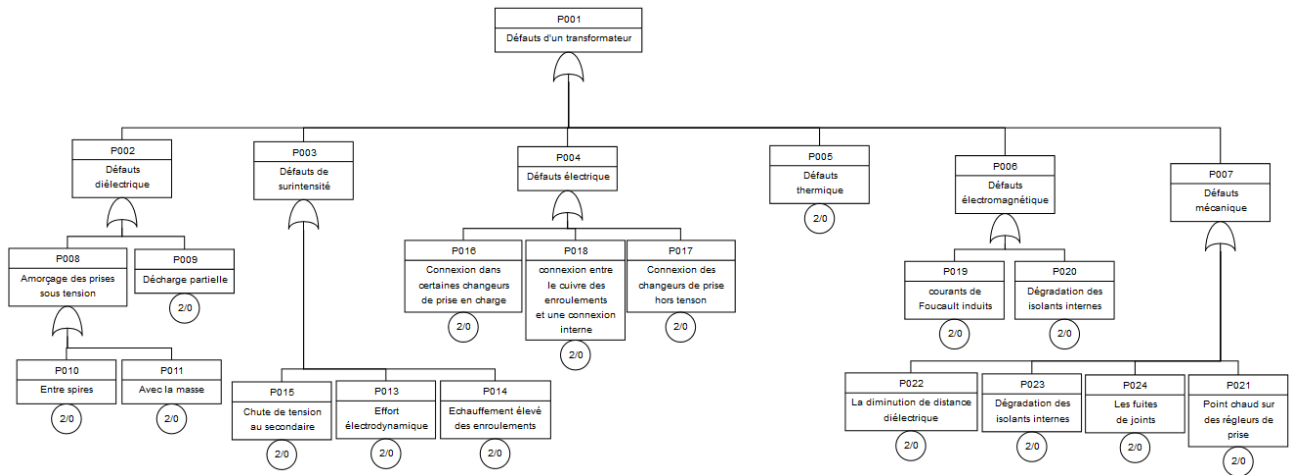
Ainsi, on démarrant de l'événement redouté qui est la panne d'électricité, on a tracé l'arbre de défaillance suivante :



2.5.7 Elaboration de l'arbre de défaillance d'un transformateur de puissance

L'événement de base de l'arbre de défaillance précédant, est un défaut sur transformateur. Cet événement peut être développé, et par conséquent, ce défaut deviendra à son tour l'événement principal redouté.

De la même manière que l'arbre précédant, on trace l'arbre de défaillance du transformateur. Voir l'arbre suivant :



3. Importance de l’huile dans un transformateur de puissance

Dans le tableau Tab. 4.1, sont représenté les pourcentages des défauts dans un transformateur de puissance. On voit clairement, que les défauts de tenue diélectrique, représentent 21% des pannes sur un transformateur, et que les défauts de refroidissement comptent 12% des pannes.

Composant défectueux	Pourcentage de défauts (%)
Traversée	30
Tenue diélectrique	21
Refroidissement et autres	12
Défaillance mécanique	11
Autres	5

Tab. 4.1 Pourcentages des défauts dans un transformateur de puissance

D’après les informations recueillies sur les postes de distribution d’énergie électrique MT 30kV/400V de la ville de Bejaia, au niveau de la société Sonalgaz, service technique de l’unité de la cité Tobal, on a constaté que la majorité des pannes rencontrés sur les transformateurs utilisés, sont dû essentiellement aux problèmes liés à l’huile Borak22 utilisé. De ce fait, on a consacré tout le chapitre V à l’étude de l’huile Borak22.

4. Modèles statistiques appropriés à la rupture diélectrique

La connaissance des valeurs de rupture diélectrique des isolants est un problème majeur pour déterminer la fiabilité des dispositifs électriques. Malheureusement, plusieurs

échantillons identiques placés dans les mêmes conditions expérimentales ne fournissent pas une valeur unique du champ de rupture, mais une distribution de valeurs.

Ce caractère statistique impose 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.

Les principales lois utilisées en fiabilité sont les lois: Exponentielle, de Weibull, de Gumbell, de valeurs extrêmes, Gamma, G-Gamma, Logistique, Loglogistique, normale et Log-normale [23, 35, 36]. On peut se reporter utilement aux ouvrages de Nelson [37] et Lawless [38], qui fournissent toutes les informations pratiques concernant le traitement des données.

4.1 Modèle statistique de Weibull [39, 40, 41]

Le modèle statistique de Weibull ou loi de chaîne s'écrit :

$$P(x) = e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, x > 0 \quad (4.1)$$

$P(x)$: Probabilité de rupture et X : Variable aléatoire

η : 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 $x = \eta$, $\text{LnLn}\left(\frac{1}{1-P}\right) = 0$, on déduit $P = \frac{1}{e} 63.2\%$

γ : Paramètre de localisation, indique une survie des échantillons mesurés entre 0 et η ou encore une probabilité de défaillance nulle pour des valeurs de $x > \gamma$. La grandeur γ apparaît comme un seuil en dessous duquel le phénomène régi par la variable X ne se produit plus.

β : 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 :

$$P(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta}, x > 0 \quad (4.2)$$

4.2 Modèle de la loi normale

4.2.1 Définition

Une variable aléatoire absolument continue (x) suit une loi normale de paramètres (μ, σ) si sa densité de probabilité est donnée par [42]

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4.3)$$

(μ) est l'espérance et σ est l'écart-type

5. Méthodes de lissage linéaire

La représentation graphique des points expérimentaux peut être approchée par des polynômes de degré 1, 2 ou 3 [43,44-41].

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

5.1 Principe de lissage linéaire par la méthode des moindres carrés [43]

Soit une loi définie par la probabilité cumulée de rupture :

$$P(G) = 1 - \exp - \left[\frac{G}{G_0}\right]^\alpha \quad (4.4)$$

Sa fonction de distribution est :

$$f(G) = \frac{dP(G)}{dG} = \frac{\alpha}{G_0} \left[\frac{G}{G_0}\right]^{\alpha-1} \exp - \left[\frac{G}{G_0}\right]^\alpha \quad (4.5)$$

Dans le cas, où le champ de seuil G_s est nul. On cherche une estimation de G_0 et α par régression linéaire sur les points de coordonnées :

$$X_i = \log G_i, Y_i = \log Ln \frac{1}{1-P_i} \quad (4.6)$$

Les points expérimentaux sont caractérisés par un numéro d'ordre i . il convient de trouver la valeur de G_s qui conduit au tracé linéaire représentant de façon optimale les points expérimentaux (X_i, Y_i) . Pour cela, on commence à donner à G_s une valeur arbitraire, mais inférieure à celle du faible des champs de rupture observés [45]. En répétant le processus pour différentes valeurs données à G_s et en calculant chaque minimum M_c , on trace $M_c(G_s)$. Son

minimum s'il existe, donne la valeur du champ seuil G_s à venir, il faut minimiser l'expression :

$$M_c = \sum_{i=1}^N [\text{LogLn} \frac{1}{1-p_i} - a \log G_i - b]^2 \quad (4.7)$$

Avec :

$\text{logLn} \frac{1}{1-p_i}$ Ordonnées des points expérimentaux

$a \log G_i - b$ Polynôme de premier degré

$$M_c = \sum_{i=1}^N [\text{LogLn} \frac{1}{1-p_i} - a \log G_i - a \log G_0]^2 \quad (4.8)$$

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

$$\frac{\partial M_c}{\partial a} = 0, \frac{\partial M_c}{\partial b} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial M_c}{\partial a} = 0, \frac{\partial M_c}{\partial \log G_0} = 0$$

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

On a :

$$P(G) = 1 - \exp - \left[\frac{G - G_s}{G_0 - G_s} \right]^\alpha \quad (4.9)$$

$$\text{LogLn} \frac{1}{1-p} = \alpha \log(G - G_s) - a \log(G_0 - G_s) \quad (4.10)$$

$$M_c = \sum_{i=1}^N [\text{LogLn} \frac{1}{1-p_i} - \alpha \log(G_i - G_s) - b]^2 \quad (4.11)$$

Avec :

$\text{logLn} \frac{1}{1-p_i}$ Ordonnées des points expérimentaux et $a \log(G_i - G_s) - b$ Polynôme du premier degré.

On a :

$$M_c = \sum_{i=1}^N [\text{LogLn} \frac{1}{1-p_i} - \alpha \log(G_i - G_s) + \alpha \log(G_0 - G_s)]^2 \quad (4.12)$$

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

$$\frac{\partial M_c}{\partial a} = 0, \frac{\partial M_c}{\partial b} = 0 \text{ et } \frac{\partial M_c}{\partial a} = 0, \frac{\partial M_c}{\partial \log(G_0 - G_s)} = 0$$

Il est nécessaire de connaître la valeur de G_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 G_s .

5.2 Lissage linéaire par la méthode du maximum de vraisemblance

La méthode du maximum de vraisemblance est une technique bien connue pour l'estimation des paramètres d'une distribution de probabilité. L'application de cette méthode pour l'estimation des paramètres de la loi de Weibull a été faite par Cohen [46]. On définit la fonction de vraisemblance L par :

$$L = \prod_{i=1}^N f(x_i) = \prod_i \frac{dP(x_i)}{dx} \quad (4.13)$$

Elle 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.

6. Intervalles de confiance

Toute estimation des paramètres d'une population statistique diffère de la vraie valeur des mêmes paramètres de la population totale qui serait obtenue à partir d'une expérience comportant un nombre infiniment grand d'éprouvettes. La plus part des estimations ont recours à des méthodes graphiques ou de calcul et restent toujours approximatives. De plus, il est difficile de mesurer l'erreur imputable à de tels procédés, ce qui rend délicate l'analyse des résultats notamment dans le cas des essais comparatifs.

Le calcul des intervalles de confiance pour une distribution de Weibull est un problème très complexe qui a fait l'objet de nombreux travaux [47, 48]. 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. Stone et Van Heeswijk [49] ont calculé les différents paramètres de Weibull. Un logiciel de calcul a été développé par Stone [50].

Soit \hat{E} un estimateur d'un paramètre X dont on connaît la loi de probabilité pour chaque valeur de 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 :

$$P(E1 < \hat{E} < E2 / (X = X0)) = 1 - P \quad (4.14)$$

Ces bornes dépendent évidemment de X_0 . On choisira dans la plupart des cas un intervalle de probabilité à risque symétrique.

Soit E la valeur observée de \hat{E} on adopte alors la règle suivante :

Si E appartient à l'intervalle $(E1, E2)$, on conserve X_0 comme valeur possible de X .

Si E n'appartient pas à l'intervalle $(E1, E2)$ On élimine X_0 .

On répète cette opération pour toutes les valeurs du paramètre. On traduit graphiquement cette méthode dans un plan (X, \hat{E}) où l'on trace $E1(X), E2(X)$.

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 E . 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 ou fait intervenir un risque de 10%.

Les intervalles de confiance ne sont valables que pour des éprouvettes testées de façon identique [51,52].

7. Test d'adéquation

Ce test est couramment utilisé 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 s'avère mieux adapté, mais n'est pas infaillible. Il convient donc de mieux mentionner ses limites d'utilisation. Le principe de ce test très classique est exposé dans les

ouvrages de statistiques comme celui de Chapoille et de Pazzis [53] et repris dans d'autres travaux sur les isolants solides [54,55].

7.1 Test de khi-deux (χ^2) [12, 56, 41]

L'application de ce test est conditionnée par le nombre d'observations qui doit être supérieur ou égale à 50.

Pour ce test on utilise généralement des classes et dans chaque classe on doit obtenir un nombre d'observations supérieur ou égal à 5, l'intervalle de classe n'est pas forcément régulier.

Il est basé sur l'écart entre les valeurs observées et le modèle théorique.

Soit la fonction E suivante :

$$E = \sum_{i=1}^r \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \quad (4.15)$$

p_i : Probabilité de se trouver dans la classe i

n_i : Nombre d'individus (d'observations) de la $i^{\text{ème}}$ classe

n : Nombre d'individus total de l'échantillon.

np_i : Nombre d'individus attendent théoriquement dans la classe i

E Suit approximativement une loi χ^2 de ν degrés de liberté avec $\nu = r - k - 1$ ou k : nombre de paramètres estimé pour le modèle théorique.

Donc, on peut écrire que:

$$P(E > \chi^2_{\nu, 1-\alpha}) = 1 - \alpha \quad (4.16)$$

Si $E > \chi^2_{\nu, 1-\alpha}$ on rejette l'hypothèse du modèle théorique choisi.

7.2 Test de Kolmogorov-Smirnov [56,41]

Aucune restriction n'est nécessaire pour l'application de ce test, cependant si , il est préférable de regrouper les valeurs en classe et utiliser le test de

son principe 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 ;

$$Dni = |f(t) - F(t)| \quad (4.17)$$

Où $f(t)$: fonction réelle, elle est obtenue par la méthode des rangs moyens $f(t) = \frac{i}{N+1}$

Ou par la méthode des rangs médians

$$f(t) = \frac{i-0.3}{N+0.4} \quad (4.18)$$

Et $F(t)$: fonction théorique

$$\text{Soit } Dn = \text{Max}|f(t) - F(t)| \quad (4.19)$$

$$\text{et } P[\text{Max}|f(t) - (F(t))| < Dn, \alpha] \quad (4.20)$$

La valeur de $D_{n, \alpha}$ est donnée par la table de Kolmogorov-Smirnov.

Si $Dn, \alpha > Dn$, on refuse l'hypothèse du modèle théorique.

8. Conclusion

Dans ce chapitre, plusieurs points ont été abordés à savoir ;

- ✓ Les différents défauts susceptibles de se produire durant le fonctionnement d'un transformateur de puissance.
- ✓ Une application de la méthode de l'arbre de défaillance sur un cas réel, premièrement sur un réseau de distribution d'énergie électrique de la région d'Ighil Ouazzou, puis sur un transformateur.
- ✓ Les principales lois utilisées en fiabilité tels que les lois de Weibull et la loi normale ainsi que deux méthodes de lissage linéaire (méthode des moindres carrés et celle du maximum de vraisemblance).
- ✓ Deux tests d'adéquation (test de Khi-deux et test de Kolmogorov-Smirnov, afin de tester l'ajustement et l'adaptation des différents modèles de lois entrepris vis-à-vis de ces distributions, et la méthode des intervalles de confiance qui permette d'encadrer la vraie valeur recherchée.

Chapitre 5 : Partie expérimentale

1. Introduction

Ce chapitre sera consacré aux travaux expérimentaux effectués au laboratoire de haute tension de l'université de Bejaïa.

Les essais ont été réalisés dans le but d'étudier expérimentalement les paramètres influents sur la tension de claquage de l'huile Borak 22 sous tension alternative sinusoïdale 50Hz, plusieurs paramètres d'influence seront traités à savoir ; l'influence de la montée en tension, la géométrie des électrodes, leurs nature, la distance interélectrode et l'état de l'huile.

En premier lieu, nous présentons le dispositif utilisé pour les différents essais effectués et en deuxième lieu, nous abordons la manière de traitement statistique et la façon du traçage des diagrammes de Weibull. Enfin, nous exposons les différents résultats obtenus suivis des discussions et d'interprétations.

La loi statistique de Weibull sera utilisée pour le traitement des résultats de mesures obtenues, avec un bref aperçu des résultats avec la loi Normale. En tout 1200 résultats seront traités. Pour le lissage des points, la méthode de maximum de vraisemblance sera utilisée, et en plus des intervalles de confiances à 90% pour l'encadrement des valeurs des tensions de claquage recherchées; un test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov sera utilisé pour valider et ajuster les résultats de traitement statistique obtenus.

2. Dispositifs expérimentaux

Pour la mesure de la tension de claquage, nous avons utilisé un dispositif schématisé sur la figure (Fig. 5 1). Ce dernier comporte les éléments suivants :

- ✓ Une source de tension avec plusieurs vitesses de montée de la rampe,
- ✓ Récipient cubique en verre ;
- ✓ Deux électrodes démontables, l'un pour la borne haute tension et l'autre servant comme électrode de terre,
- ✓ Un transformateur HT(T100) 0.8/135 kV. Pouvant délivrer une tension allant de 0 à 100 kV pour des essais en tension alternative et de 0 à 135 kV en tension continue,
- ✓ Un diviseur de tension capacitif ($C_0 = 0.1 \mu\text{F}$ et $C_{\mu} = 41.4 \mu\text{F}$) pour les mesures en tension alternative,

- ✓ Un voltmètre de crête (V) AC/DC de type MU11, à affichage digital permettant la mesure,
- ✓ Une résistance de protection $R=106\text{ k}\Omega$ limitant le courant,
- ✓ Enfin, l'ensemble dispositif-échantillons est entouré par une cage de protection.

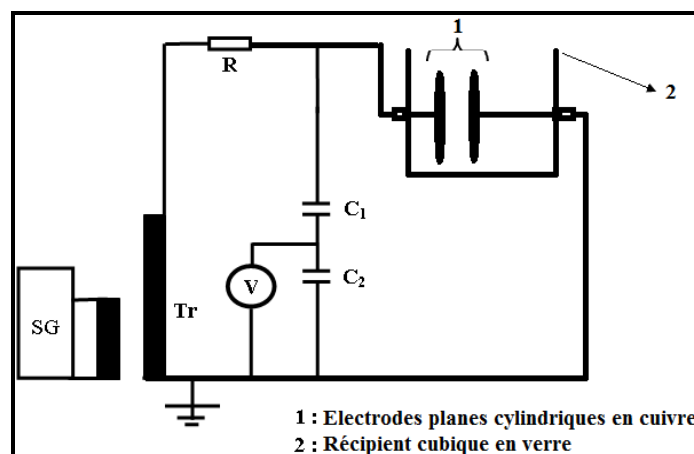


Fig. 5.1 Schéma de dispositif des essais de claquage sous tension alternative sinusoïdale.

3. Déroulement des essais

Plusieurs natures et configurations d'électrodes, plusieurs vitesses de tension appliquée et plusieurs distances interélectrodes, sont prises en considération lors des essais de claquage dans l'huile. Parfois, pour élucider l'influence de la vitesse, l'influence de la géométrie des électrodes, l'influence de la distance interélectrodes ou encore la nature des électrodes, le procédé expérimental doit être adapté à cette nouvelle configuration.

Les essais consistent à appliquer une tension électrique (selon le paramètre d'influence choisi et étudié) 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 l'huile, la valeur de la tension de claquage est directement affichée sur le voltmètre de crête MU11.

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

La rupture étant un phénomène aléatoire [21,22], il est indispensable de refaire l'essai 50fois jusqu'au claquage, et cela pour chaque type de configuration et pour chaque vitesse.

La cellule de mesure, la forme et géométrie des électrodes sont schématisée dans les (.fig. 5. 2et fig. 5. 3).

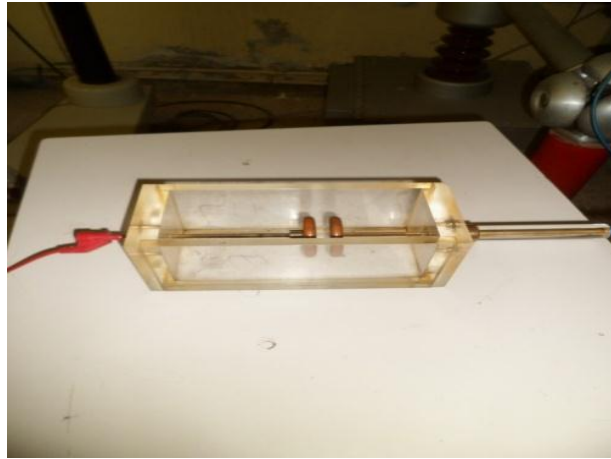


Fig. 5. 2 Cellule utilisée pour les mesures



A/Différentes natures

B/Différentes géométries

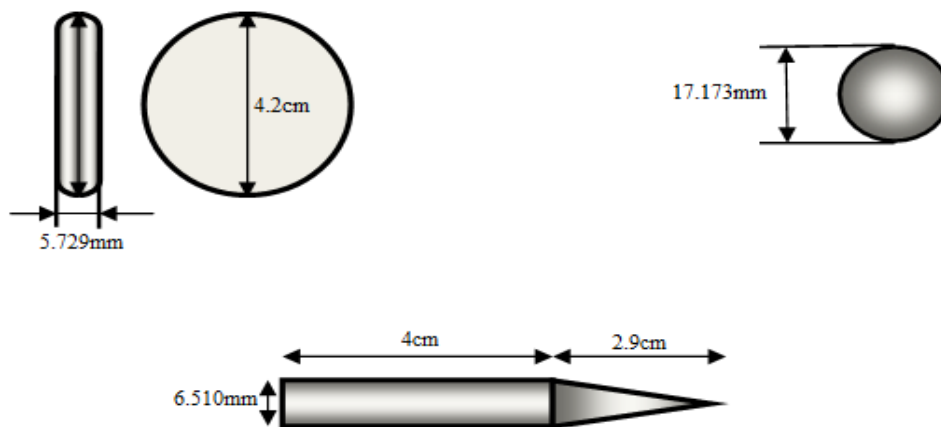


Fig. 5.3 Différents nature, géométries et dimensions des différentes électrodes utilisées

Traitement statistique

Après avoir classé les valeurs de la tension de claquage par ordre croissant, on a choisi la méthode des rangs médians, pour le traçage des différents diagrammes.

On a choisi la méthode du maximum de vraisemblance pour le lissage des points expérimentaux donc pour le calcul des différents paramètres de la loi étudiée.

