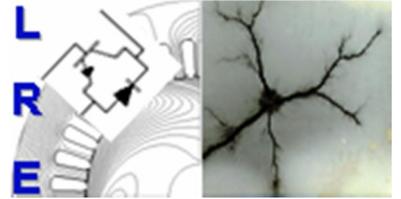




Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Thèse de Doctorat

Présentée par Mohamed ZITOUNI

Magister en Electrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique

Thème

*Utilisation des Techniques des Essaims dans le Contrôle
des Propriétés de l'Huile de Transformateur*

Présentée et soutenue publiquement le 19/11/2018

Composition du Jury:

Président: Madjid TEGUAR

Professeur ENP

Directeurs de Thèse:

Ahmed BOUBAKEUR

Professeur ENP

Leila MOKHNACHE

Professeur Université M.B. Batna2

Examineurs:

Nadia SAIDI

Professeur USTHB

Hocine MOULAI

Professeur USTHB

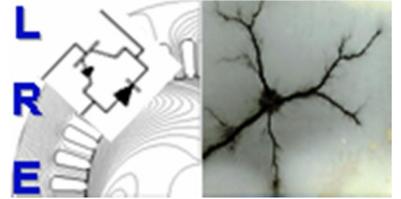
Mustapha MOUDOUD

Professeur UMM Tizi-Ouzou

ENP 2018



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Thèse de Doctorat

Présentée par Mohamed ZITOUNI

Magister en Electrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique

Thème

*Utilisation des Techniques des Essaims dans le Contrôle
des Propriétés de l'Huile de Transformateur*

Présentée et soutenue publiquement le 19/11/2018

Composition du Jury:

Président: Madjid TEGUAR

Professeur ENP

Directeurs de Thèse:

Ahmed BOUBAKEUR

Professeur ENP

Leila MOKHNACHE

Professeur Université M.B., Batna2

Examineurs:

Nadia SAIDI

Professeur USTHB

Hocine MOULAI

Professeur USTHB

Mustapha MOUDOUD

Professeur UMM Tizi-Ouzou

ENP 2018

DEDICACE

A mes très chers parents

A ma très chère femme

A mes adorables filles

A mes frères et sœurs

A tous mes amis qui m'aiment et qui m'apprécient

REMERCIEMENTS

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans la thématique de recherche sur les huiles isolantes utilisées dans les transformateurs de puissance. Elles ont été réalisées au sein du laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Les résultats d'essais sont pris de travaux qu'on a effectués antérieurement dans mon mémoire de Magister.

Je voudrais ici témoigner de toute ma gratitude à mon directeur de Thèse, le Professeur Ahmed BOUBAKEUR, pour sa confiance, sa disponibilité et l'intérêt qu'il a toujours manifesté à l'égard de mon travail tout au long de ces années.

Je tiens à remercier Mademoiselle Leila MOKHNACHE, professeur à l'université Ben Boulaid Batna-2, pour sa co-direction de mes travaux. Qu'il me soit permis de lui exprimer mes remerciements pour l'aide précieuse qu'elle a toujours bien voulu m'apporter. Qu'elle trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance. Cette thèse lui doit beaucoup.

Je tiens à remercier Monsieur Madjid TEGUAR, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury d'examen de cette thèse.

Mes plus profonds remerciements vont à Monsieur Hocine MOULAI, et Madame Nadia SAIDI, Professeurs à l'USTHB et à Monsieur Mustapha MOUDOUD professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou qui ont accepté d'examiner mes travaux et de participer au jury. Je suis particulièrement sensible à leur présence.

Je voudrais également remercier Monsieur Ahmed GUEDDIM, professeur à l'université Ziane ACHOUR de Djelfa, d'avoir accepté de relire cette thèse. La version finale de ce manuscrit a bénéficié de leurs remarques précieuses.

Je voudrais également exprimer ma reconnaissance à Monsieur Larbi BOUKEZZI, professeur à l'université Ziane ACHOUR de Djelfa, pour l'aide et les précieux conseils qu'il m'a prodigués durant la réalisation de cette thèse.

Mes plus vifs remerciements sont à adresser à Messieurs :

Tahar BENAÏSSA, MAA à l'université Ziane ACHOUR de Djelfa.

Allal ABDELLALI, MAA à l'université Ziane ACHOUR de Djelfa.

Dahmen HACHI, MAA à l'université Ziane ACHOUR de Djelfa.

Douadi BENDHIB, attaché de recherche de Bousmail à Alger.

ملخص:

الهدف من هذه الأطروحة هو استغلال قاعدة بيانات منجزة إبان فترة طويلة من الاختبارات على نضام نتوء- مستوي تحت جهد متناوب. إنها تسمح لنا بدراسة تأثير الحواجز العازلة على انهيار الجهد و الحقل الكهربائي للمسافات الكبيرة لزيوت المحولات. يكون لجهد الانهيار قيمة قصوى عندما يقع الحاجز بالقرب من النتوء عند 20% من نضام نتوء- مستوي. بالاعتماد على قاعدة البيانات هذه المتحصل عليها في أطروحة الماجستير. طبقنا طريقة إحصائية من نوع DOE للحصول على نماذج رياضية للصلابة والحقل الكهربائي في وجود حواجز كهربائية لطبقتين مختلفتين (بريشبان و باكي ليت) بسمكي (2 و 4 مم) لمختلف المسافات الفاصلة بين الأقطاب و الوضعية النسبية و أقطار الحاجز. قمنا بالتحقق من صحة النماذج الرياضية من أجل المخرجات: سم $d = 6$ و $d = 10$ سم، $a/d = 40$ و 80% (قيم لم تستخدم من قبل DOE). أخذنا بعين الاعتبار الخطأ المرجعي المحدد (5%) بين النتائج المتوقعة والتجريبية. جميع الأخطاء أكبر من 5%. خوارزمية الخفافيش (BAT) تسمح بضبط معاملات النماذج المقدمة بهدف تقليل هذه الأخطاء النسبية.