Nous avons considéré des intervalles de confiance à 90% où l'on prend un risque de 10% pour voir un point extérieur aux intervalles appartenir à la distribution.

4. Résultats et discussions

4.1 Influence de la vitesse de la rampe de tension

Dans cette partie on a étudié comment la vitesse de la rampe influe sur la tension de claquage, tel que pour une distance interélectrode de 0.5cm et des surfaces plan en cuivre, on a varié la vitesse de la rampe de tension, Pour chaque vitesse, 50 essais ont été effectués.

4.1.1 Diagrammes de Weibull

La (fig. 5.4) jusqu'a (fig. 5.9); représentent les diagrammes de Weibull à deux paramètres avec des intervalles de confiance à 90%, pour les différentes vitesses de montée de la rampe.

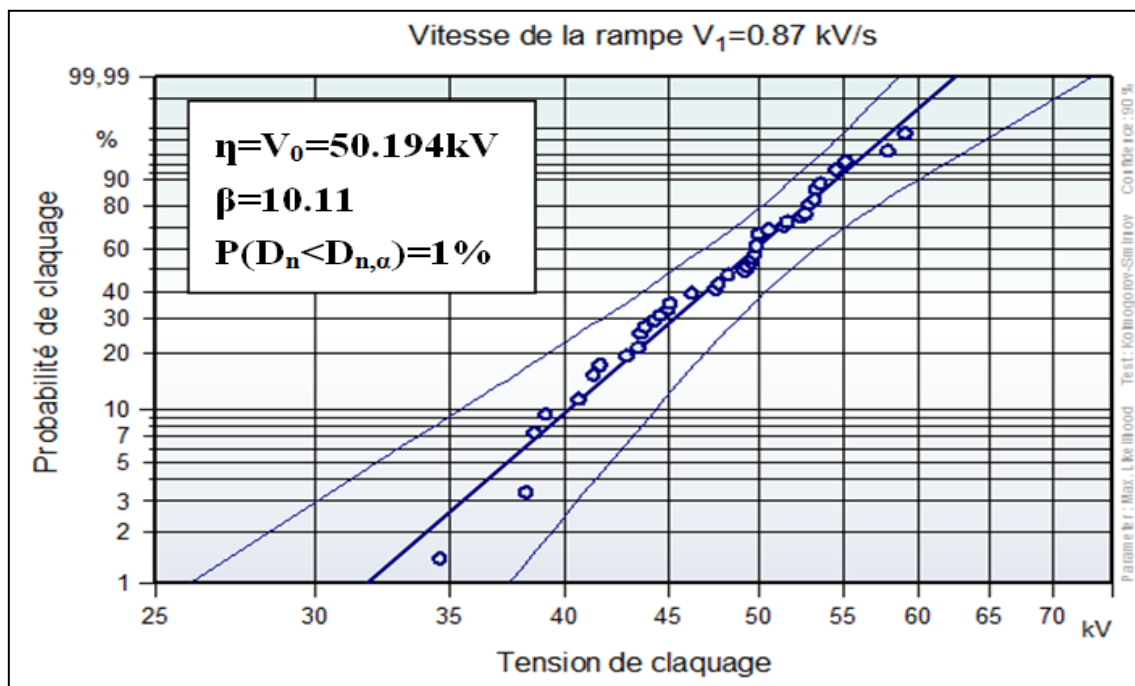


Fig. 5.4 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe $V_1=0.87$ kV/s

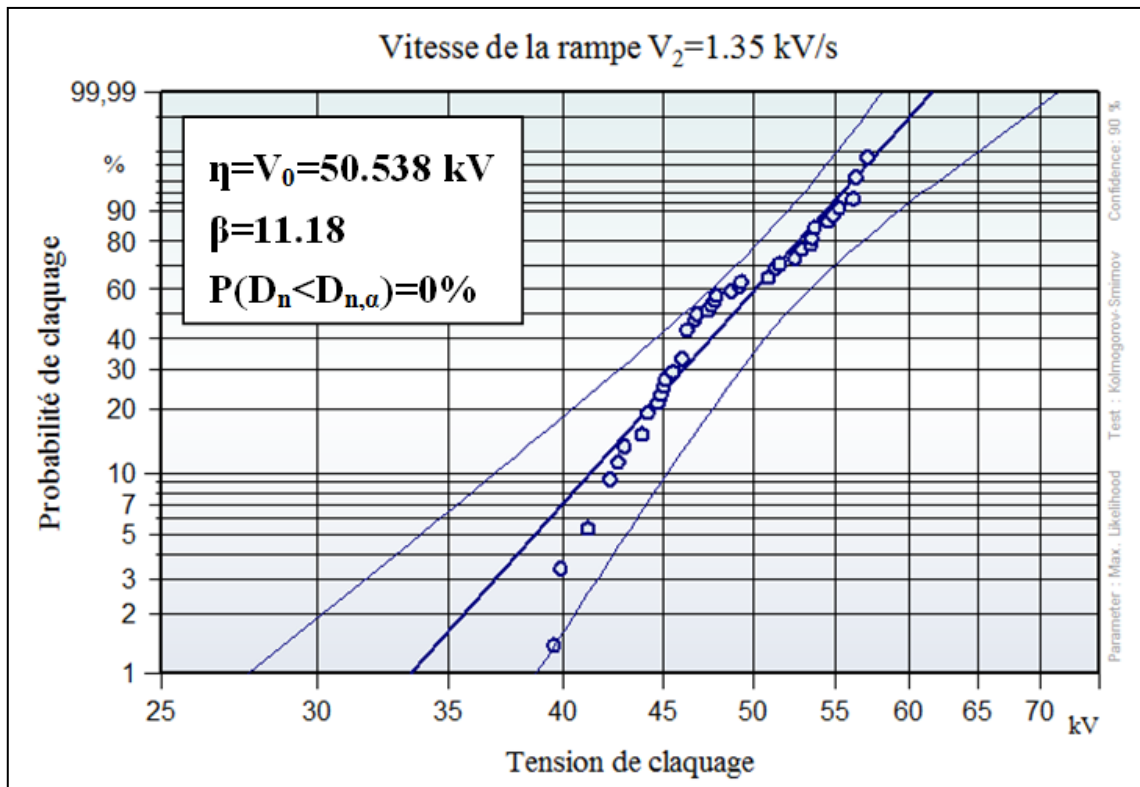


Fig. 5.5 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe $V_2=1.35$ kV/s

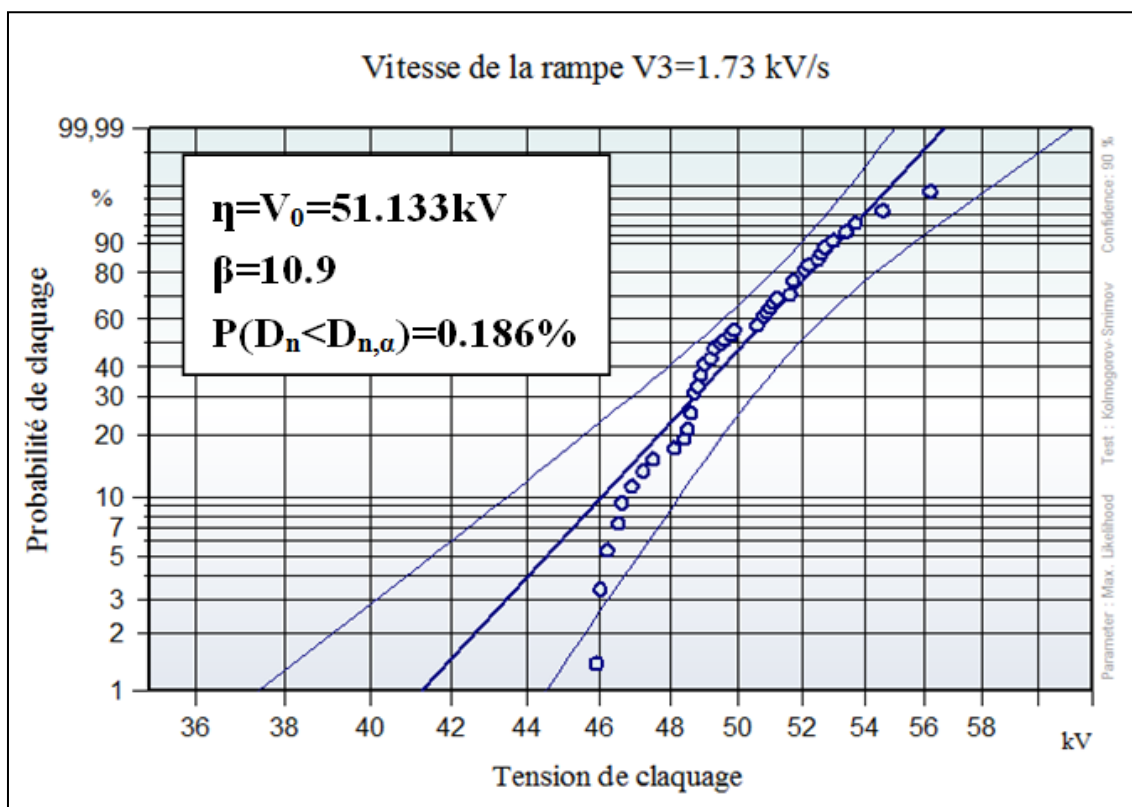


Fig. 5.6 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe $V_3=1.73$ kV/s

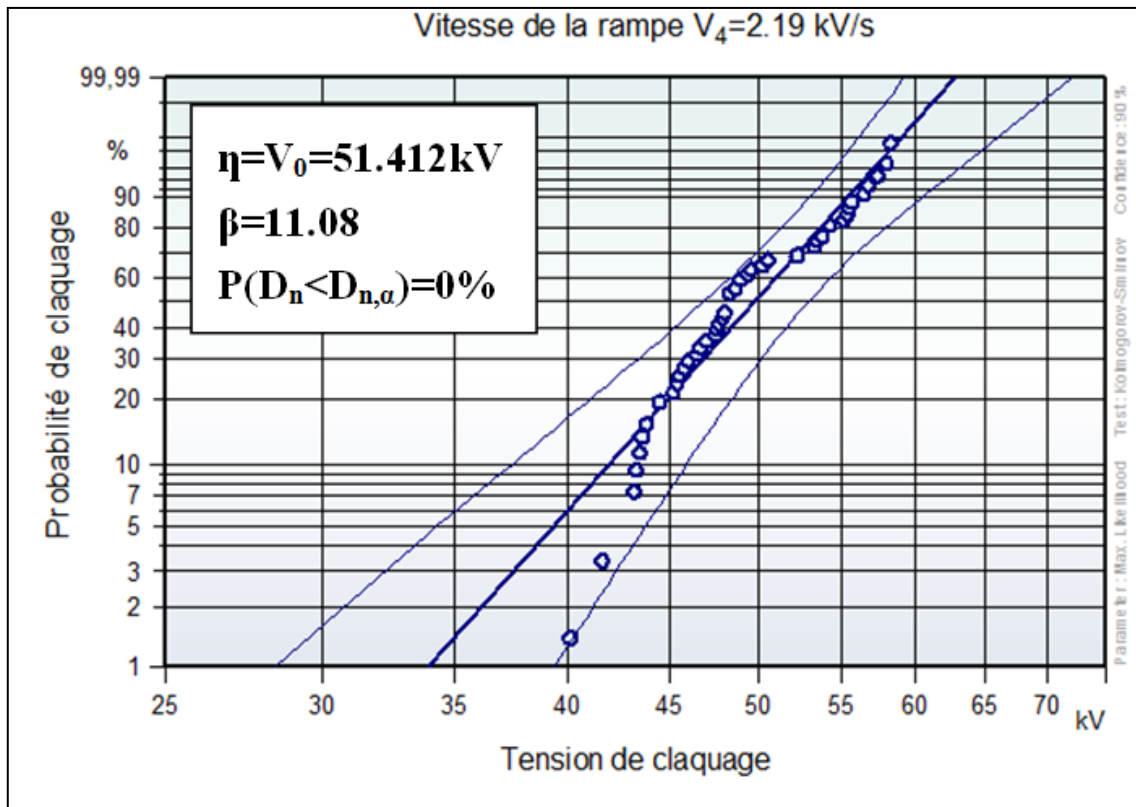


Fig. 5.7 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe $V_4=2.19$ kV/s

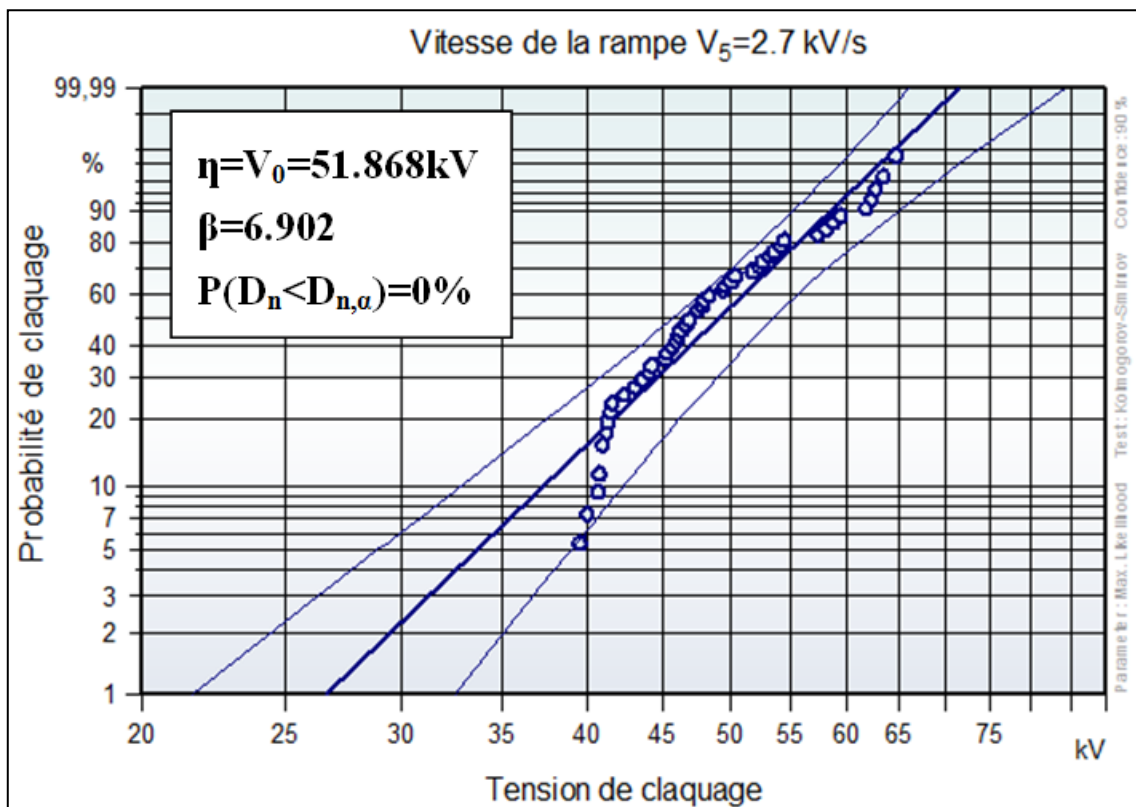


Fig. 5.8 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe $V_5=2.7$ kV/s

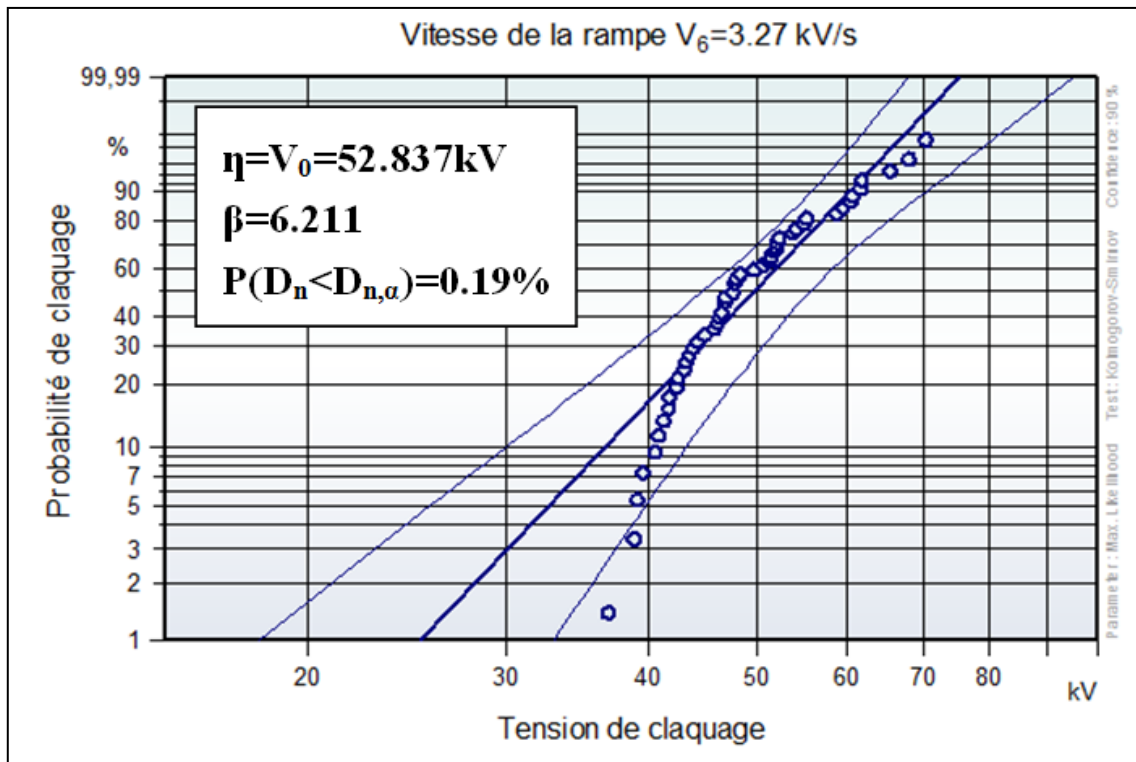


Fig. 5.9 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une vitesse de montée de la rampe $V_6=3.27\text{kV/s}$

Les différents résultats des paramètres de Weibull à deux paramètres ainsi que les résultats de test d'adéquation de Kolmogorov–Smirnov, sont représentés dans le (Tab. 5.1) suivant:

Influence de la vitesse Tension AC; 50HZ Distance $d=0.5$ cm Nature des électrodes (Cuivre) Géométrie des électrodes (Plan-plan)							
Vitesses (kV/s)		$V_1=0.87$	$V_2=1.35$	$V_3=1.73$	$V_4=2.19$	$V_5=3.27$	$V_6=3.73$
Traitement statistique							
Modèle de la loi normale	Vmoy (kV)	47.8	48.38	50.01	49.216	48.674	49.368
	β	10.11	11.18	10.9	11.08	6.902	6.211
Modèle de Weibull	η (kV)	50.194	50.538	51.133	51.412	51.868	52.837
	Test K-S: $P(D_n < D_{n,\alpha})$	1%	0%	0%	0%	0%	0.19%

Tab. 5.1 Résultats de traitement statistique en fonction de la vitesse de montée de la rampe de tension

Depuis ce tableau, on a tracé la courbe de la (Fig. 5.10), qui représente l'influence de la rampe de tension appliquée sur la tension de claquage de l'huile.

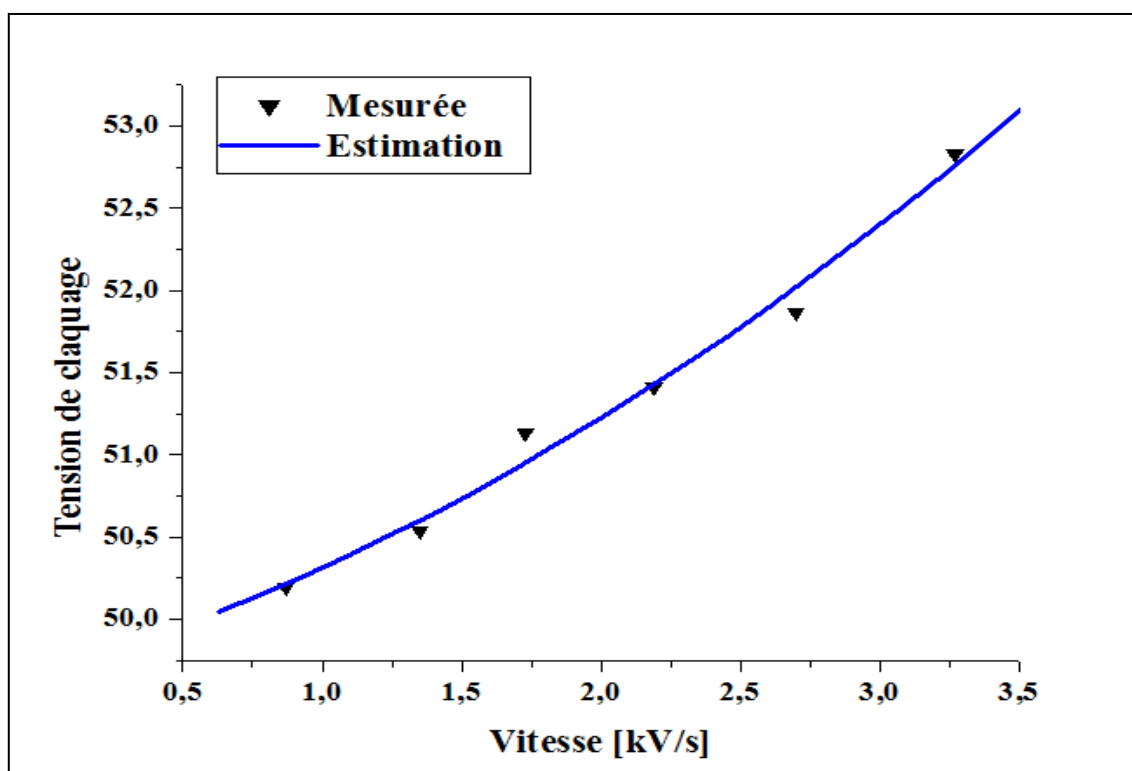


Fig. 5.10 influence de la vitesse de tension de la rampe

Il apparaît que la vitesse de montée de la rampe de tension appliquée à l'isolant joue un rôle important. On note que la tension nominale de rupture prend une forme exponentielle qui correspond à des vitesses sensiblement plus élevées.

Dans la perspective de l'existence du temps de conditionnement au cours duquel s'opère l'accumulation de défauts et charges provoquant la rupture. On peut consentir, à priori, que l'accroissement de la raideur de la rampe, diminuant 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 milieu. On tend progressivement vers un claquage intrinsèque. Donc, si la durée d'application de tension diminue, la tension de claquage augmente. 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. Et plus la durée d'application augmente, plus l'effet des différentes impuretés se fait ressentir et la tension de claquage diminue.

4.2 Influence de la distance interélectrode

Nous avons étudié l'influence de la distance interélectrodes dans la configuration d'électrodes pointe-pointe en cuivre pour différentes distances interélectrode de 0.25 cm à 1.25 cm avec un pas de 0.25 cm, on appliquant pour chaque distance une tension alternative sinusoïdale de fréquence 50Hz et de vitesse de rampe moyenne de 2.19kV/s.

4.2.1 Diagrammes de Weibull

La (fig. 5.11) jusqu'à la (fig. 5.15); représentent les diagrammes de Weibull à deux paramètres avec des intervalles de confiance à 90%, différentes distances interélectrodes.

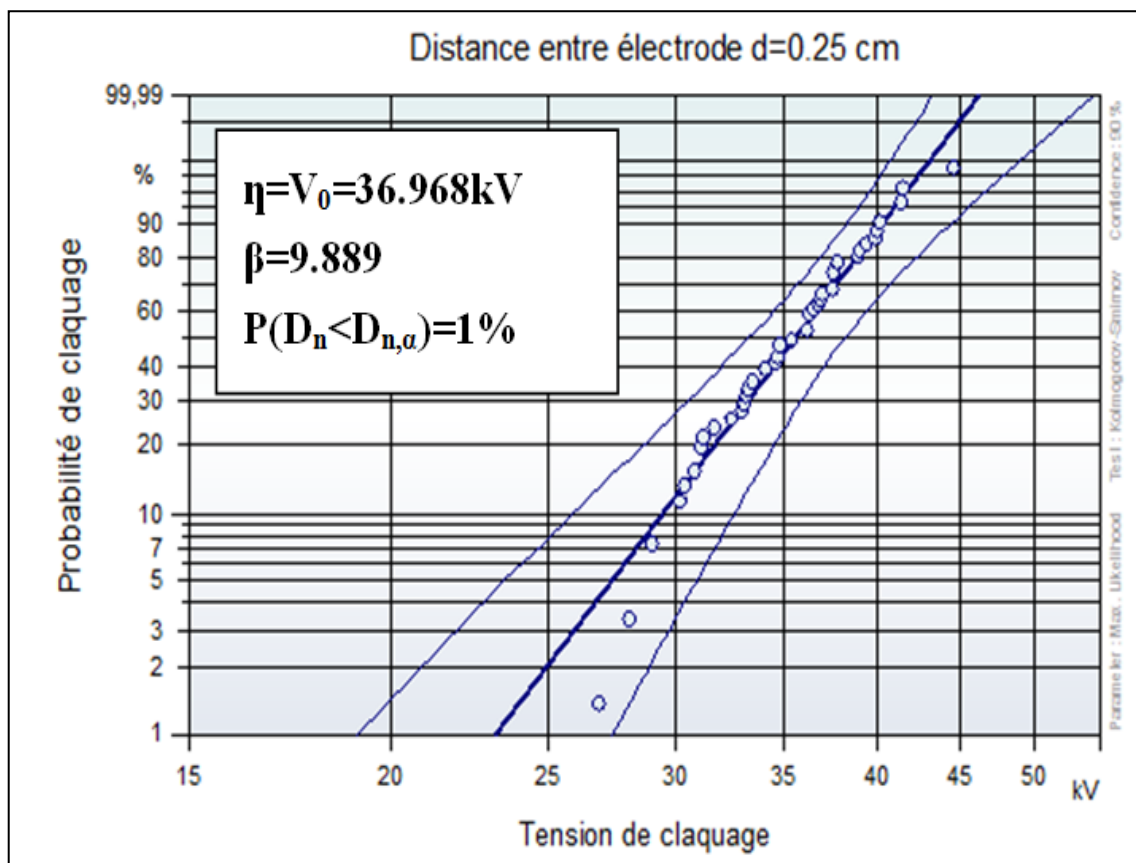


Fig. 5.11 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour la distance d=0.25 cm

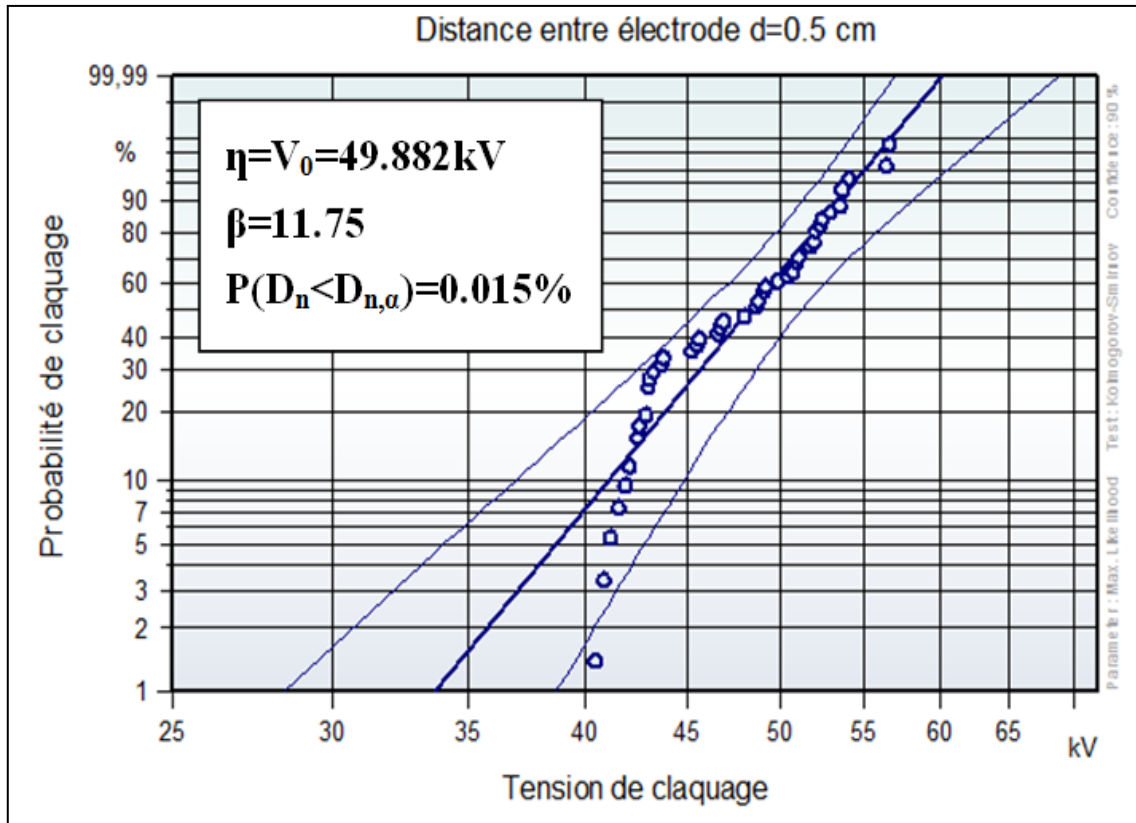


Fig. 5.12 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour la distance d=0.5 cm

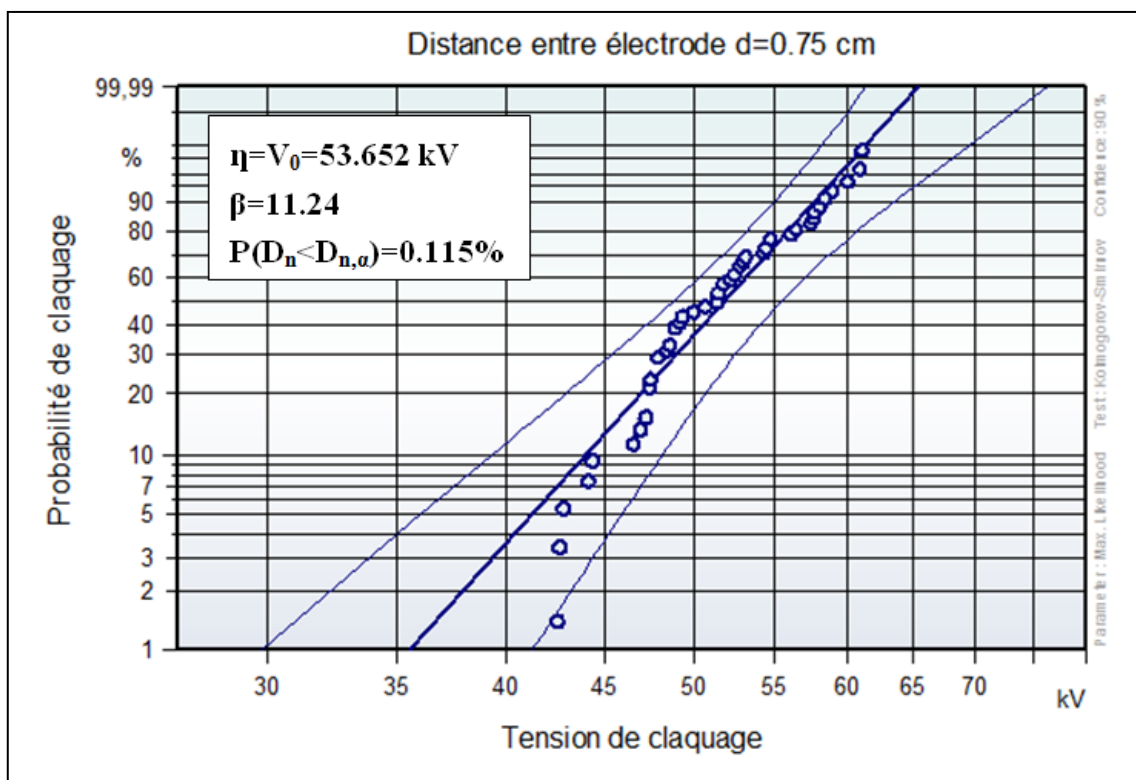


Fig. 5.13 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour la distance d=0.75 cm

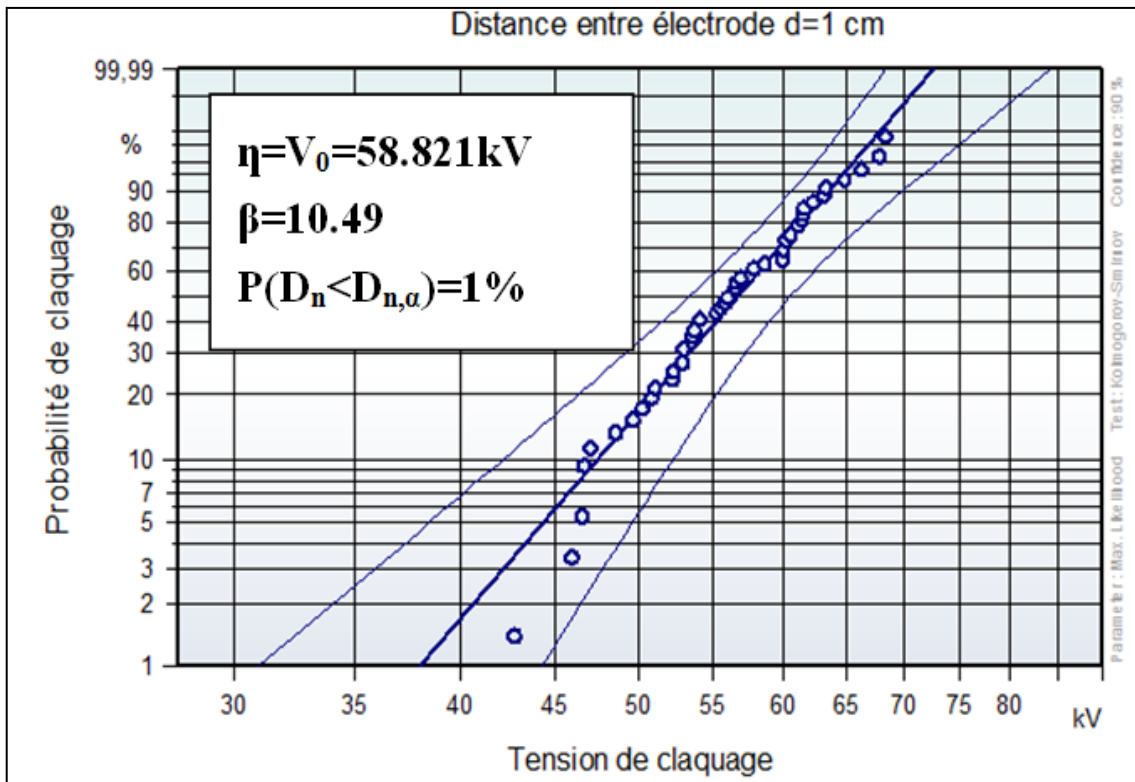


Fig. 5.14 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour la distance d=1 cm

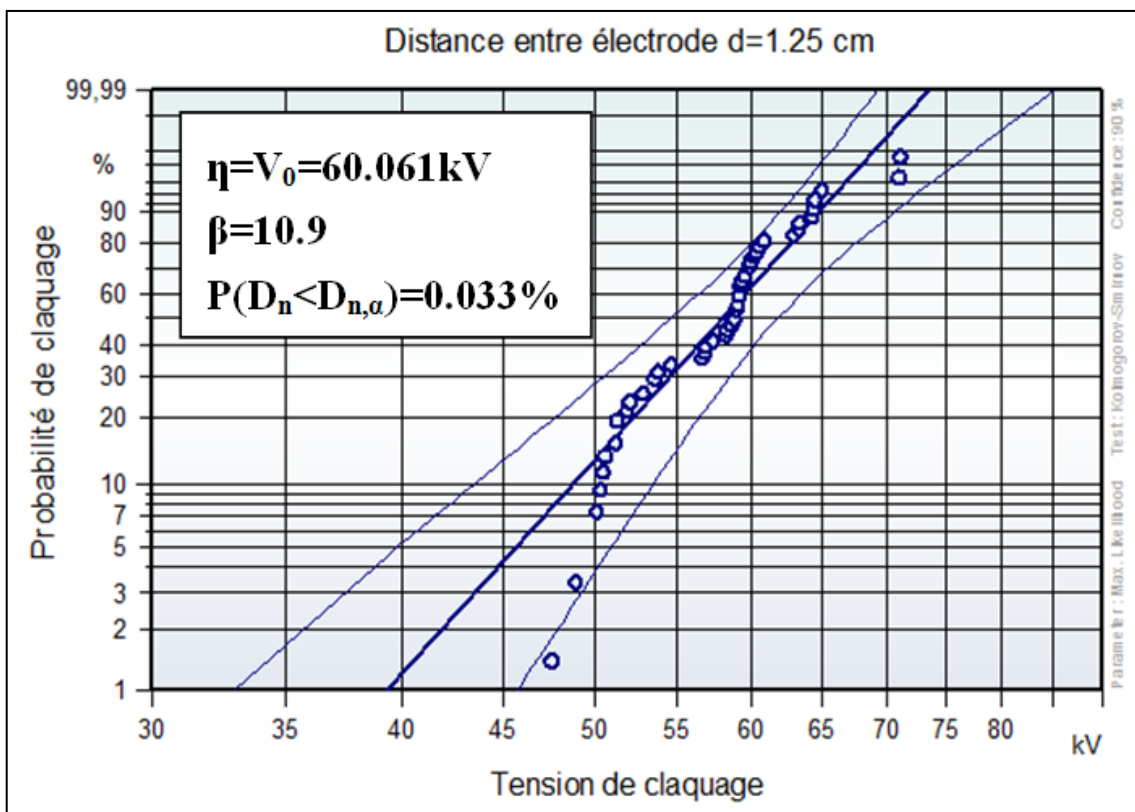


Fig. 5.15 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour la distance d=1.25 cm

Les différents résultats des paramètres de Weibull à deux paramètres ainsi que les résultats de test d'adéquation de Kolmogorov – Smirnov, sont représentés dans le (Tab.5.2)

Influence de la distance Tension AC; 50Hz Vitesse= 1.73 kV/s Géométrie des électrodes (Pointe-pointe) Nature des électrodes (Cuivre)						
Distance		0.25cm	0.5cm	0.75cm	1cm	1.25cm
Traitement statistique						
Avec le modèle de la loi normale	Vmoy (kV)	35.23	47.8	51.402	56.154	57.588
	β	9.889	11.75	11.24	10.49	10.9
Avec le modèle de Weibull	η (kV)	36.968	49.882	53.652	58.821	60.061
	Test K-S: $P(D_n < D_{n,\alpha})\%$	1	0.015	0.115	1	0.033

Tab. 5.2 Résultats des paramètres de Weibull et des deux tests d'adéquation pour différentes distances

D'après ces résultats, on aura la courbe de la figure suivante:

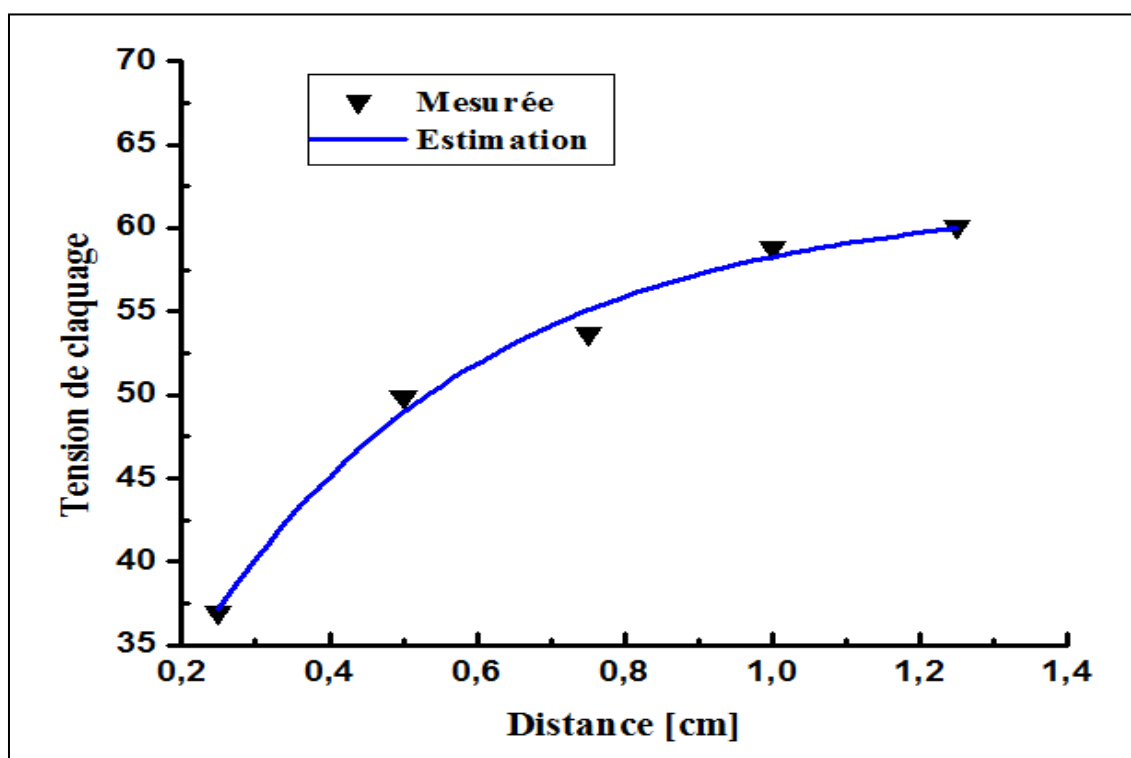


Fig. 5.16 Influence la distance interélectrode

En ce qui concerne l'influence de la distance interélectrodes, celle-ci apparaît clairement sur la (Fig. 5.16). On voit clairement l'augmentation de la tension de claquage en fonction de la distance interélectrodes, d'où on déduit la proportionnalité de la tension par rapport à la distance « d ».

4.3 Influence de la géométrie des deux électrodes

Les électrodes utilisées pour nos expériences sont de nature en cuivre. Trois formes ou géométries sont présent en considération, telles; pointe, plan et sphère, où on a combiné entre elles pour avoir toutes les configurations possible, telles que (pointe-pointe, pointe-plan, pointe-sphère, ... etc), avec une distance interélectrode de 0.5cm et toujours avec la nature de cuivre.