الكلمات الدالة: الحواجز العازلة، نظام حاد- مستوي، المحولات الكهربائية، الصلابة الكهربائية، الحقل الكهربائي، طريقة إحصائية من نوع DOE، خوارزمية الخفافيش.

Abstract:

The goal of our work is to exploit a database built up for a long time after several tests on point-plane geometry under AC voltage. It allowed us to study the influence of insulating barriers on the breakdown voltage and the dielectric strength of large oil gaps. The breakdown voltage has a maximum value when the barrier is located near the tip at 20% of the tip-plane gap. On the basis of the data obtained from work that was done previously in my memory of magister, we applied the "Design Of Experiment" (DOE) of CCF type "Central Composite Face". We have developed mathematical models for two different natures (Presspahn and Bakelite) of the barrier. The effect of the parameters: thickness (2 and 4 mm), inter-electrode distances, relative positions and barrier diameters were studied. We validated our models for both outputs: $d = 6$ and 10cm, $a/d = 40$ and 80% (values not used by DOE). We took into account the selected reference error (5%) between predicted and experimental results. All errors greater than 5%, involve a task of adjusting the coefficients of the models developed, with the aim of minimizing them by swarm techniques. To do this, the meta- heuristic algorithm named BAT is one of the algorithms of these techniques, was put to use.

Key words: Insulating barrier, Transformer oil, Breakdown voltage, dielectric strength, Design Of Experiment (DOE, CCF type), bat algorithm.

Résumé :

Le but de notre travail est d'exploiter une base de données constituée pendant une longue durée au terme de plusieurs essais qui nous ont permis d'étudier l'influence des barrières isolantes sur la tension de claquage et la rigidité diélectrique des grands intervalles d'huile pointe-plan sous tension alternative. La tension de claquage a une valeur maximale lorsque la barrière est située près de la pointe à 20% de l'écartement. A la base des données prisent des travaux qu'on a effectués antérieurement dans mon mémoire de Magister, nous avons appliqué la méthode du plan d'expérience « Design Of Experiment » (DOE) de type Plan composite à face centrée (CCF). Nous avons élaboré des modèles mathématiques pour deux natures différentes de la barrière (Presspahn et Bakélite). L'effet des paramètres: épaisseur, distances inter-électrodes, positions relatives et diamètres de la barrière ont été étudiés. Nous avons validé nos modèles pour les deux sorties: distance $d=6$ et 10cm, position $a/d=40$ et 80% (valeurs non utilisées par DOE). Nous avons tenu compte de l'erreur référence choisie (5%) entre les résultats prédits et expérimentaux. Toutes les erreurs supérieures à 5%, nécessitent une opération d'ajustement des coefficients des modèles élaborés, dans le but de les minimiser. A cet effet, nous faisons appel aux techniques des essais. Parmi ces techniques, nous avons élaboré et appliqué un algorithme méta heuristique nommé chauve-souris qui a permis d'améliorer les résultats obtenus par DOE.

Mots clés: Barrière isolante, huile de transformateur, tension de claquage, rigidité diélectrique, plan d'expérience (DOE, de type CCF), algorithme de chauve-souris.

TABLES DES MATIÈRES

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction générale.....	15
Chapitre I :Etat de l'art sur l'influence des barrières isolantes dans des intervalles d'air et d'huile	
1.1. Introduction.....	18
1.2 Influence de l'insertion d'une barrière isolante dans des intervalles d'air	18
1.2.1 D'après E. MARX	18
1.2.2 D'après H. ROSER.....	18
1.2.3 D'après TIKHODEEV	18
1.2.4 D'après M.P. VERMA.....	19
1.2.5 D'après J.PILLING.....	19
1.2.6 D'après M.AWAD.....	19
1.2.7 D'après A.BOUBAKEUR	19
1.2.8 D'après Li MING	20
1.2.9 D'après Z.YOU BIN.....	20
1.2.10 D'après M.V.SOKOLOVA.....	20
1.2.11 D'après M. C . SIDDAGANGAPA.....	21
1.2.12 D'après F.V. TOPALIS et I.A.STATHOPULOS.....	21
1.3 Influence de l'insertion d'une barrière isolante dans des intervalles d'huile.....	21
1.3.1 Influence de la polarité.....	21
1.3.2 Influence de la distance inter-électrodes	22
1.3.3 Influence de la position de la barrière.....	22
1.3.4 Influence des dimensions de la barrière.....	22
1.3.4.1 Influence des dimensions de la barrière.....	22
1.3.4.2 Influence de l'épaisseur de la barrière.....	23
1.3.4.3 Influence de la nature de la barrière.....	23
1.3.4.4 Influence des perforations.....	24
1.3.4.5 Influence du nombre de barrières	24
1.4 Conclusion.....	25
Chapitre II :Généralités sur la méthode des plans d'expériences et algorithme de chauve-souris	
2.1 Introduction	27
2.2 Modélisation à base de la méthodologie de plans d'expériences	27
2.2.1 Historique.....	27
2.2.2 Définition et conditions d'application des plans d'expériences	28
2.2.3 Vocabulaire et définitions de base.....	28
2.2.3.1 Paramètres	28
2.2.3.2 Niveau d'un paramètre	28
2.2.3.3 Valeurs centrées réduites ou codées	28
2.2.3.4 Domaine expérimental.....	29
2.2.4 Réponse.....	29