4.3.1 Géométrie similaire des deux électrodes

4.3.1.1 Diagrammes de Weibull

La (fig. 5.17) jusqu'au (fig. 5.19); représentent les diagrammes de Weibull à deux paramètres pour différentes configurations des électrodes (sphère-sphère ; pointe-pointe ; plan-plan) avec le test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov

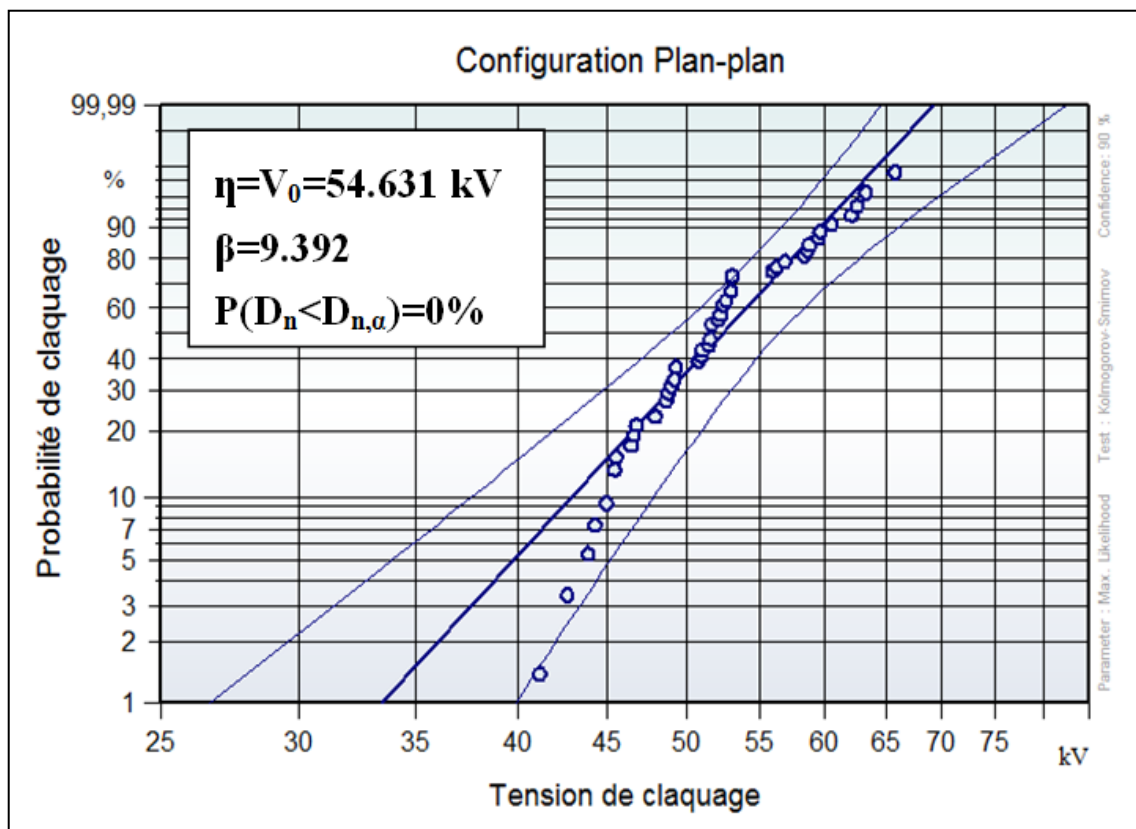


Fig. 5.17 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode plan-plan

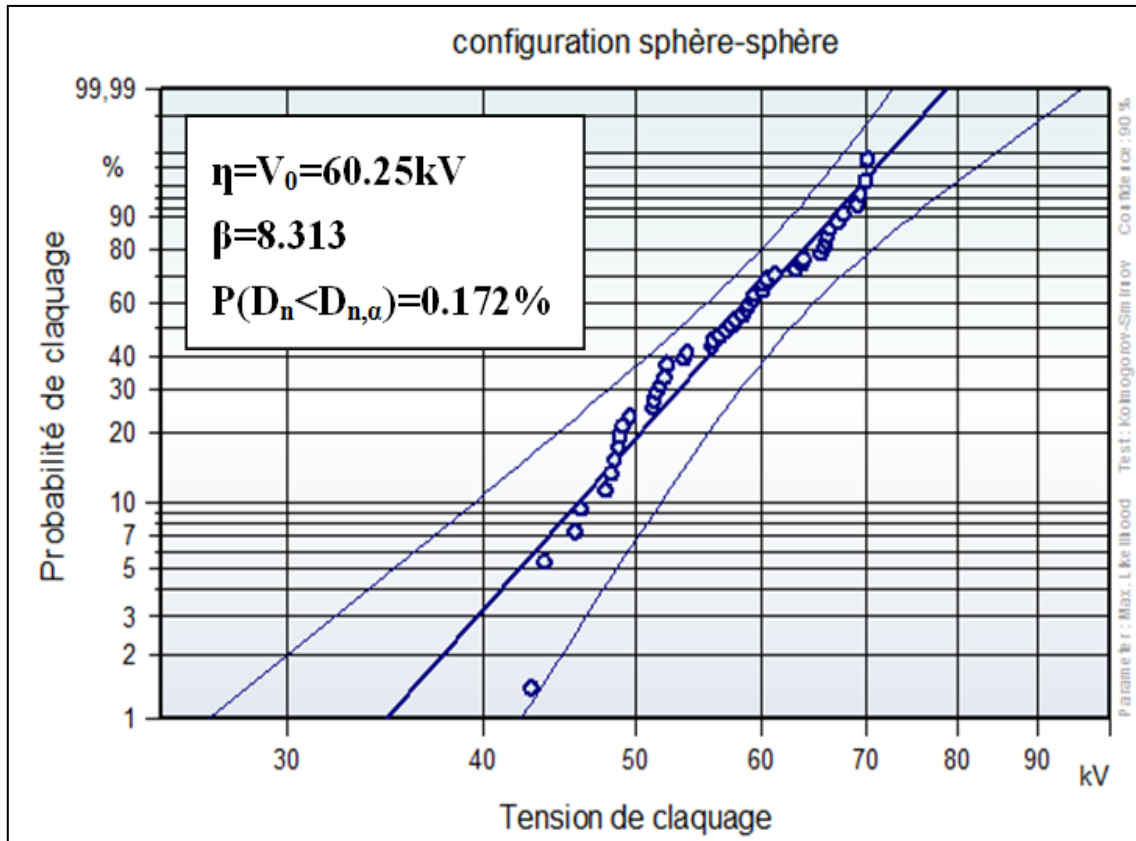


Fig. 5.18 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode sphère-sphère

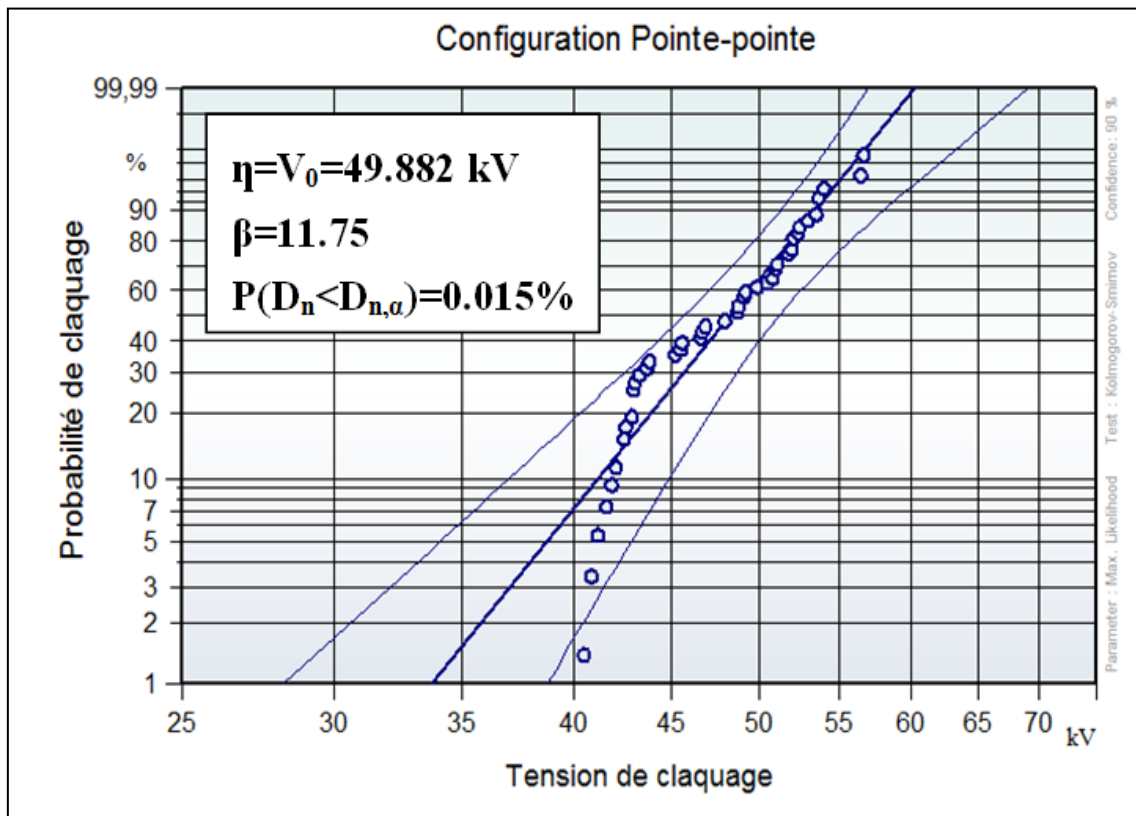


Fig. 5.19 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode pointe-pointe

Les différents résultats des paramètres de Weibull à deux paramètres ainsi que les résultats de teste d'adéquation de Kolmogorov – Smirnov, sont représentés dans le (Tab. 5.3)

Influence de la Géométrie similaire pour les deux électrodes				
Tension AC; 50Hz				
Nature des électrodes : Cuivre				
Distance d=0.5cm				
Vitesse v=1.73 kV/s				
Géométries des électrodes		Pointe-Pointe	Sphère-Sphère	Plan-Plan
Traitement statistique				
Avec le modèle de la loi normale	Vmoy (kV)	47.8	56.864	50.01
Avec le modèle de Weibull	β	11.75	8.313	9.392
	η (kV)	49.882	60.25	54.631
Test K-S: $P(D_n < D_{n,a})\%$		0.015	0.172	0

Tab. 5.3 Résultats des paramètres de Weibull et de test d'adéquation pour une configuration d'électrodes similaires

Dans la (fig. 5.20), sont représentés les diagrammes de Weibull à deux paramètres pour différentes géométries similaires d'électrodes.

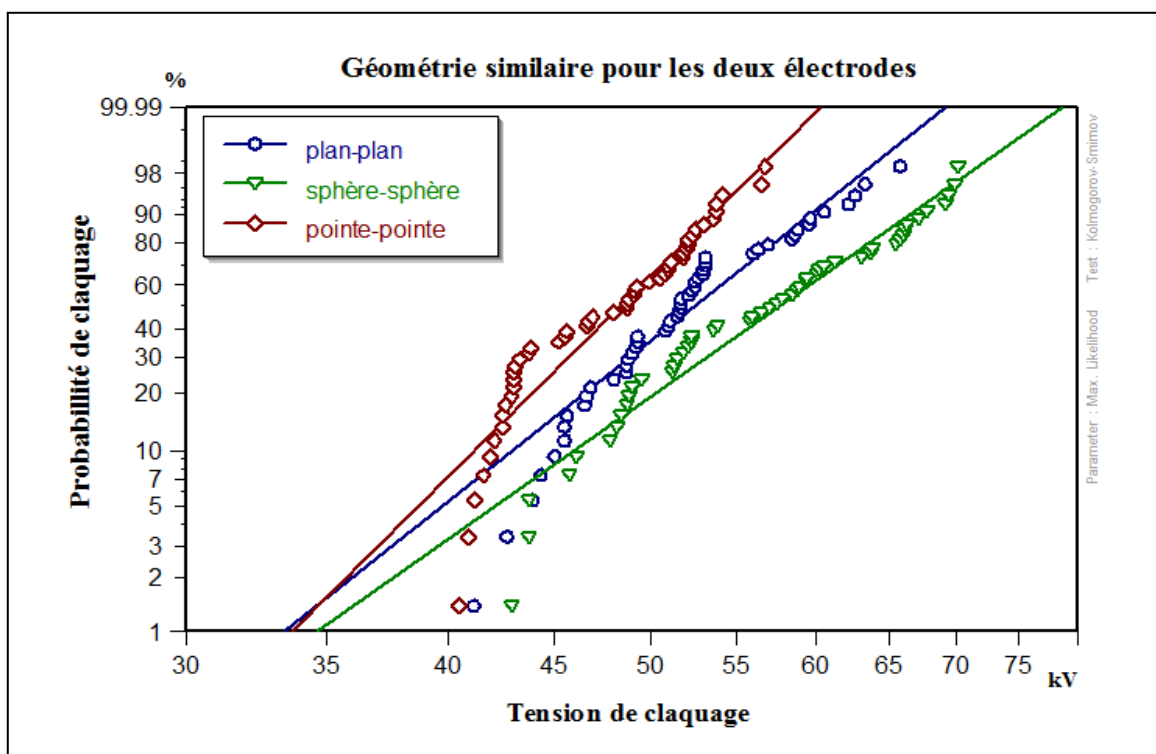


Fig. 5.20 Diagrammes de Weibull à deux paramètres pour différente configuration des électrodes

La figure (5.20) montre l'évolution de la tension de claquage pour différentes configurations géométriques similaires des deux électrodes. De ce résultat, il en ressort que la tension de claquage est plus élevée pour un système sphère-sphère et moins importante pour le système pointe-pointe. Surement du à l'influence de l'effet de pointe sur la tension de claquage. Même si le rayon de courbure d'électrode est plus important en configuration sphérique qu'on configuration plane, la tension de claquage est plus importante en système sphère-sphère qu'on système plan-plan, cela est peut être dû à la faible distance d'interélectrodes par rapport au rayon d de la sphère considéré: (0.5/1.5) cm.

4.3.2 Géométrie de l'électrode active en sphère

La fig. (5.21) jusqu'au fig. (5.23) représentent les diagrammes de Weibull à deux paramètres pour différentes configurations des électrodes actives en sphère talquent (sphère-sphère ; sphère-pointe-; sphère-plan) avec le test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov.

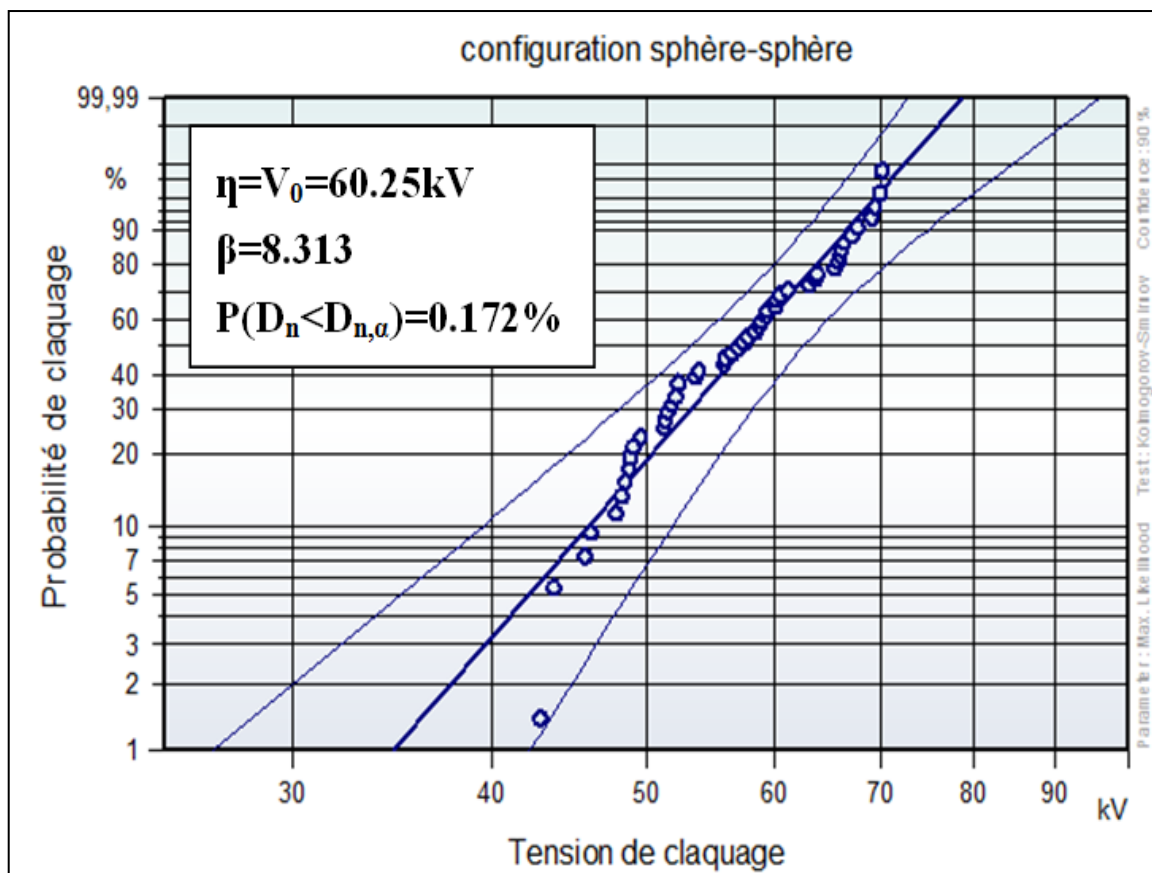


Fig. 5.21 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode sphère-sphère

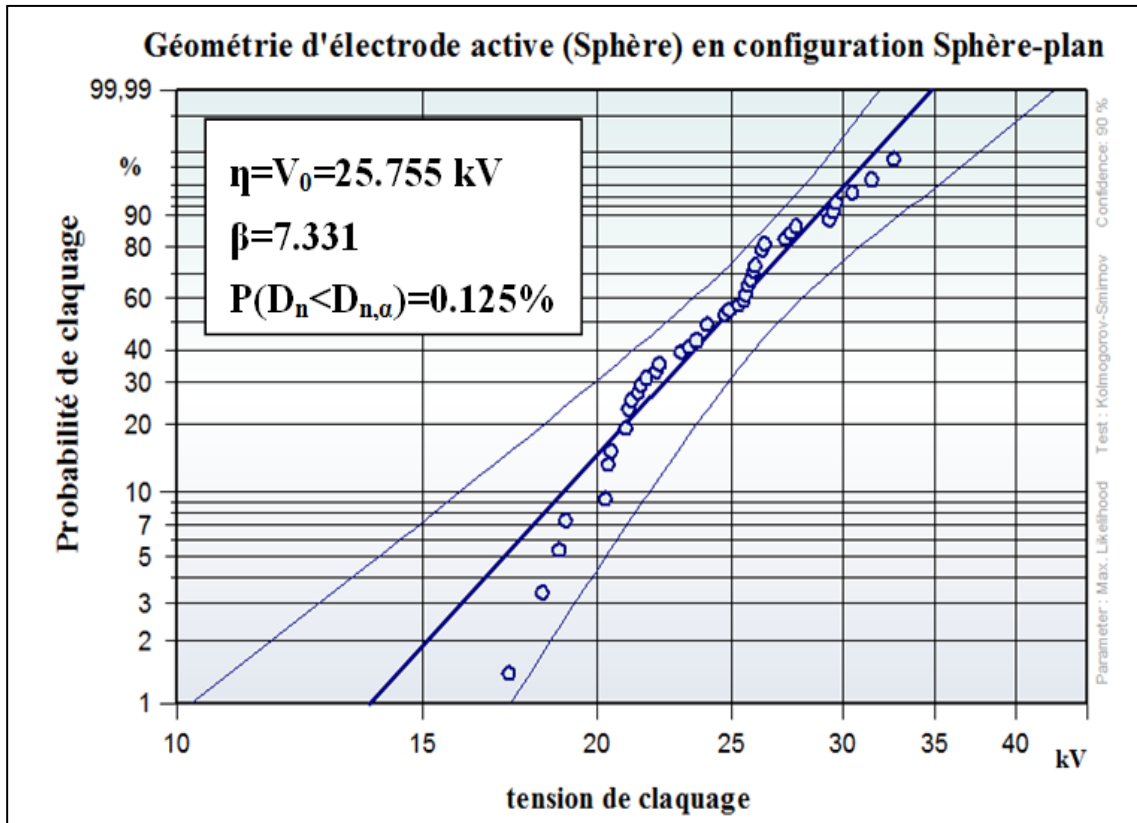


Fig. 5.22 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode sphère-plan

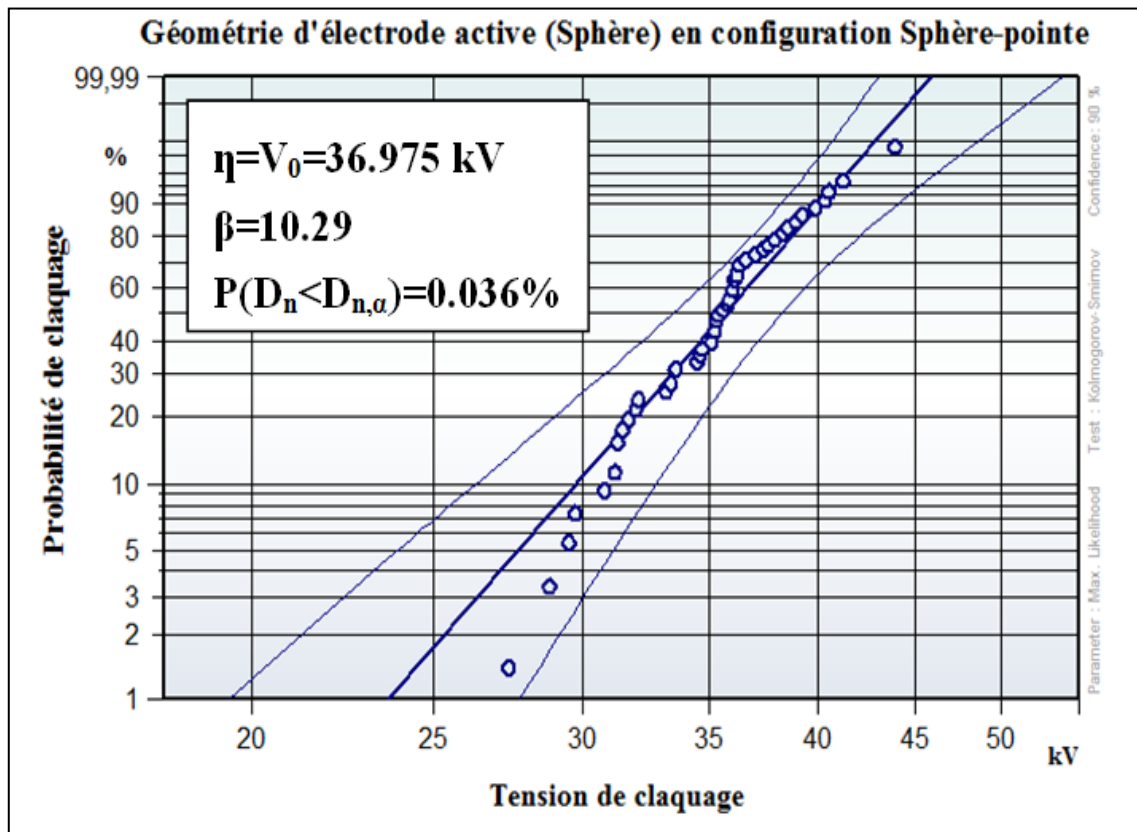


Fig. 5.23 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode sphère-pointe

Les différents résultats des paramètres de Weibull à deux paramètres ainsi que les résultats de test d'adéquation de Kolmogorov – Smirnov, sont représentés dans le (Tab 5.4)

Influence de la Géométrie de l'électrode active en sphère Tension AC; 50Hz Nature des électrodes (Cuivre) Distance d=0.5cm Vitesse v=1.73 kV/s				
Géométries des électrodes		Sphère-sphère	sphère-plan	sphère-pointe
Traitement statistique				
Avec le modèle de la loi normale	Vmoy (kV)	56.864	24.226	35.354
Avec le modèle de Weibull	β	8.313	7.331	10.29
	η (kV)	60.25	25.754	36.974
Test K-S: $P(D_n < D_{n,\alpha})\%$		0.172	0.125	0.036

Tab. 5.4 Résultats des paramètres de Weibull et de test d'adéquation pour une configuration d'électrodes active (sphère)

D'après ces résultats, on aura la fig. (5. 24), qui représente les diagrammes de Weibull pour différentes configurations d'électrodes, lorsque l'électrode active est sphérique.

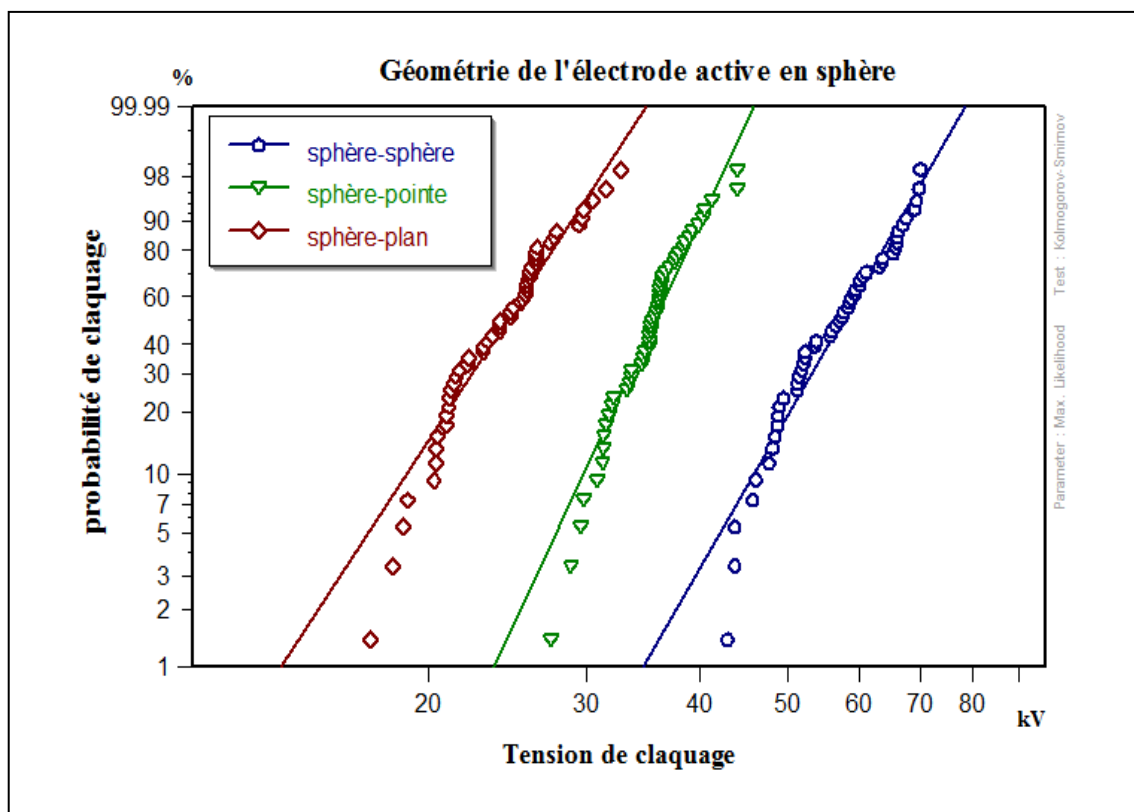


Fig. 5.24 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode active sphérique.

D'après cette figure, on remarque que la tension de claquage est plus élevée lorsque l'électrode passive est de la même géométrie que l'électrode active. Et que cette tension est moins importante lorsque l'électrode passive est plane.

4.3.3 Géométrie pointe de l'électrode active en pointe

La fig. (5.25) jusqu'au fig (5.27) représentent les diagrammes de Weibull à deux paramètres pour différentes configurations des électrodes actives en pointe tells: (pointe-pointe ; -pointe-sphère; pointe-plan) avec le test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov

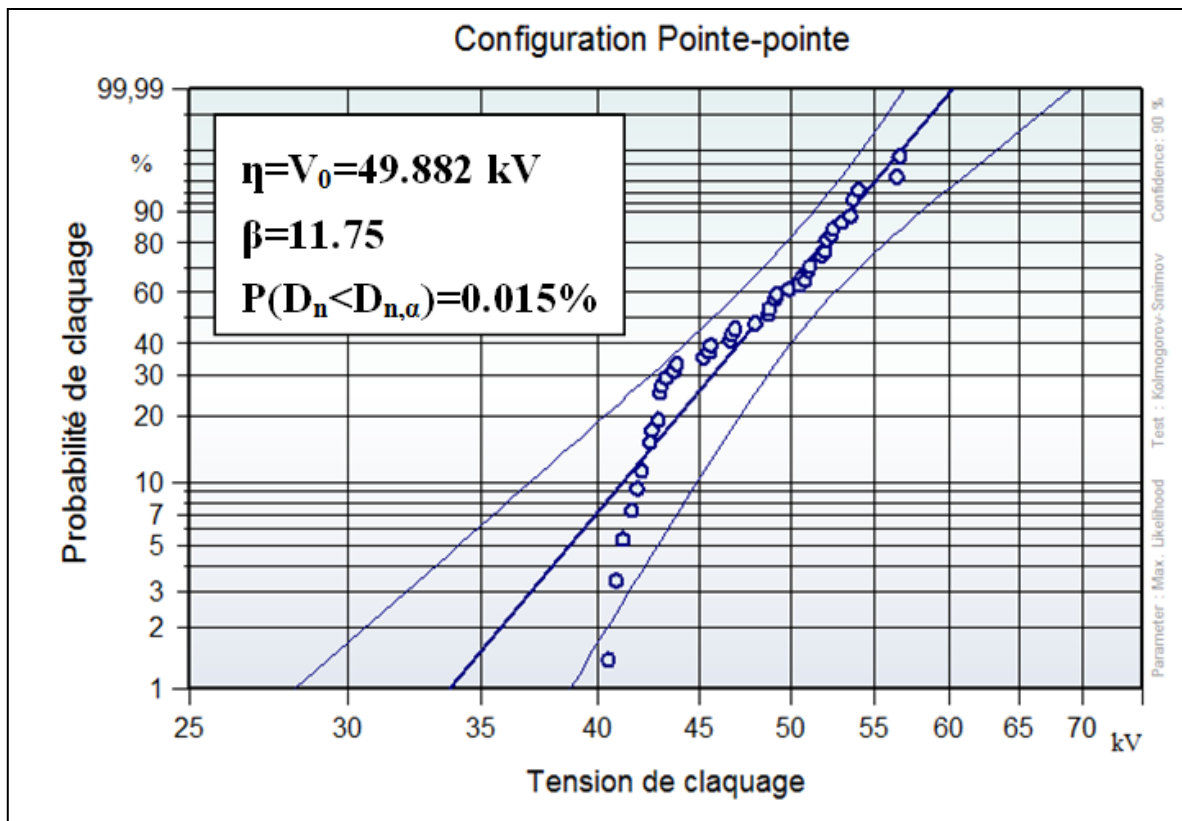


Fig. 5.25 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode pointe-pointe

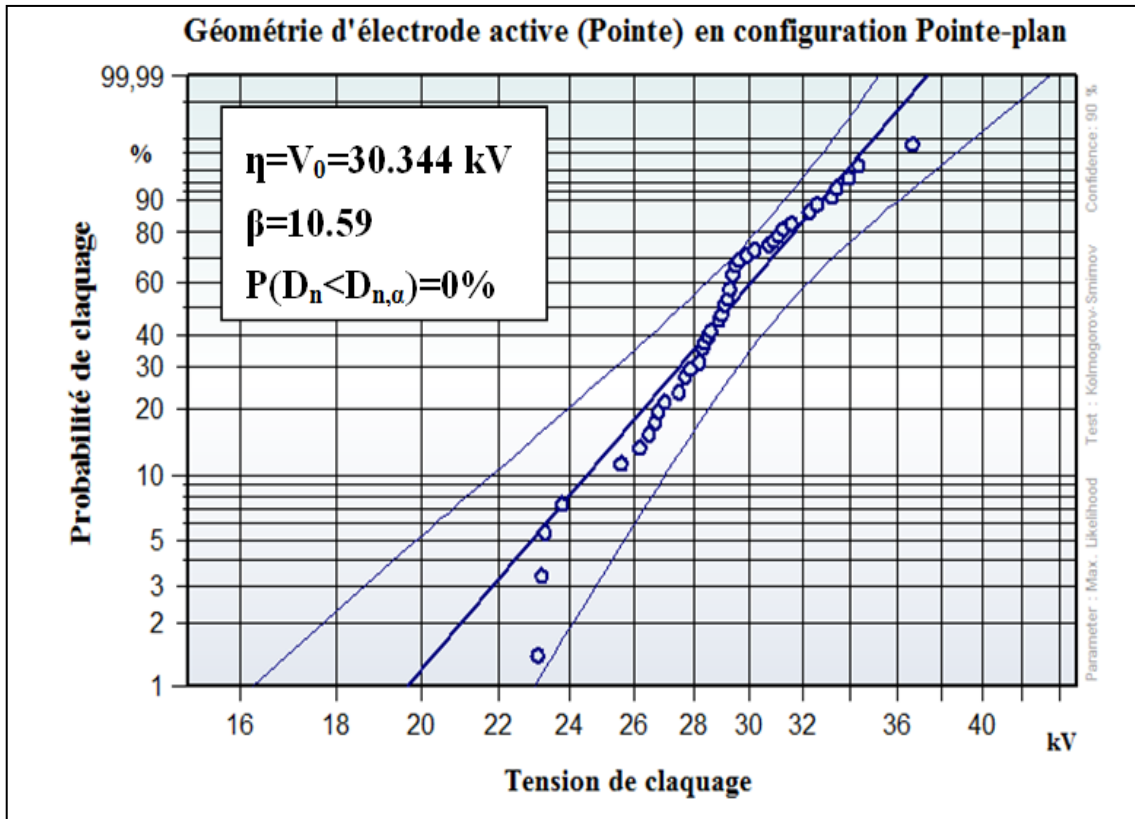


Fig. 5.26 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode pointe-plan

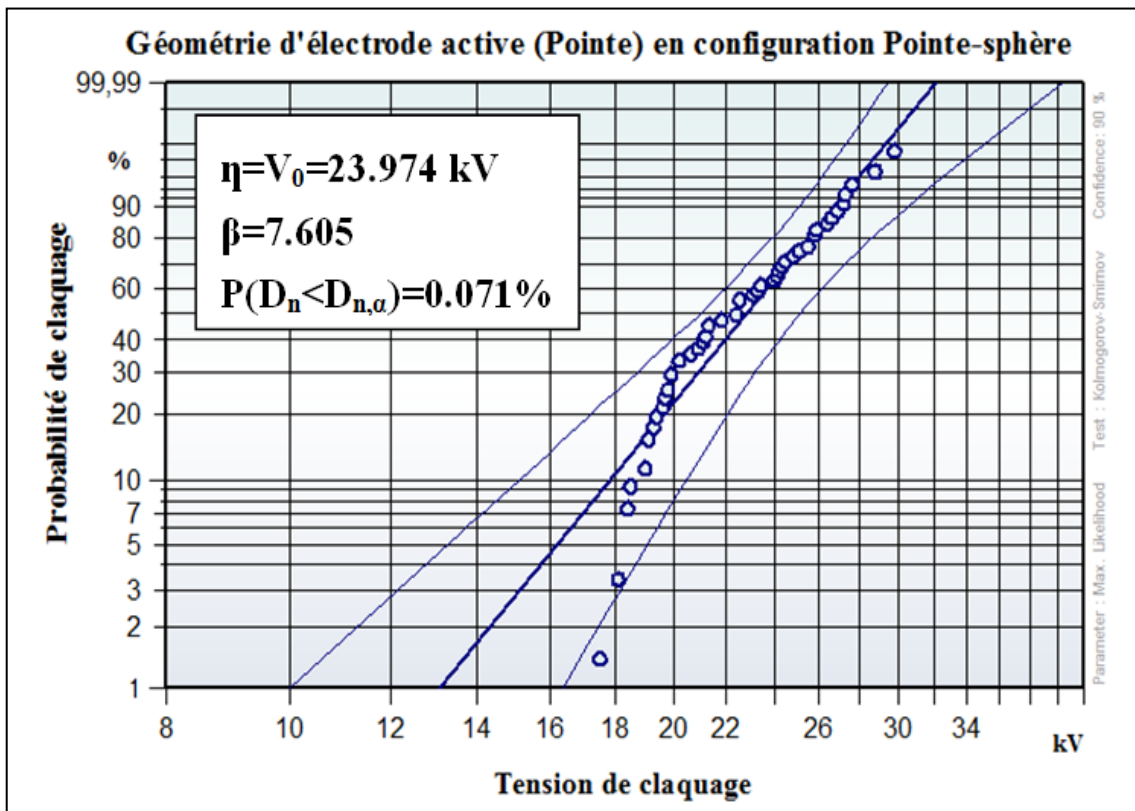


Fig. 5.27 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode pointe-sphère

Les différents résultats des paramètres de Weibull à deux paramètres ainsi que les résultats de test d'adéquation de Kolmogorov – Smirnov, sont représentés dans le (Tab 5.5)

Influence de la Géométrie de l'électrode active en pointe Tension AC; 50Hz Nature des électrodes (Cuivre) Distance d=0.5cm Vitesse v=1.73 kV/s				
Géométries des électrodes		Pointe-Pointe	Pointe-Sphère	Pointe-Plan
Traitement statistique				
Avec le modèle de la loi normale	Vmoy (kV)	47.8	22.572	29.058
Avec le modèle de Weibull	β	11.75	7.605	24.536
	η (kV)	49.882	23.973	30.344
Test K-S: $P(D_n < D_{n,\alpha})\%$		0.015	0.071	0

Tab. 5.5 Résultats des paramètres de Weibull et de test d'adéquation pour une configuration d'électrodes active (pointe)

D'après ces résultats, on aura la fig. (5. 28), qui représente les diagrammes de Weibull pour différentes configurations d'électrodes, lorsque l'électrode active est une pointe.

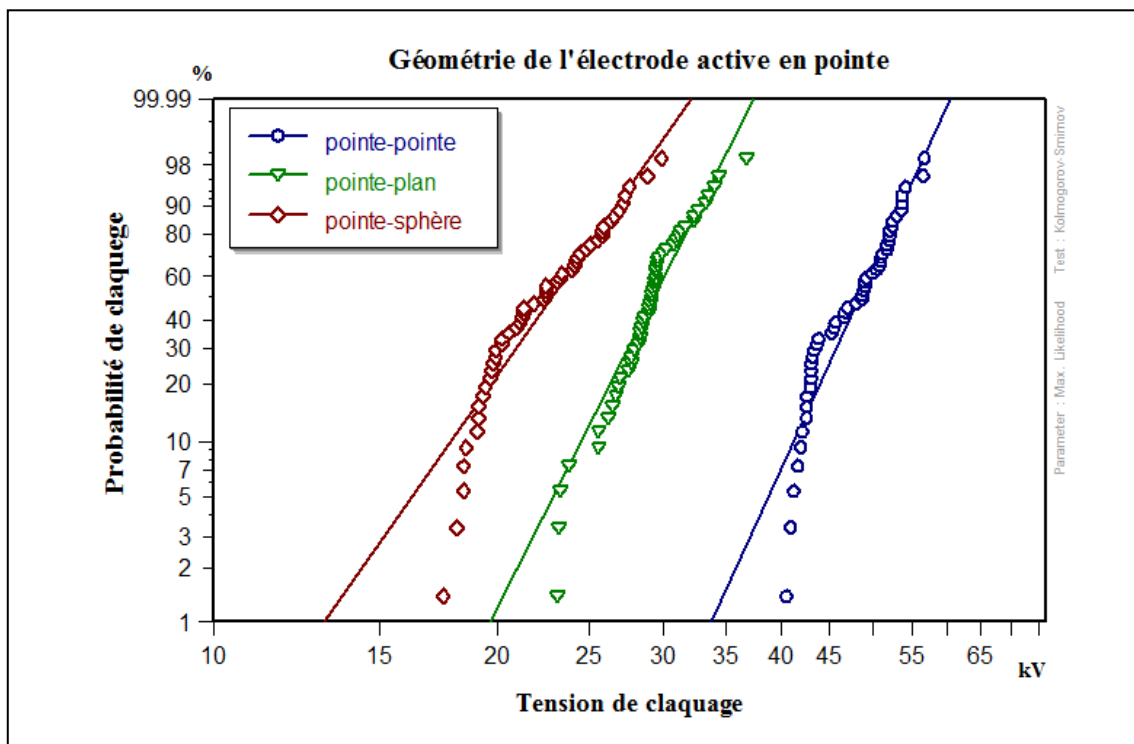


Fig. 5.28 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode active (pointe)

D'après cette figure, on remarque que la tension de claquage est plus élevée lorsque l'électrode passive est de la même géométrie que l'électrode active. Et que cette tension est moins importante lorsque l'électrode passive est sphérique.

4.3.4 Géométrie plane de l'électrode active en plan

La fig. (5.29) jusqu'au fig. (5.31) représentent les diagrammes de Weibull à deux paramètres pour différentes configurations des électrodes actives ne plan talque (plan-plan; - plan -sphère; plan-pointe) avec le test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov.