2.2.5 Effet d'un paramètre	29
2.2.6 Interaction	30
2.2.7 Matrice des effets.....	30
2.2.8 Notion de degré de liberté	30
2.3 Les plans composites centrés	31
2.3.1 Méthode 1	31
2.3.2 Méthode 2	31
2.3.3 Modèle mathématique postulé.....	32
2.4 Calcul statistique et interprétation des résultats	32
2.4.1 Analyse des résultats.....	32
2.5 Intervalle de confiance des effets du modèle.....	32
2.6 Analyse de la variance.....	33
2.6.1 Coefficients de détermination (R^2 , $R^2_{ajusté}$)	34
2.6.2 Coefficient Q^2	34
2.7 Validation du modèle	34
2.8 Optimisation par algorithme des chauves-souris.....	35
2.8.1 Historique.....	35
2.9 Echolocation des chauves-souris.....	35
2.9.1 Comportement des microchiroptères	35
2.9.2 L'acoustique d'écholocation	36
2.10 Optimisation par l'algorithme des chauves-souris	36
2.11 Conclusion.....	38

Chapitre III :Modélisation mathématique de la tension de claquage et de la rigidite diélectrique

3.1 Introduction	40
3.2 Techniques experimentales	40
3.2.1 Cellule d'essais.....	40
3.2.2 Barrières isolantes.....	40
3.3 Circuit d'essai du laboratoire de l'ENP.....	41
3.3.1 Station d'essai	42
3.3.2 Circuits de mesures.....	42
3.3.2.1 Mesure de la tension de claquage	42
3.4 Modélisation par plan d'expérience	43
3.4.1 Choix des paramètres du domaine expérimental	43
3.4.2 Domaine Proposé.....	43
3.4.3 Modèle mathématique.....	46
3.4.4 Analyse graphique des résultats	49
3.4.5 Analyse statistique du modèle.....	50
3.5 Influence de l'insertion de la barrière.....	56
3.5.1 Tension de claquage	56
3.5.1.1 Barrière en Presspahn d'épaisseur 4mm.....	56
3.5.1.2 Barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm.....	59
3.5.1.3 Barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm.....	59
3.5.2 Rigidité diélectrique.....	60
3.5.2.1 Barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm.....	60
3.5.2.2 Barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm.....	63
3.6 Influence de la position de la barriere	64
3.6.1Tension de claquage	64
3.6.1.1Barrière en Presspahn d'épaisseur 4mm.....	64
3.6.1.2 Barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm.....	65
3.6.2 Rigidité diélectrique.....	66
3.6.2.2 Barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm.....	67
3.7 Influence du diamètre de la barriere	70
3.7.1 Tension de claquage	70
3.7.1.1 Barrière en Presspahn d'épaisseur 4mm.....	70

3.7.1.2 Barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm.....	71
3.7.1.3 Barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm.....	72
3.7.2 Rigidité diélectrique.....	74
3.7.2.1 Barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm.....	74
3.7.2.2 Barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm.....	75
3.8 Conclusion.....	76
Chapitre IV :Optimisation par chauve-souris des coefficients des modèles mathématiques	
4.1 Introduction.....	78
4.2 Optimisation des coefficients des modèles.....	78
4.2.1 Tension de claquage	78
4.2.1.1 Coefficients du modèle de la barrière en Presspahn d'épaisseur 4mm.....	78
4.2.2 Discussions des résultats.....	78
4.2.2.1 Coefficients du modèle de la barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm.....	83
4.2.2.2 Discussions des résultats.....	83
4.2.2.3 Coefficients du modèle de la barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm.....	86
4.2.2.4 Discussions des résultats.....	86
4.3 Rigidité diélectrique	90
4.3.1 Coefficients du modèle de la barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm.....	90
4.3.1.1 Discussions des résultats.....	90
4.3.2 Coefficients du modèle de la barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm.....	93
4.3.2.1 Discussions des résultats.....	93
4.4 Conclusion.....	98
Conclusion générale.....	99
Bibliographie.....	100
Annexe 1.....	104

LISTE DES TABLEAUX

Tableau.2. 1:Analyse de variance.	33
Tableau.3. 1: Propriétés de la Borak 22	41
Tableau.3. 2 : Domaine des variations des paramètres(U_c).....	43
Tableau.3. 3: Domaine des variations des paramètres (E).....	43
Tableau.3. 4: Matrice expérimentale de la tension de claquage (U_c)	45
Tableau.3. 5: Matrice expérimentale de la rigidité diélectrique (E)	46
Tableau.3. 6: Coefficients des modèles mathématiques (U_c).....	46
Tableau.3. 7: Coefficients des modèles mathématiques (E)	47
Tableau.3. 8: La matrice prédite de la tension de claquage (U_c).....	48
Tableau.3. 9: La matrice prédite de la rigidité diélectrique (E)	50
Tableau.3. 10: Coefficients de déterminations du modèle (U_c)	52
Tableau.3. 11:Coefficients de déterminations du modèle (E).....	51
Tableau.3. 12:Test de signification des coefficients du modèle de la tension de claquage (Presspahn. $e=4mm$) .	52
Tableau.3. 13:Test de signification des coefficients du modèle de la tension de claquage (Presspahn. $e=2mm$) .	52
Tableau.3. 14: Test de signification des coefficients du modèle de la tension de claquage (Bakélite. $e=4mm$)...	52
Tableau.3. 15: Test de signification des coefficients du modèle de la rigidité diélectrique (Presspahn $e=2mm$) .	53
Tableau.3. 16:Test de signification des coefficients du modèle de la rigidité diélectrique (Bakélite $e=4mm$)	53
Tableau.3. 17:Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour(Presspahn, $e=4mm$, $a/d= 40%$) ...	57
Tableau.3.18: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=4mm$, $a/d= 80%$) ..	57
Tableau.3.19: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=2mm$, $a/d= 40%$) ..	60
Tableau.3.20: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=2mm$, $a/d= 80%$) ..	60
Tableau.3.21: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Bakélite, $e=4mm$, $a/d= 40%$)	60
Tableau.3.22: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Bakélite, $e=4mm$, $a/d= 80%$)	61
Tableau.3.23: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=2mm$, $a/d= 40%$) ..	60
Tableau.3.24: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=2mm$, $a/d= 80%$) ..	61
Tableau.3.25: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Bakélite, $e=4mm$, $a/d= 40%$)	63
Tableau.3. 26: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Bakélite, $e=4mm$, $a/d= 80%$)...	64
Tableau.3. 27: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits (Presspahn , $e=4mm$, $d= 6cm$).....	64
Tableau.3. 28: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn , $e=4mm$, $d = 10cm$) .	65
Tableau.3. 29: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn , $e=2mm$, $d = 6cm$) ..	65
Tableau.3. 30: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn , $e=2mm$, $d = 10cm$) .	67
Tableau.3. 31: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Bakélite, $e=4mm$, $d = 6cm$)	66
Tableau.3. 32: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Bakélite, $e=4mm$, $d = 10cm$)	66
Tableau.3. 33:Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn , $e=2mm$, $d = 6cm$)...	67
Tableau.3. 34: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn , $e=2mm$, $d = 10cm$) .	67
Tableau.3. 35: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Bakélite, $e=4mm$, $d = 6cm$)	68
Tableau.3. 36: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Bakélite, $e=4mm$, $d = 10cm$)....	68
Tableau.3. 37: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=4mm$, $a/d= 40%$) .	70
Tableau.3. 38: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=4mm$, $a/d= 80%$) .	71
Tableau.3. 39: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=2mm$, $a/d= 40%$) .	73
Tableau.3. 40: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=2mm$, $a/d= 80%$) .	74
Tableau.3. 41: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Bakélite, $e=4mm$, $a/d= 40%$)	74
Tableau.3. 42: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Bakélite, $e=4mm$, $a/d= 80%$)	75
Tableau.3. 43: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits (Presspahn, $e=2mm$, $a/d= 40%$)	75

Tableau. 3. 44: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits (Presspahn, e=2mm, a/d= 80%)..	75
Tableau. 3. 45: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits (Bakélite, e=4mm, a/d= 40%)..	76
Tableau. 3. 46: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits (Bakélite, e=4mm, a/d= 80%)..	76
Tableau. 4. 1: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits (Presspahn, e=4mm, a/d= 40%)..	76
Tableau.4. 2: Comparaison entre les erreurs moyennes des résultats prédits et optimisés pour (Presspahn, e= 4mm, a/d=40%).....	79
Tableau. 4. 3: Comparaison entre les coefficients du modèle avant et après optimisation (Presspahn, e=4mm, a/d=80%).....	80
Tableau.4. 4: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, e= 4mm,a/d= 80%) ..	80
Tableau.4. 5: Optimisation des coefficients du modèle empirique de la tension de claquage d'une barrière en Presspahn d'épaisseur 4mm, à la position 80%	83
Tableau.4. 6: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites pour une barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm à la position a/d=40%.....	84
Tableau.4. 7: Optimisation des coefficients du modèle empirique de la tension de claquage d'une barrière en presspahn d'épaisseur e=2mm à la position 80%.....	84
Tableau.4. 8: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites pour une barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm à la position a/d=80%.....	84
Tableau.4. 9: Optimisation des coefficients du modèle empirique de la tension de claquage d'une barrière en presspahn d'épaisseur e=2mm à la position 80%.....	85
Tableau.4. 10: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites pour une barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm à la position a/d=40%.....	85
Tableau.4. 11: Optimisation des coefficients du modèle empirique de la tension de claquage d'une barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm, à la position 80%.....	87
Tableau.4. 12: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites pour une barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm à la position a/d=80%.....	-87
Tableau.4. 13: Optimisation des coefficients du modèle empirique de la tension de claquage d'une barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm, à la position 40%	92
Tableau.4. 14: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites pour une barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm à la position a/d=40%.....	92
Tableau.4. 15: Optimisation des coefficients du modèle empirique de la rigidité diélectrique d'une barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm à la position 80%	92
Tableau.4. 16: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites pour une barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm à la position a/d=80%.....	92
Tableau.4. 17: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites pour une barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm à la position a/d=40%.....	95
Tableau.4. 18: Optimisation des coefficients du modèle empirique de la rigidité diélectrique d'une barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm à la position 40%.....	95
Tableau.4. 19: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites pour une barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm à la position a/d=80%.....	95
Tableau.4. 20: Optimisation des coefficients du modèle empirique de la rigidité diélectrique d'une barrière en presspahn d'épaisseur 4mm à la position 80%	95
Tableau.4. 21: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites pour une barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm à la position a/d=80%.....	95