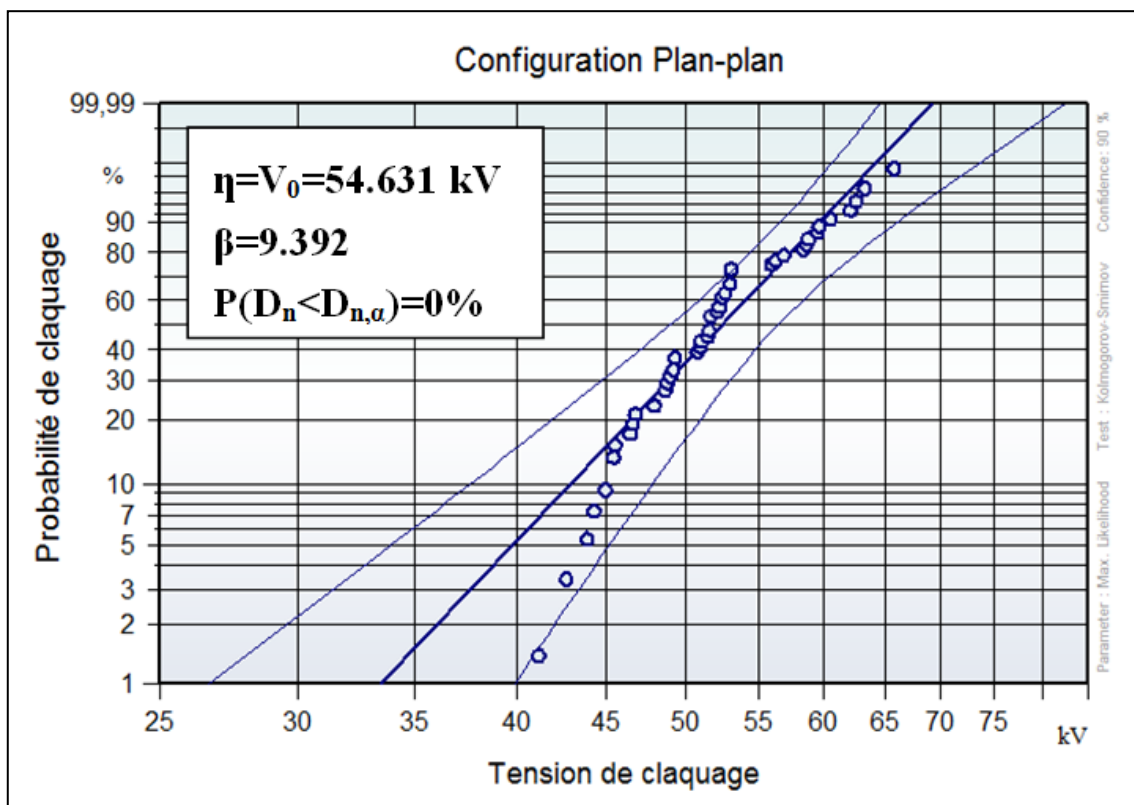


Fig. 5.29 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode plan-plan

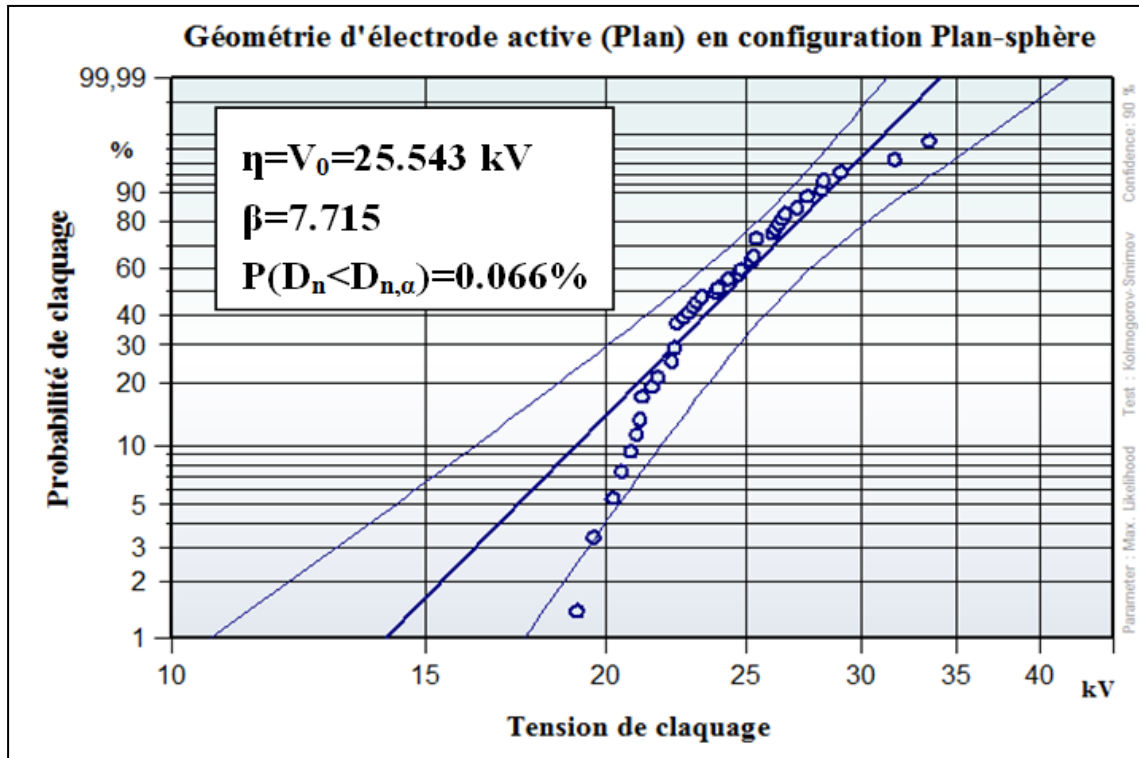


Fig. 5.30 Diagrammes de Weibull à deux paramètres pour une configuration d l'électrode plan-sphère

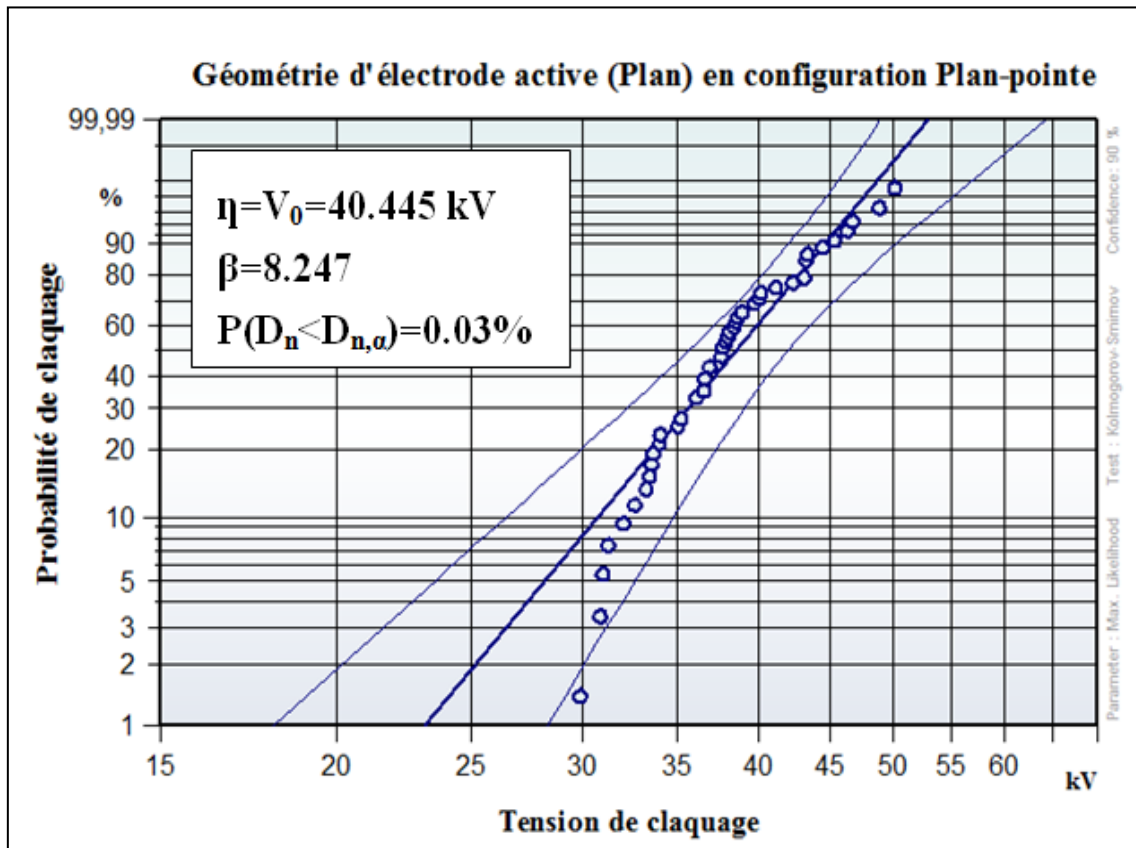


Fig. 5.31 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d l'électrode plan-pointe

Les différents résultats des paramètres de Weibull à deux paramètres ainsi que les résultats de test d'adéquation de Kolmogorov – Smirnov, sont représentés dans le (Tab 5.6)

Influence de la Géométrie de l'électrode active en plan Tension AC; 50Hz Nature des électrodes (Cuivre) Distance d=0.5cm Vitesse v=1.73 kV/s				
Traitements statistiques		Géométries des électrodes		
		Plan-plan	Plan-sphère	Plan-pointe
Avec le modèle de la loi normale	V _{moy} (kV)	50.01	24.184	38.306
Avec le modèle de Weibull	β	9.392	7.715	30.787
	η (kV)	54.631	25.543	40.445
Test K-S: P(D _n <D _{n,a})%		0	0.066	0.03

Tab. 5.6 Résultats de traitement statistique pour une configuration d'électrodes active (plan)

D'après ces résultats, on aura la fig. (5.32), qui représente les diagrammes de Weibull pour différentes configurations d'électrodes, lorsque l'électrode active est un plan.

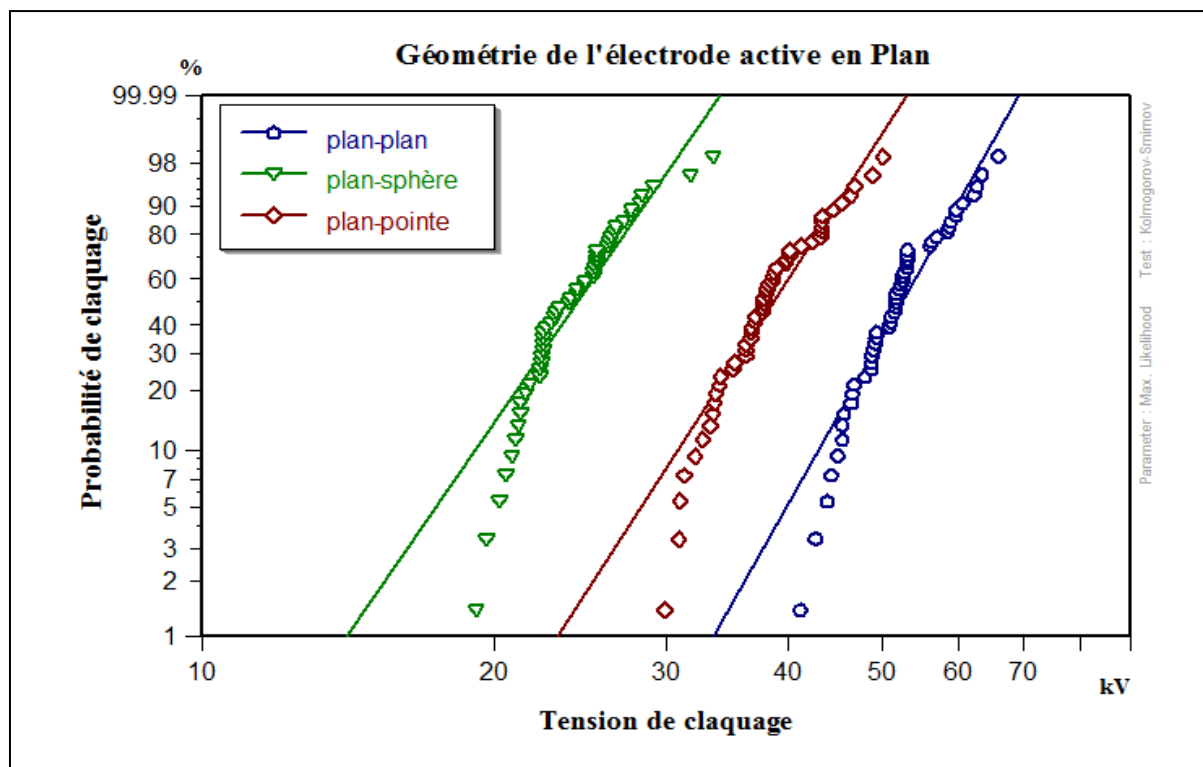


Fig. 5.32 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour une configuration d'électrode active (plan)

D'après cette figure, on remarque que la tension de claquage est plus élevée lorsque l'électrode passive est de la même géométrie que l'électrode active. Et que cette tension est moins importante lorsque l'électrode passive est sphérique.

4.3.5 Influence de la géométrie de l'électrode active et de l'électrode de terre passive

Plusieurs configurations sont utilisées, à savoir:

- ✓ Plan-plan, sphère-plan et pointe-plan;
- ✓ Pointe-pointe, plan-pointe et sphère-pointe;
- ✓ Sphère-sphère, plan-sphère et pointe-sphère.

Les différents résultats des paramètres de Weibull à deux paramètres ainsi que les résultats de test d'adéquation de Kolmogorov – Smirnov, sont représentés dans le (Tab. 5.7) suivant:

Influence de la Géométrie de l'électrode de terre en plan Tension AC; 50Hz Nature des électrodes (Cuivre) Distance d=0.5cm Vitesse v=1.73 kV/s				
Géométries des électrodes		Plan-Plan	Sphère-Plan	Pointe-Plan
Traitement statistique				
Avec le modèle de la loi normale	Vmoy (kV)	50.01	24.226	29.058
Avec le modèle de Weibull	β	9.392	7.331	10.59
	η (kV)	54.631	25.755	30.344
Test K-S: $P(D_n < D_{n,\alpha})\%$		0	0.125	0

Géométries des électrodes		Pointe-Pointe	Sphère-Pointe	Plan-Pointe
Traitement statistique				
Avec le modèle de la loi normale	Vmoy (kV)	47.8	35.354	38.306
Avec le modèle de Weibull	β	11.75	10.29	8.243
	η (kV)	49.882	36.975	40.445
Test K-S: $P(D_n < D_{n,\alpha})\%$		0.015	0.036	0.03

Géométries des électrodes		Sphère-Sphère	Pointe-Sphère	Plan-Sphère
		Traitement statistique		
Avec le modèle de la loi normale	Vmoy (kV)	56.864	22.572	24.184
	β	8.313	7.605	7.715
Avec le modèle de Weibull	η (kV)	60.25	23.974	25.543
	Test K-S: $P(D_n < D_{n,\alpha})\%$	0.172	0.071	0.066

Tab. 5.7 Résultats du traitement statistique pour différentes configurations de l'électrode de terre

La fig. (5.33) représente le diagramme de Weibull à deux paramètres pour deux géométries (pointe et sphère)

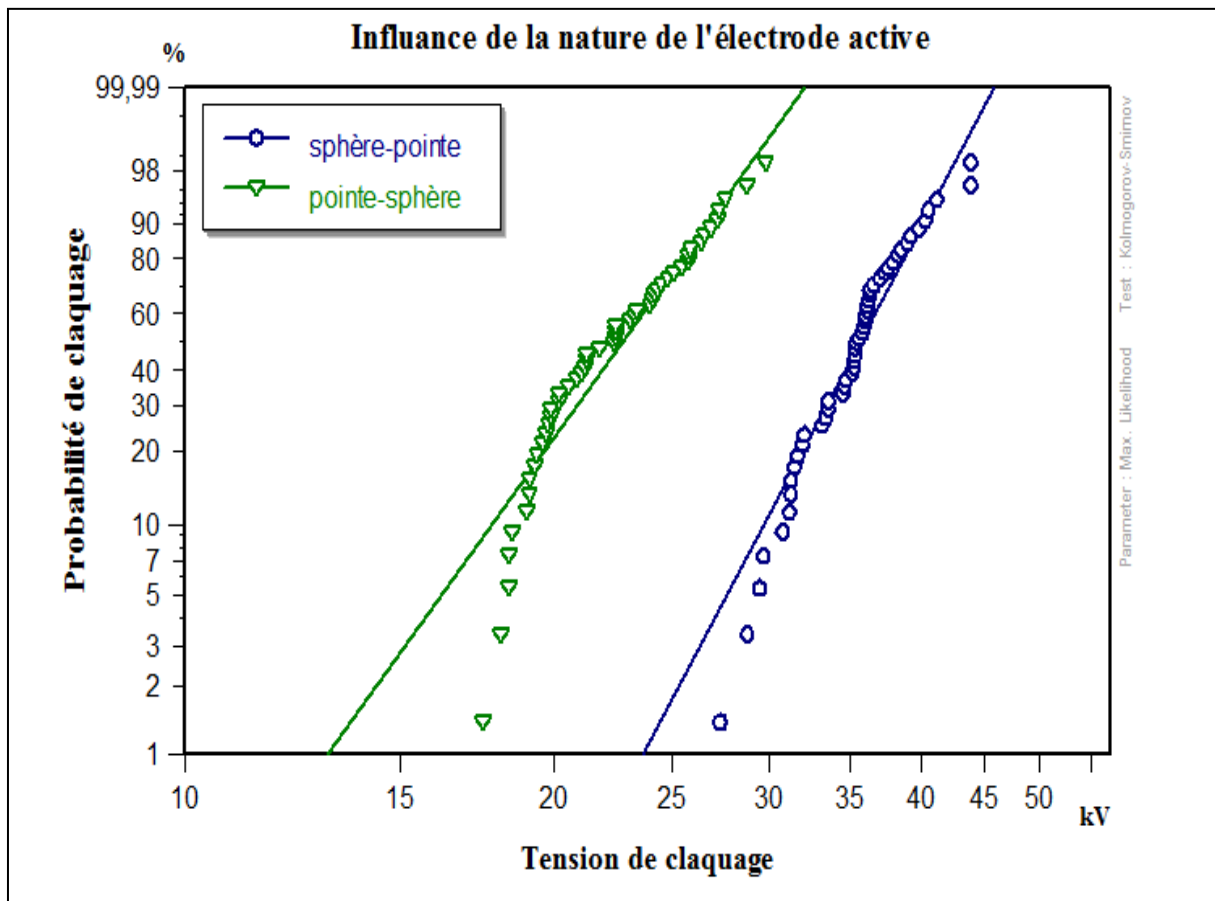


Fig. 5.33 Diagrammes de Weibull à deux paramètres pour les deux électrodes (pointe, sphère)

La tension de claquage est plus importante, lorsque l'électrode de terre est pointue.

La fig. (5.34) représente le diagramme de Weibull à deux paramètres pour deux géométries (pointe et plan)

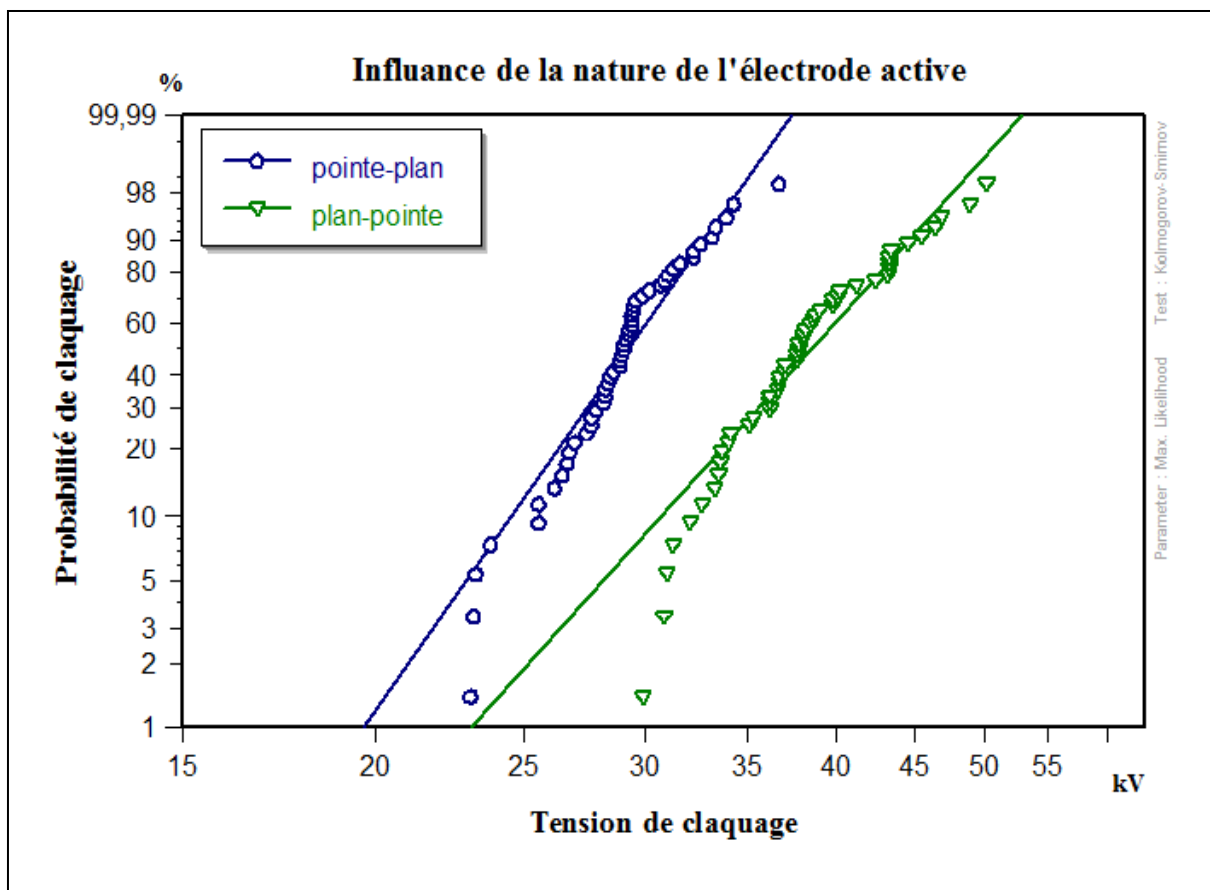


Fig. 5.34 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour les deux électrodes (pointe, plan)

La tension de claquage est plus importante, lorsque l'électrode de terre est pointue.