LISTE DES FIGURES

Figure.1. 1 : $U_{50} = f(a/d)$ pour les deux polarités. (Bakélite, $a=50\text{mm}$, $D=50\text{mm}$, $e=2\text{mm}$ et $r_p = 0,2\text{mm}$)	21
Figure.1. 2: Influence de la distance inter-électrodes sur l'efficacité de la barrière des deux polarités (Bakélite, $D=50\text{mm}$, $e=2\text{mm}$ et $r_p = 0,2\text{mm}$)	21
Figure.1. 3: $U_{50} = f(a/d)$ pour différent épaisseur en polarité négative (Bakélite, $a=100\text{mm}$, $D=50\text{mm}$ et $r_p = 0,25\text{mm}$)	23
Figure.1. 4: $U_{50} = f(a/d)$ pour différent épaisseur en polarité positive (Polyéthylène, $a=50\text{mm}$, $D=50\text{mm}$ et $r_p = 0,25\text{mm}$)	23
Figure.1. 5: $U_{50} = f(a/d)$ pour différent épaisseur en polarité négative (Polyéthylène, $a=50\text{mm}$, $D=50\text{mm}$ et $r_p = 0,25\text{mm}$)	23
Figure.1. 6: Influence de la nature de la barrière sur la tension U_{50} en polarité négative ($a=50\text{mm}$, $D=50\text{mm}$, $e=5\text{mm}$ et $r_p 0,25\text{mm}$)	24
Figure.2 1: Domaines expérimentaux	30
Figure.2 2: Effet d'un paramètre	30
Figure.2 3: Notion d'interaction	31
Figure.2 4: Degré de liberté d'un paramètre	32
Figure.2 5: Plan composite centré pour deux facteurs	33
Figure.2 6: Exemple de graphes d'adéquation du modèle	33
Figure.2 7: Echolocation	37
Figure.3. 1: Vue de la cellule d'essais	41
Figure.3. 2: Schéma de la cellule	41
Figure.3. 3: Forme de la barrière	41
Figure.3. 4: Station d'essai	41
Figure.3. 5: Représentation des points expérimentaux du CCF de la tension de claquage, pour (d , a/d , D)	44
Figure.3. 6: Représentation Point expérimentaux du CCF du champ électrique pour (d , a/d , D , e)	44
Figure.3. 7: Graphe d'adéquation du modèle de la tension de claquage (Presspahn, $e=4\text{mm}$)	50
Figure.3. 8: Graphe d'adéquation du modèle de la tension de claquage (Presspahn, $e=2\text{mm}$)	50
Figure.3. 9: Graphe d'adéquation du modèle de la tension de claquage (Bakélite, $e=4\text{mm}$)	50
Figure.3.10: Graphe d'adéquation du modèle de la rigidité diélectrique (E) (Presspahn, $e=2\text{mm}$)	51
Figure.3.11: Graphe d'adéquation du modèle de la rigidité diélectrique (E) (Bakélite, $e=4\text{mm}$)	51
Figure.3. 12: Histogramme des coefficients du modèle postulé (U_c) (Presspahn, $e=4\text{mm}$)	54
Figure.3.13: Histogramme des coefficients du modèle postulé (U_c) (Presspahn, $e=2\text{mm}$)	54
Figure.3. 14: Histogramme des coefficients du modèle postulé (U_c) (Bakélite $e=4\text{mm}$)	54
Figure.3. 15: Histogramme des coefficients du modèle postulé (E) (Presspahn, $e=2\text{mm}$)	54
Figure.3. 16: Histogramme des coefficients du modèle proposé de la rigidité diélectrique (E) (Bakélite, $e=4\text{mm}$)	55
Figure.3. 17: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=40\%$)	57
Figure.3.18: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d=40\%$)	56
Figure.3. 19: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=40\%$)	56

Figure.3. 20: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	57
Figure.3. 21: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	57
Figure.3. 22: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	58
Figure.3. 23: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=40\%$).....	62
Figure.3.24: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d=40\%$).....	62
Figure.3. 25: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=40\%$).....	62
Figure.3. 26: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	62
Figure.3. 27: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	62
Figure.3. 28: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	62
Figure.3. 29: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=40$ et 80%).....	63
Figure.3. 30: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d=40$ et 80%).....	63
Figure.3. 31: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=40$ et 80%).....	64
Figure.3.32: Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $d=6\text{cm}$ et $D=10\text{cm}$).....	65
Figure.3.33: Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $d=10\text{cm}$ et $D=10\text{cm}$).....	65
Figure.3. 34: Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $d=6$ et 10cm).....	67
Figure.3. 35: Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d=6$ et 10cm).....	67
Figure.3. 36: Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $d=6$ et 10cm).....	68
Figure.3. 37: Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière (Bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $d=6$ et 10cm).....	68
Figure.3. 38: Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière (Bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d=6$ et 10cm).....	70
Figure.3. 39: Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière (Bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $d=6$ et 10cm).....	70
Figure.3. 40: Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $a/d = 40\%$) pour différents diamètres.....	72
Figure.3.41: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour différents diamètres (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $a/d = 40\%$).....	73
Figure.3.42: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour différents diamètres de la barrière en Bakélite ($e=4\text{mm}$, $a/d = 40\%$).....	74
Figure.3.43: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes de la barrière, (Presspahn, $e=24\text{mm}$, $a/d = 40\%$), pour différents diamètres.....	75

Figure.3.44: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes de la barrière, (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $a/d = 80\%$), pour différents diamètres	75
Figure.3.45: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour différents diamètres d'une barrière (Bakélite, $e= 4\text{mm}$, $a/d = 40\%$).....	76
Figure.3.46: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour différents diamètres d'une barrière en Bakélite ($e= 4\text{mm}$, $a/d 80\%$).	76
Figure.4. 1: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=40\%$).....	81
Figure.4. 2: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d=40\%$).....	81
Figure.4 .3: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=40\%$).....	82
Figure.4. 4: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	82
Figure.4. 5: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	83
Figure.4. 6: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	83
Figure.4. 7: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=40\%$).....	85
Figure.4. 8: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d=40\%$).....	85
Figure.4. 9: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=40\%$).....	86
Figure.4. 10: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	86
Figure.4. 11: Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d= 80\%$)	88
Figure.4. 12: Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d= 80\%$)	88
Figure.4. 13: Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière (Bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d= 40\%$)	89
Figure.4. 14: Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière (Bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d= 40\%$)	89
Figure.4. 15: Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière (Bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d= 40\%$)	90
Figure.4. 16: Variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière (Bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d= 80\%$)	90
Figure.4 .17: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	91
Figure.4. 18: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	91
Figure.4. 19: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	93
Figure.4. 20: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	93
Figure.4. 21: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes,(Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	95

Figure.4. 22: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	96
Figure.4. 23: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=40\%$).....	96
Figure.4. 24: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Bakélite, $e = 4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d=40\%$).....	97
Figure.4. 25: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière en Bakélite ($e= 4\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=40\%$).....	97
Figure.4. 26: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière en Bakélite ($e= 4\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	98
Figure.4. 27: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière en Bakélite ($e= 4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	98
Figure.4. 28: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière en Bakélite ($e= 4\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=80\%$).....	98

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les transformateurs renferment une combinaison de deux matériaux isolants: l'huile minérale et les écrans en carton comprimé ou en papier cellulosique. Ces dernières constituent un interface lorsque l'huile est en contact avec les constituants cellulosiques. Le composé liquide-solide initialement neutre, se polarise sous l'effet d'un phénomène physico-chimique à l'interface. Des charges électriques apparaissent à l'interface: l'huile se charge positivement et le carton négativement [1]–[3]. En revanche, le carton étant très isolant, il accumule les charges négatives. Une accumulation trop importante de charges à sa surface peut engendrer des potentiels de surface élevés et des décharges superficielles. Ces décharges, plus ou moins importantes, détériorent les propriétés diélectriques de l'huile et du matériau cellulosique, et sont responsables de claquages destructifs. La compréhension des mécanismes de claquage des deux milieux considérés différemment est fondamentale pour la conception et le dimensionnement des équipements. Il est donc primordial de s'approfondir dans l'étude des phénomènes intervenant dans la phase de pré-claquage et de claquage. L'huile minérale est un mélange complexe de composés naphthéniques, paraffiniques et aromatiques de dérivés de pétrole. La proportion de ces composés dans l'huile varie suivant le type d'huile [3]–[5]. Chaque type est caractérisé par ses propriétés diélectriques, ses propriétés physiques et ses propriétés chimiques. Le claquage des diélectriques liquides diffère de celui des gaz et des solides et l'étude de leur rupture diélectrique est très complexe, puisqu'elle fait appel à des lois fondamentales sur la matière, raison pour laquelle certains mécanismes ont été avancés pour expliquer le claquage des milieux liquides dont les plus connus sont: Le claquage électronique, Le claquage faisant intervenir une phase gazeuse et le claquage par pont. Il existe plusieurs paramètres influant sur la rigidité diélectrique: L'augmentation de la distance inter-électrodes engendre la croissance de la tension de claquage[2], [6], [7]. Par ailleurs, la rigidité diélectrique du liquide diminue avec l'accroissement de la distance inter-électrodes[2], [3], [8]. La pression hydrostatique a un effet considérable sur la tension de claquage des diélectriques liquides; celle-ci est d'autant plus élevée que la pression est accrue [2], [9]. L'augmentation de la température entraîne généralement la diminution de la rigidité diélectrique de l'huile[2], [3], [10]. La présence d'un peu d'humidité dans le liquide diminue considérablement la rigidité diélectrique de ce dernier [3], [11], [12]. Par ailleurs, le claquage des solides entraîne la destruction du matériau et la mise hors service de l'appareil ou du système dont il fait partie. Par conséquent, selon le processus de pré-claquage, on distingue trois types de mécanismes de claquage des isolants solides[3], [12]: Le claquage électrique, le claquage thermique et le claquage électromécanique. En plus de ces derniers, il existe les mécanismes liés au vieillissement du matériau, aux défauts apparaissant dans le volume (cavités gazeuses ou impuretés) ou à la surface du matériau. Dans ce cas, on parle de claquage dû aux décharges partielles ou de claquage dû à la charge d'espace.