La fig. (5.35) représente le diagramme de Weibull à deux paramètres pour deux géométries (sphère et plan)

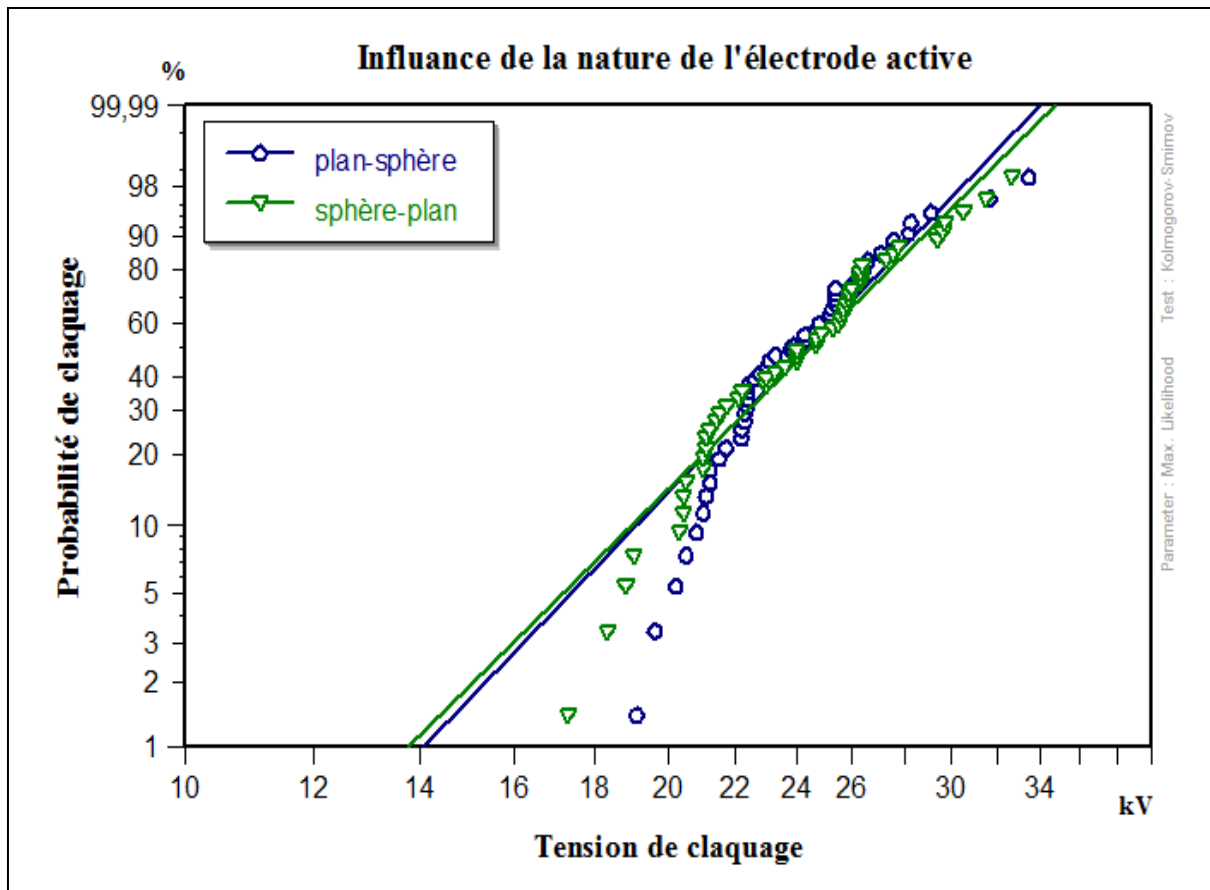


Fig. 5.35 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour les deux électrodes (sphère, plan)

La tension de claquage est presque la même, dans les deux cas de configuration.

4.4 Influence de la nature des électrodes

4.4.1 Diagrammes de Weibull

La fig. (5.36) jusqu'au fig. (5.40); représentent les diagrammes de Weibull à deux paramètres pour différentes natures des électrodes avec: une géométrie pointe-pointe, pour une distance interélectrodes de 0.5 cm et pour une tension alternative sinusoïdale de vitesse de la rampe de 2.19kV/s.

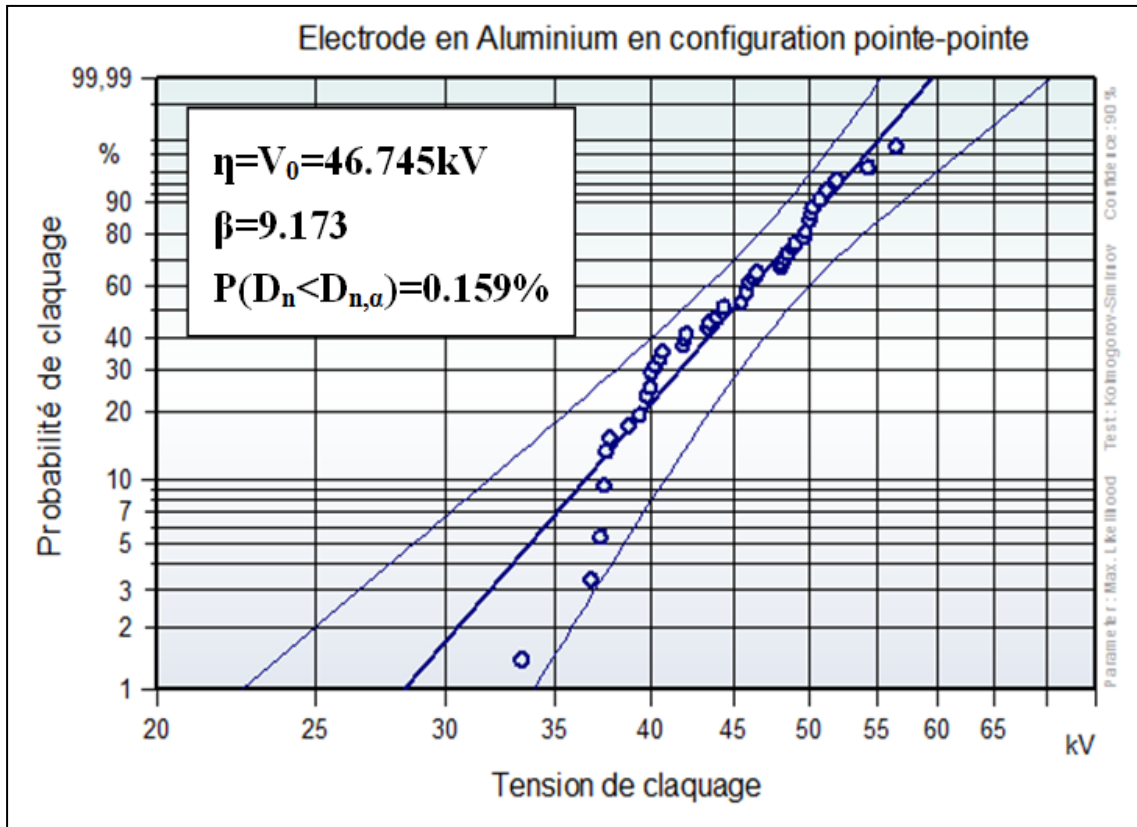


Fig. 5.36 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour des électrodes en Aluminium

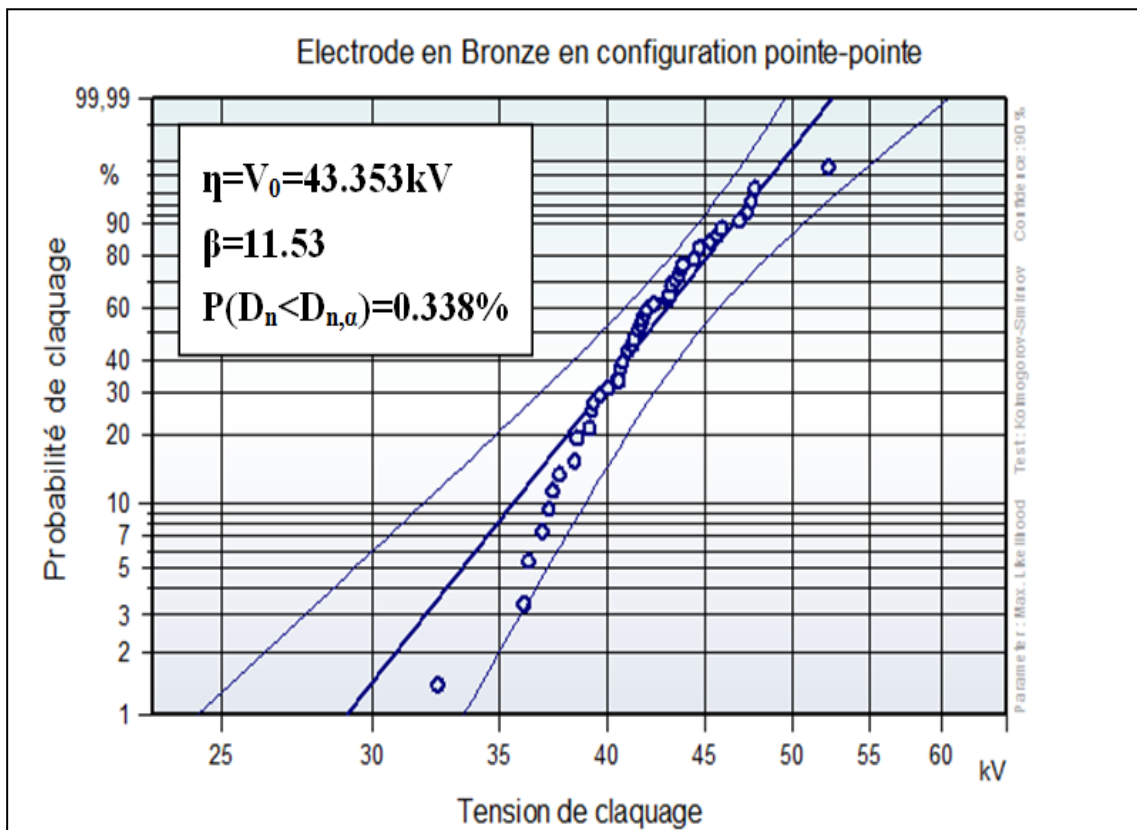


Fig. 5.37 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour des électrodes en Bronze.

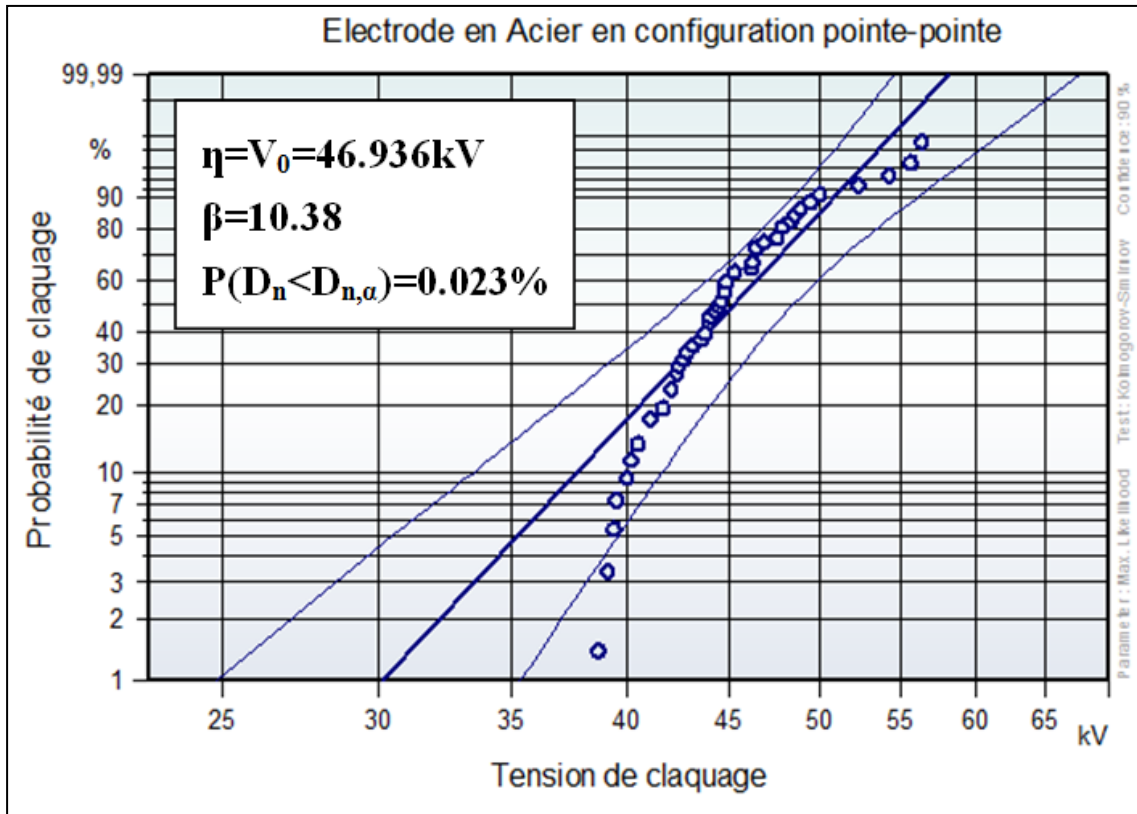


Fig. 5.38 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour des électrodes en acier.

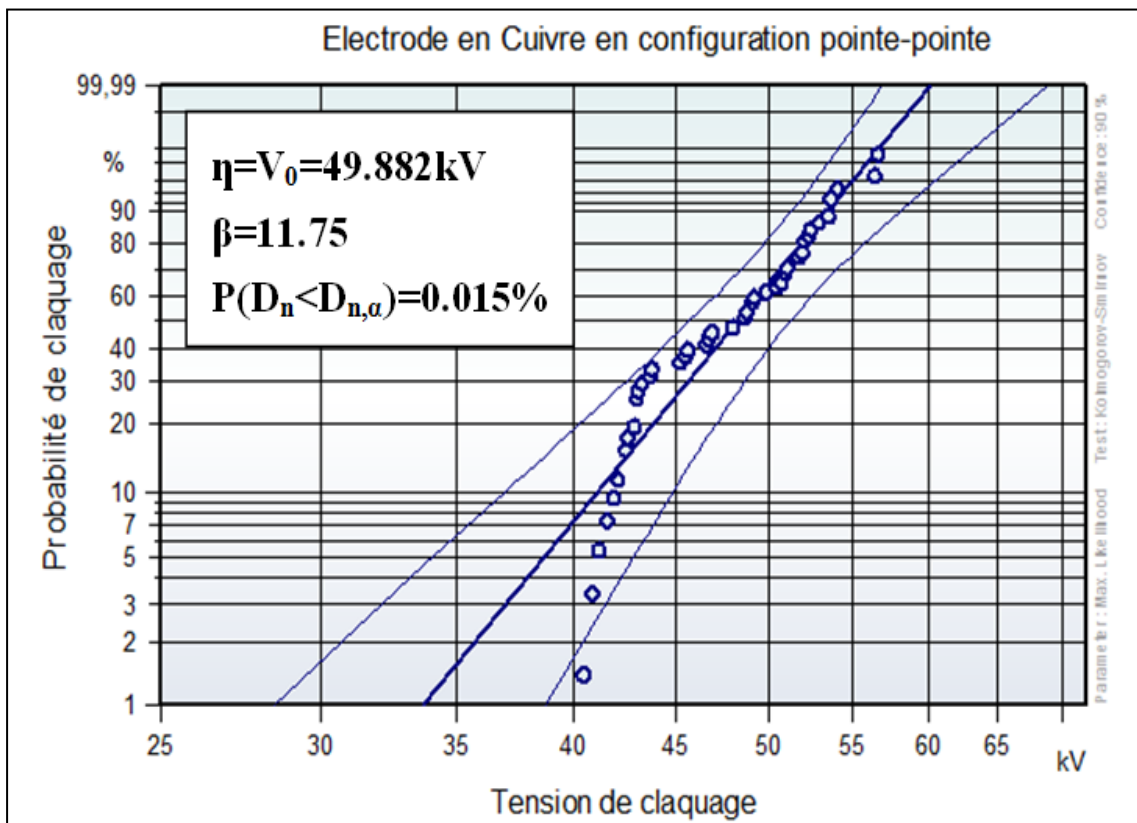


Fig. 5.39 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour des électrodes en Cuivre.

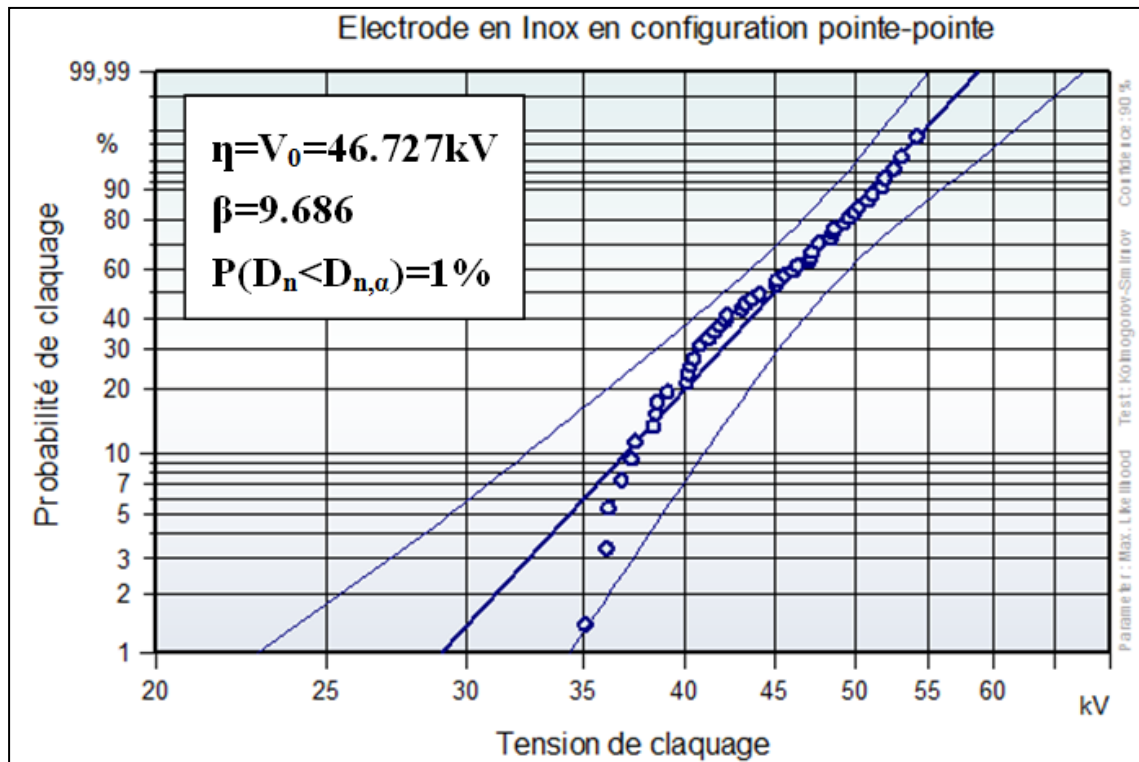


Fig. 5.40 Diagramme de Weibull à deux pour des électrodes en Inox.

Les différents résultats du traitement statistique, sont représentés dans le tableau suivant:

Influence de la nature des électrodes Tension AC; 50Hz Distance d=0.5cm Vitesse v=1.73 kV/s Géométrie des électrodes (Pointe-Pointe)						
Nature d'électrode		Aluminium	Acier	Bronze	Cuivre	Inox
Avec le modèle de la loi normale	Vmoy (kV)	44.384	45.012	41.696	47.8	44.428
	β	9.173	10.38	11.53	11.75	9.686
Avec le modèle de Weibull	η (kV)	46.745	46.936	43.353	49.882	46.727
	Test K-S: P(Dₙ < Dₙ,α)%	0.159	0.023	0.338	0.015	1

Tab. 5.8 Résultats des paramètres de Weibull et de test d'adéquation pour les différentes natures des électrodes

D'après les résultats du tableau précédant, on aura la figure suivante:

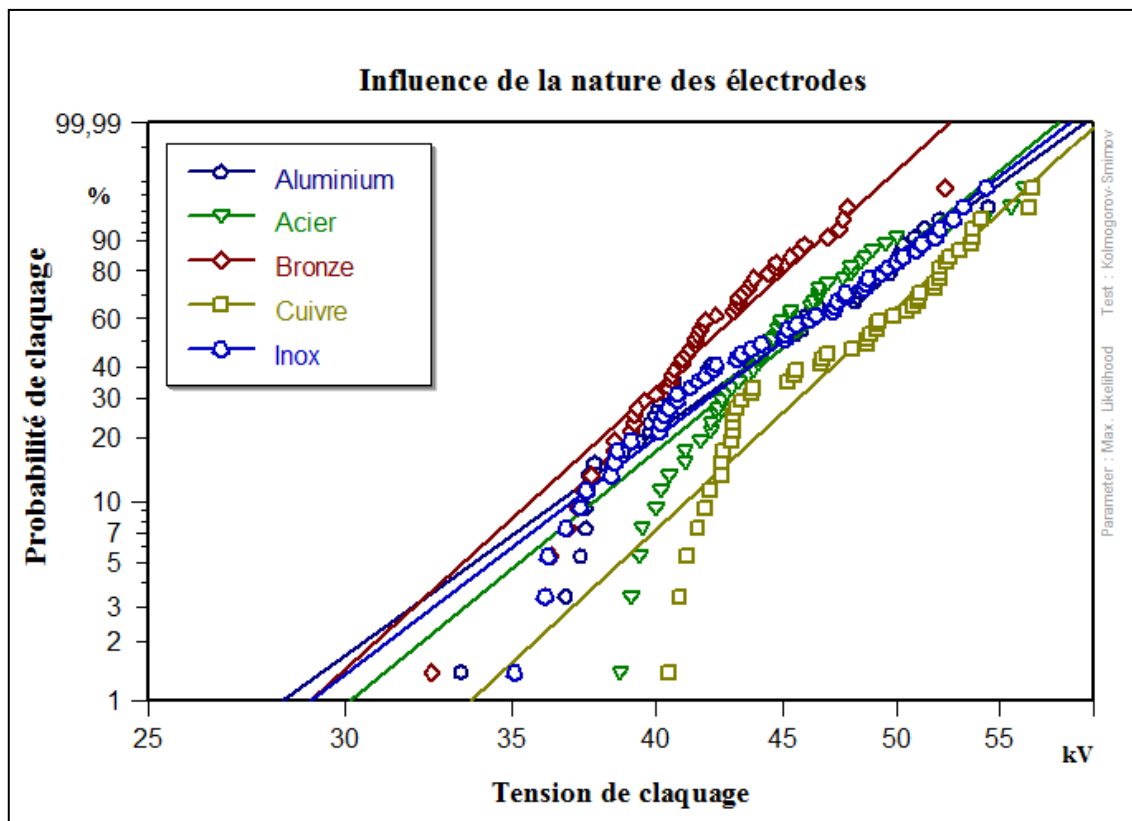


Fig. 5.41 Diagrammes de Weibull à deux paramètres pour les différentes natures des électrodes

Les résultats obtenus à partir de la mesure des tensions de claquage sont montrés à la fig. (5.41). Ils concernent des électrodes de configuration pointe-pointe : en Aluminium, Acier, Bronze, Cuivre, Inox, et pour une distance interélectrodes de 0.5 cm. Avec un configuration pointe-pointe.