L'objet principal de notre travail est la modélisation de la tension de claquage et de la rigidité diélectrique de l'huile de transformateur en présence d'une barrière isolante. Le liquide utilisé dénommé Borak 22 est une huile minérale de type naphthénique de permittivité ($\epsilon_r=2,12$) utilisé par la SONELGAZ. Une configuration pointe-plan sous tension alternative de fréquence 50Hz a été utilisée. Sur la base des essais expérimentaux effectués au niveau du Laboratoire de Recherche en Electrotechnique de l'ENP dans le cadre d'un projet de recherche au laboratoire de Haute Tension dans la préparation de notre mémoire de magister. A cet effet, nous avons modélisé la tension de claquage et la rigidité diélectrique pour des barrières en Presspahn et en Bakélite via la méthode du plan d'expérience dite DOE (Design of Experiment). A la base des modèles mathématiques des deux sorties, en variant les paramètres d'entrés, les résultats trouvés par les modèles sont appelés prédits (U_{pred} et E_{pred}). Ils sont calculés à l'aide d'un tableur Excel et sont donnés sous forme de tableau. Pour vérifier la précision des résultats trouvés par nos modèles empiriques, nous avons calculé les erreurs relatives des deux sorties prédites et expérimentales qui doivent être inférieures ou égales à

Introduction générale

5%. La validation est faite pour les deux valeurs des positions relatives de la barrière $a/d=40$ et 80%, et des distances inter-électrodes $d=6$ et 10cm. L'erreur relative des deux sorties supérieure au seuil de 5% est considérée comme résultat inacceptable. Pour sa, nous avons effectué un ajustement des coefficients de nos modèles mathématiques par une technique d'essaim de chauves-souris, nommée algorithme des chauves-souris (BAT algorithme), dans le but de minimiser les erreurs.

Dans le premier chapitre de notre thèse, nous présentons une synthèse bibliographique par ordre chronologique des travaux publiés sur l'influence des barrières. Elle regroupe les travaux de plusieurs auteurs dans les cas des intervalles d'air et d'huile. Il a été trouvé que l'insertion des barrières dans des configurations pointe-plan améliore significativement la tension de claquage. L'effet de la variation de la position entre électrodes, épaisseur, dimension, permittivité et de leurs interactions pour différentes longueurs d'intervalles est bien détaillé dans le manuscrit.

Le second chapitre est subdivisés en deux volets, dans le premier volet nous définissons et expliquons la terminologie utilisée par la méthode du plan d'expérience (DOE) pour les entrées et les sorties. Les niveaux de chaque paramètre. Nous présentons par la suite le type du modèle au quel nous avons choisi dans ce travail. L'étude statistique et graphique des modèles élaborées, enfin la validation de modélisation. Une méthode d'optimisation basée sur l'algorithme de chauve-souris est présentée dans le deuxième volet de ce chapitre.

L'application de la méthode DOE pour la modélisation des deux sorties choisies fait l'objet du troisième chapitre, tous les résultats expérimentaux et de prédictions sont comparés et commentés. Nous achevons ce chapitre par une discussion des résultats obtenus.

Le quatrième chapitre porte sur la minimisation des erreurs relatives des résultats trouvés par la modélisation, la minimisation est caractérisé par l'erreur moyenne (k_{moy}), en utilisant l'algorithme de chauve-souris (BAT). Les résultats sont donnés ce forme de tableau. À la fin nous terminons le chapitre par une conclusion.

Nous terminons par une conclusion générale et des perspectives visant à développer la présente étude.

CHAPITRE 1

*ETAT DE L'ART SUR L'INFLUENCE
DES BARRIERES ISOLANTES DANS
DES INTERVALLES D'AIR ET
D'HUILE*

Chapitre 1 Etat de l'art sur l'influence des barrières isolantes dans des intervalles d'air et d'huile

1. 1 Introduction

Dans les transformateurs, l'huile minérale est utilisée pour empêcher la formation de décharges susceptibles de se produire en des points ou des régions où le champ électrique est plus intense (extrémités de bobinages, points de connexion,.. etc.).

L'huile est utilisée conjointement avec des isolants solides formant des barrières isolantes au développement de la décharge électrique. L'avantage fourni par l'utilisation de ces dernières dans un intervalle est l'amélioration de la rigidité diélectrique. L'amélioration due surtout à l'uniformisation du champ dans l'espace barrière - plan, due à la charge positive déposée sur la surface de la barrière en face de la pointe. Le placement des barrières près de la pointe entraîne une augmentation considérable de la tension disruptive. Cette augmentation est causée surtout par l'allongement du canal de la décharge disruptive qui suit un chemin allant de la pointe vers le bord de la barrière et de ce bord vers le plan mis à la terre [3].

Dans ce chapitre nous présentons une synthèse bibliographique par ordre chronologique des travaux publiés qui traitent l'influence des barrières dans des intervalles d'air et d'huile.

1.2 Influence de l'insertion d'une barrière isolante dans des intervalles d'air

1.2.1 D'après E. MARX

MARX [13], montra en 1930 que l'insertion d'une plaque isolante, dans un champ divergent induit une modification de la forme des décharges dans l'intervalle inter électrodes. Pour la rupture diélectrique aux chocs (0.5/ 100 μ s) d'un intervalle d'air pointe-plan de 50 cm, il a obtenu une amélioration de la tension disruptive lorsque la barrière est située près de la pointe positive. Lorsque la pointe est négative, les décharges apparaissent des deux côtés de la barrière et la rendent sans effet. En tension continue négative, la tension disruptive peut être diminuée fortement. Sous des impulsions de choc, l'augmentation de la tension disruptive a été prélevée à une position de 60% de la longueur de l'intervalle (pointe-plan), contrairement à des positions proches de l'une des électrodes où la tension disruptive diminue. En tension alternative, l'amélioration de la rigidité du système a été remarquée pour des positions de la barrière située entre 20% et 60% de l'intervalle d'air pointe-plan[3], [14]–[18].