À l'examen de ces résultats, nous remarquons que les tensions de claquage sont plus élevées pour des électrodes en Cuivre et moines importantes pour des électrodes en Bronze. Ces tensions de claquage de l'huile sont presque de mêmes valeurs pour les autres natures d'électrodes.

4.5 Influence de l'état de l'huile

Les mesures ont été effectuées sur deux états de l'huile Borak22 ; neuve et vieilli dans un transformateur de puissance 30kV/400V en service durant plus de 5 ans. La configuration plan-plan des électrodes en cuivre et distancés de 0.5 cm, et vitesse de rampe de la tension alternative appliquée est 2.19kV/s.

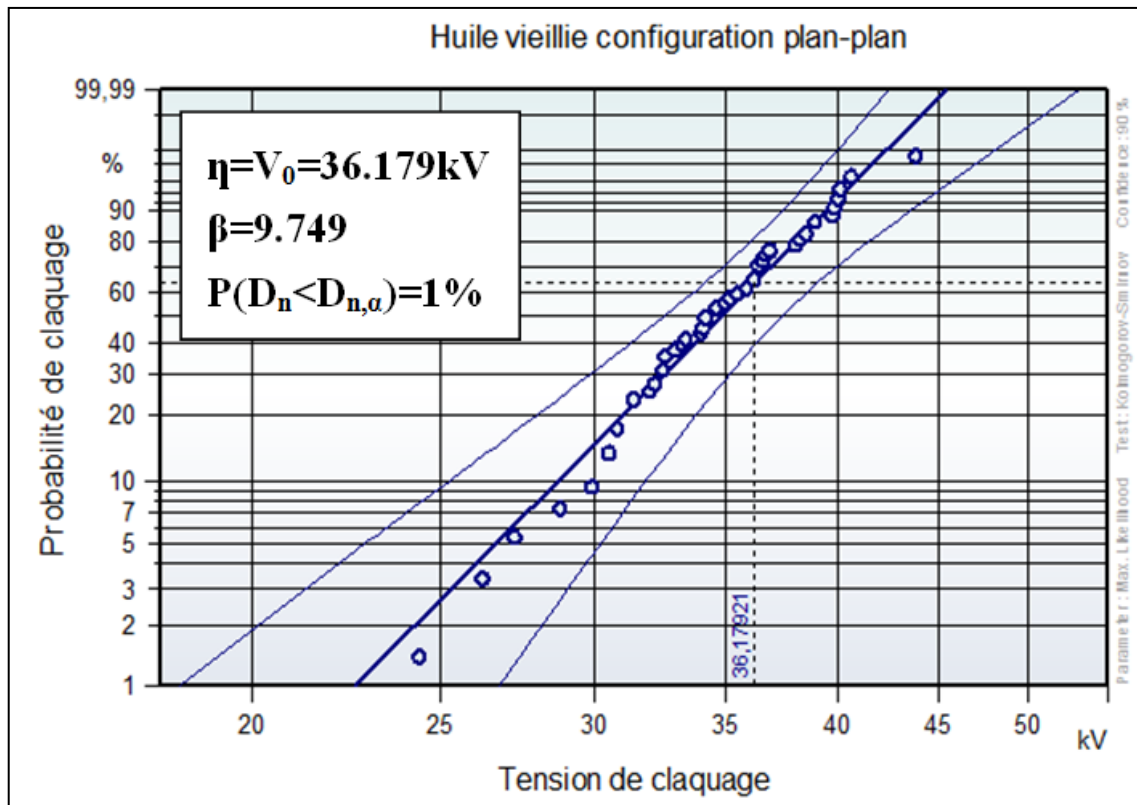


Fig. 5.42 Diagramme de Weibull à deux paramètres pour l'huile vieillie

Les différents résultats des paramètres de Weibull à deux paramètres ainsi que les résultats de test d'adéquation de Kolmogorov – Smirnov, sont représentés dans le tab (5.9) suivant:

Influence de l'état d'huile Tension AC; 50Hz Nature des électrodes (Cuivre) Distance d=0.5cm Vitesse v=1.73 kV/s Géométries plan-plan			
Etat d'huile		Huile vieillie	Huile neuve
		Traitement statistique	
Avec le modèle de la loi normale	Vmoy (kV)	34.464	50.01
	β	9.749	9.392
Avec le modèle de Weibull	η (kV)	36.179	54.631
	Teste K-S: $P(D_n < D_{n,\alpha})(\%)$	1%	0%

Tab. 5.9 Résultats du traitement statistique pour les mesures de tensions de claquage pour l'huile vieilli.

D'après ces résultats, on aura la figure suivante:

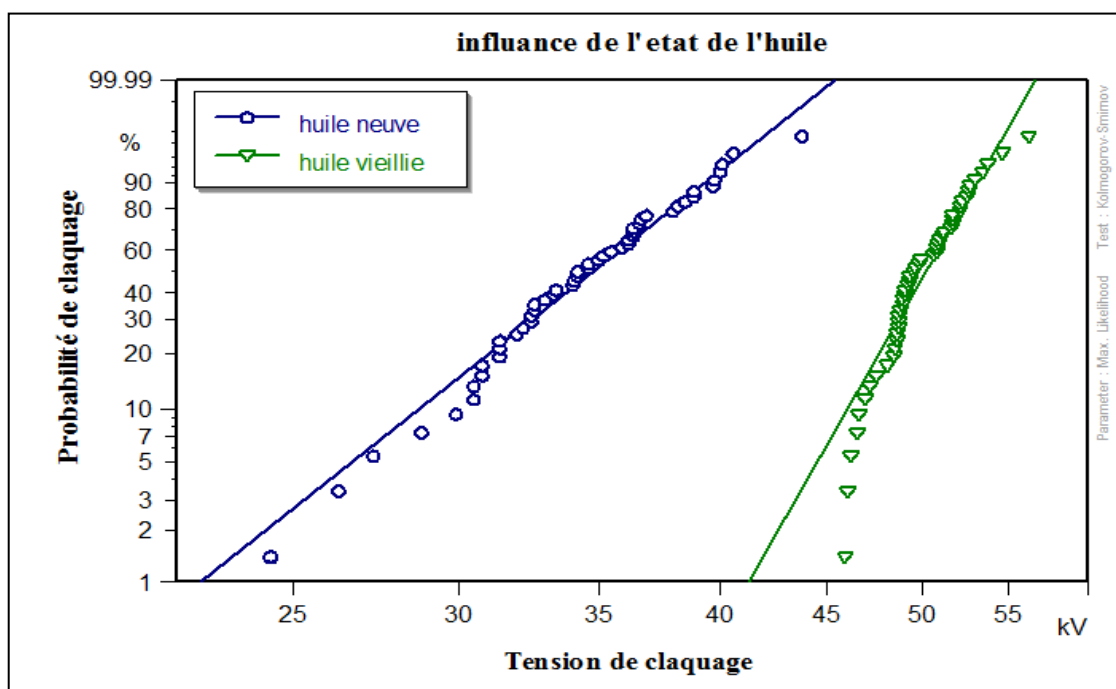


Fig. 5.43 Digramme de Weibull à deux paramètres pour les deux huiles

Dans cette figure, on voit clairement que la valeur de tension de claquage de l'huile vieillie est nettement inférieure à celle de l'huile neuve. Tout simplement, le vieillissement électrique de l'huile affecte considérablement ces propriétés et par conséquent la valeur de sa tension de claquage. Ce qui risque d'engendrer la dégradation des matériaux solides imprégnés, de favoriser les phénomènes de conduction et conduire à des claquages pouvant mettre hors usage l'équipement de haute tension.

5. Conclusion

Plusieurs paramètres d'influence ont été testés pour élucider le phénomène de claquage dans l'huile Borak22. Après avoir réalisé les essais de claquage, les résultats ont fait l'objet d'une analyse statistique par les deux lois, Weibull à deux paramètres et la loi Normale. En plus des intervalles de confiance à 90%, le test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov a été utilisé pour l'ajustement de la loi de Weibull utilisée.

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

Conclusion générale

La rigidité diélectrique est une caractéristique importante symbolisant les isolants en matière de qualité électrique, le claquage n'est jamais causé par un champ électrique seul mais par un effort combinatoire entre ce dernier et d'autres phénomènes d'origine thermique, mécanique, chimique, ..., et aussi par l'influence de plusieurs paramètres.

Nous avons évoqué dans le contexte théorique ; une description sur les transformateurs de puissances, leurs rôles, leurs compositions et les principaux défauts qui peuvent se produire durant leurs fonctionnements. Ensuite des notions de fiabilité et de maintenance sur ces transformateurs, ont été abordées. Plus tard, on a présenté les concepts physiques de base intervenant dans les isolants solides et liquides; tels des phénomènes et des mécanismes pré disruptifs rencontrés en présence d'un champ électrique. Ensuite nous avons donné une base théorique sur les statistiques de la rupture diélectrique ainsi que les principales lois utilisées en fiabilité, entre autre, l'application du modèle de Weibull à la caractérisation de la rupture diélectrique.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude de la tenue diélectrique de l'huile Borak22 utilisés dans les transformateurs de puissance. Le but était de vérifier et d'étudier expérimentalement les paramètres influents sur sa tension de claquage sous tension alternative sinusoïdale 50Hz, plusieurs paramètres d'influence sont traités à savoir ; l'influence de la montée en tension, la géométrie des électrodes, leurs nature et la distance interélectrode.

Le support et les différents types d'électrodes utilisés lors des essais de claquage, ont été réalisés au Hall de Technologie de l'université de Bejaia. Et les différents essais ont été effectués au laboratoire de décharges électriques dans le bloc de Haute Tension, au sein de la même université. En tout 1200 mesures ont été effectuées et traitées par le modèle statistique de Weibull pour réaliser ce travail.

Ce travail nous a permis de tirer ces quelques points de conclusion :

- ✓ Pour l'étude de valeurs de claquage où rupture, la méthode de Weibull reste la meilleur pour sa capacité à aller chercher un seuil de claquage s'il ya lieu.

- ✓ La dispersion des valeurs nous a imposée des intervalles de confiance à 90%. Et vu le nombre important des essais, on a jugé préférable, d'utiliser le test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov pour l'ajustement de la loi de Weibull.
- ✓ La méthode du maximum de vraisemblance, s'impose dans le cas; où des valeurs de rupture se répètent.
- ✓ Il apparaît que la vitesse de montée de la rampe de tension appliquée à l'isolant joue un rôle important. On note que la tension nominale de rupture prend une forme exponentielle qui correspond à des vitesses sensiblement plus élevées.
- ✓ Tous les diagrammes de Weibull tracés ne présentent pas de dépassement à gauche des intervalles de confiance au niveau des points de mesure, cela nous a imposé de se contenter de la représentation à deux paramètres.
- ✓ La tension de claquage croît exponentiellement avec l'augmentation de la distance interélectrodes.
- ✓ La nature de l'électrodes joue un rôle très important dans la tenue diélectrique de l'huile. Cela est justifié par la différence dans le travail d'extraction d'électron de chaque matériau conducteur.
- ✓ la géométrie de l'électrode passive ou active, est un paramètre très important dans l'étude de la tenue diélectrique de l'huile. Ceci est dû à la dépendance du champ électrique du rayon de courbure de l'électrode utilisée.
- ✓ Le vieillissement électrique de l'huile affecte considérablement ces propriétés et par conséquent la valeur de sa tension de claquage. On a constaté que la valeur de tension de claquage de l'huile vieillie est nettement inférieure à celle de l'huile neuve.

Enfin, et en perspective, il est judicieux de compléter ce travail par des analyses chimiques sur l'huile vieillie, et de réaliser d'autres essais pour d'autres distances interélectrodes. Bien sûr, l'étude et l'estimation des paramètres diélectriques par la spectroscopie d'impédance-mètre des deux états de l'huile sera judicieuse.

Références bibliographiques

- [1] Jean Sanchez. Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance. Université de Grenoble, 2011. France.
- [2] Janvier-Sylvestre N' Cho. Développement de nouvelles méthodes de diagnostic et de régénération des huiles pour transformateurs de puissance. Engineering Sciences. École Centrale de Lyon, 2011. France.
- [3] Amidou Betie, Contribution à l'amélioration de l'interprétation des techniques diagnostics des transformateurs de puissance par spectroscopie diélectrique, Université de Québec Chicoutimi
2012, Canada.
- [4] Alain Schenk, «Surveillance continue des transformateurs de puissance par réseaux de neurones auto-organisés », École polytechnique fédérale de Lausanne ,Suisse 2001
- [5] Madjid Meziani, « Contribution à la modélisation analytico numérique des transformateurs de puissance», Université Mouloud Mammri Tizi-ouzou, Algérie, 2011
- [6] J.J. O'Dwyer, B. L. Beers, "Thermal breakdown of dielectrics", Conference on Electrical Insulation and Dielectric phenomena, 1981, pp. 193-198.
- [7] Christophe Perrier. Étude des huiles et des mélanges à base d'huile minérale pour transformateurs de puissance (Recherche d'un mélange optimal). École Centrale de Lyon, 2005.France.
- [8] Norme CEI 296, EN 60296 "Spécifications des huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillage de connexion", Aout 2004.
- [9] Chau Tran-Duy. Propriétés diélectriques de liquides isolants d'origine végétale pour applications en haute tension. Electric power. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009. France.
- [10] Belkasmi Djamel , Étude des caractéristiques des matériaux isolants pour transformateurs, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou , Algérie. juin 2012

- [11] Audrey Bourgeois. Étude du phénomène d'électrisation par écoulement sur les cartons des transformateurs de puissance. Chemical and Process Engineering. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2007. France.
- [12] Top Tran Van. Étude de la génération des streamers dans l'huile minérale sous tension impulsionnelle alternative. Electric power. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1999. France.
- [13] M S. Herzine, Étude du vieillissement thermique du papier presspahn en utilisant le modèle statistique de Weibull, Université de Bejaia, 2006.
- [14] C. Menguy, Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides, Technique de l'ingénieur, D2310, Paris, 1997.
- [15] B. Bouvier, Papier et papier imprégné, Technique de l'ingénieur, D280, Paris, 1983
- [16] R. Fournié, Les isolants en électrotechnique, essais et mécanismes de dégradation, Applications industrielles, édition Eyrolles, Paris, 1990.
- [17] J.L Guignard, Abrégé de biochimie végétale, édition Masson, Paris, 1979.
- [18] AFFOLTER Jean-François, Haute tension, École d'ingénieurs du Canton de Vaud, octobre 2000
- [19] R. Fournié, "Les isolants en électrotechnique", Editions Eyroles 1991.
- [20] D. Fulchiron, Groupe SCHNEIDER, Cahier technique n° 192 « Protection des transformateurs de postes MT/BT » avril 1998
- [21] M.C. Lessard, L. V. Nifterik, M. Massé, J. F. Penneau, R. Grob, "Thermal aging study of insulating papers used in power transformers", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 854-859, October 20-23, 1996.
- [22] Christophe Guillermin. Vieillissement électrique et thermique d'un composite résine époxyde-silice: étude des charges d'espace et de la conduction. Physics. Université Joseph-Fourier -Grenoble I, 2004. France.
- [23] 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.

- [24] Coelho, B. Aladenize, « Les diélectriques, propriétés diélectriques des matériaux isolants », édition Hermes, 1993.
- [25] Goffaux, R. Coelho, « Sur la rupture filamentaire différée dans les isolants électriques », Revue Phys. Appliquée, 17, 1982, pp. 55-64.
- [26] Coelho, « Matériaux isolants et champs électriques », Découverte, 1972, pp. 19-24.
- [27] Coelho et R. Goffaux, « Dissipation et claquage thermique dans les solides non métalliques soumis à un champ électrique intense », Revue Physique appliquée, 16, 1981, pp. 67-75.
- [28] Coelho, « Charge d'espace engendrée par un gradient de température », REG, Tome 87, N° 11, Novembre 1978, pp. 881-886.
- [29] C. Laurent, « Contribution à l'étude des mécanismes de la rupture à long terme des polymères », Thèse d'Etat Science Physique, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1984.
- [30] K. H. Stark, G. C. Garton, « Electric strength of irradiated polyethylene », nature 176, 60, 1955, pp. 1225-1226.
- [31] E. Hallen, « Electromagnetic theory », Chapman et Hall, 1962, pp. 35-73.
- [32] M. Frohlich, « Theory of dielectrics » Oxford Univ. Press, 1949.
- [33] J.J O'Dwyer, "The theory of electrical conduction and breakdown of solids ", clarendonpress, oxford, 1973.
- [34] F. Seitz, « On the theory of electron multiplication in crystals », Phys. Rev., 76, 1949, pp. 1376-1393.
- [35] IEEE Guide for the statistical analysis of electrical insulation voltage endurance data, ANSI/IEEE Std. 930, 1987.
- [36] W. Nelson, Applied Life Data Analysis, John Wiley and sons, New York, 1982.
- [37] J.F. Lawless, Statistical Models and Methods for Lifetime Data", John Wiley and sons, New York, USA, 1982.
- [38] W. Weibull, "A statistical distribution function of wide applicability", J. Appl. Mechanics, Vol. 18, pp. 293-297, 1951.

- [39] G.C. Motanari, G. Pattini and L. Simoni, "Long term behaviour of XLPE insulated cable", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 2, pp. 596-602, 1987.
- [40] 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.
- [41] A. Laifaoui, J. M. Reboul, M. Aissou, M.S. Herzine, M. Nedjar and Y. Zebboudj: «Influence de la rampe de tension ainsi que de sa forme sur la tension de claquage des gaines en PVC», ICEL'13, Oran, Algérie, 03-04 décembre 2013.
- [42] Bernard Delmas, Statistique descriptive, Paris, Nathan, pp. 143, 1996.
- [43] R. Fournié, 'Les isolants en électrotechnique- concepts et théories-' Préface ; Christian Rioux, Edition Eyrolles, 1986.
- [44] A. Laifaoui, J. M. Reboul, M. Aissou, M.S. Herzine, M. Nedjar et Y. Zebboudj: « Etude de la rupture diélectrique du polychlorure de vinyle », SFE, 2012, Cherbourg-Octeville, France, 3-5 juillet 2012.
- [45] R. Lacoste, « nouveaux développements sur la notion de champ seuil », S.E.E, Mai 1986, pp. 13-18.
- [46] A. C. Cohen, "Maximum likelihood estimation in the Weibull distribution based on complete and on censored samples", Technometrics, Vol. 7, No. 4, pp. 579-588, 1965.
- [47] J. F. Lawless, "Confidence interval estimation for the Weibull and extreme-value distribution", Technometrics, Vol. 20, No. 4, pp. 355-363, 1978.
- [48] J. F. Lawless, "Construction of tolerance bounds for the extreme-value and Weibull distributions", Technometrics, Vol. 17, No. 2, pp. 255-261, 1975.
- [49] G. C. Stone and R. G. Van Heeswijk, "Parameter estimation for Weibull distribution", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 12, No. 4, pp. 253-261, 1977.
- [50] G. C. Stone, "Personal computer software to analyse extreme-value and Weibull statistical data", Ontario Hydro Research Division, 1986.

[51] Commission Electrotechnique Internationale, comité d'étude N°63, « systèmes d'isolation : évaluation de l'endurance électrique des systèmes d'isolation électrique, procédure d'évaluation basée sur des distributions de valeurs extrêmes », Septembre 1989.

[52] B. Grais, "Méthodes statistiques", Edition Dunod, 1990.

[53] P. Chapouille, R. de Paizzis, « fiabilité des systèmes », édition Masson, 1965.

[54] 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.

[55] L. Simoni, « Dielectric proprieta e comportamentonel tempo », Université de Bologne, Italie, 1974

[56] A. Laifaoui, J. M. Reboul, M. Aissou, M.S. Herzine, M. Nedjar and Y. Zebboudj: « Study of the dielectric failure of polyvinyl chloride sheaths under AC and DC high voltages », ICEEAC, Setif, Algeria, 24-26 November 2013.