1.2.2 D'après H. ROSER

ROSER [19], a étudié l'influence des barrières de différentes permittivités sur la tension disruptive aux chocs de foudre, en tension alternative et continue, pour divers systèmes d'électrodes. Dans le cas du système pointe positive-plan, la charge d'espace qui se dépose à la surface de la barrière isolante est positive. Elle tend à uniformiser le champ électrique entre la barrière et le plan. Ceci engendre l'augmentation de la tension de décharge disruptive. Par contre, dans le cas de la pointe négative, il peut y avoir une réduction de la tension disruptive.

1.2.3 D'après TIKHODEEV

Le processus de décharge selon TIKHODEEV [20], en tension impulsionnelle positive est subdivisé en trois étapes principales:

- Etape non stationnaire de remplissage de la barrière par les charges (formation de double couche.
- Une étape stationnaire de contournement de la barrière par les décharges glissantes.
- Etape de claquage de l'intervalle pointe- barrière –plan, où la décharge s'effectue du bord de la barrière vers le plan.

Pour une pointe négative on trouve trois étapes :

- La décharge s'effectue de la pointe vers la barrière.

Chapitre 1 Etat de l'art sur l'influence des barrières isolantes dans des intervalles d'air et d'huile

- Pour un niveau de tension supérieure, la barrière est contournée par les décharges glissantes. D'autre part, à partir de l'électrode plane apparaît une décharge vers la surface opposée de la barrière.
- L'amorçage s'effectue après la rencontre des deux décharges venant de part et d'autre de la barrière.

1.2.4 D'après M.P. VERMA

VERMA [21] a travaillé sur les chocs de foudre positifs des intervalles d'air pointe-barrière-plan de 4 à 14 cm. La variation de la tension disruptive en fonction de la distance inter électrodes obtenues présente des pentes comprises entre 5 et 30kV/cm, selon la position de la barrière.

1.2.5 D'après J.PILLING

PILLING [22] a étudié l'influence des barrières isolantes sur la tension disruptive en tension alternative des intervalles d'air pointe-plan allant jusqu'à 20cm. Il a vérifié que la tension disruptive de l'intervalle est équivalente à la somme des tensions disruptives des intervalles d'air des deux côtés de la barrière et de la chute de tension sur la barrière.

1.2.6 D'après M.AWAD

AWAD [23] a étudié le comportement des barrières polluées dans des intervalles d'air pointe-pointe de longueur inférieure à 12cm, pour des tensions de choc de manœuvre 23/3000 μ s. Il a constaté que la tension de claquage diminue lorsque la conductivité superficielle augmente, puis tend vers une valeur constante pour une conductivité superficielle supérieure ou égale à 3 μ S dans le cas où la surface polluée est en face de la pointe HT.

1.2.7 D'après A.BOUBAKEUR

A.BOUBAKEUR [24], a travaillé sur les intervalles d'air pointe-plan de 40 à 200cm, en tensions de choc de foudre et de manœuvre positives et en tension alternative à fréquence industrielle. Il a montré que la barrière isolante joue un rôle d'obstacle géométrique provoquant l'augmentation de la tension disruptive, quand la barrière est proche de la pointe aux environ de 20% de la distance pointe-plan. Cette augmentation est due à l'allongement du canal de la décharge disruptive [25]. L'évolution de la décharge peut être directe ou par étapes. La décharge directe est obtenue lorsqu'aucune décharge superficielle à la surface de la barrière n'est observée. Ce cas est généralement obtenu dans le cas où la barrière est suffisamment éloignée de l'une des électrodes [3], [14], [20]. Dans ce cas, la décharge contourne la barrière en la touchant dans un seul point, elle suit dans l'air le trajet pointe-bord de la barrière-plan. L'évolution de la décharge s'effectue par étapes lorsque la barrière est proche de la pointe positive. Dans ce cas, la décharge est composée de l'étincelle pointe-milieu de la barrière, de la décharge glissante sur la barrière et de la décharge bord de la barrière-plan.

Dans le cas d'une pointe de polarité négative, la décharge par étapes apparaît pratiquement pour toutes les positions de la barrière. Notamment, il a mis en évidence l'apparition de décharges ascendantes positives, dans le cas d'une pointe négative pour un intervalle d'air pointe-plan de 1,5m [26].

A.BOUBAKEUR a également travaillé sur l'influence des couches semi-conductrices appliquées sur la barrière isolante, où il a remarqué leur effet négatif sur la tension disruptive; ceci à partir des conductivités superficielles supérieures à 0.4 μ S et pour des distances pointe-barrière comprises entre 20 et 100 % de l'intervalle complet.

Chapitre 1 Etat de l'art sur l'influence des barrières isolantes dans des intervalles d'air et d'huile

Dans le cas d'une barrière conductrice, il a constaté que lorsque la barrière est en contact avec la pointe, la tension disruptive augmente. Par contre, lorsqu'elle est située au voisinage de la zone médiane de l'intervalle pointe-plan elle décroît. Dans le cas où la barrière est suffisamment proche du plan, la tension disruptive de l'arrangement "pointe-barrière-plan" reste voisine de celle de l'arrangement "pointe-plan" sans barrière [14], [16], [25]. Une étude a été réalisée sur le champ électrique dont le but est de vérifier l'uniformisation de celui-ci dans la partie barrière-plan lors d'une décharge en géométrie pointe-barrière métallique-plan. Il a été conclu que lorsque la pointe est sous tension, la barrière conductrice se charge par influence électrostatique et la distribution du champ se fait de deux manières. L'une non uniforme dans l'intervalle pointe-barrière et l'autre pratiquement uniforme dans l'intervalle barrière-plan. A cet effet le système "pointe-barrière-plan" aurait une rigidité équivalente à la somme de la rigidité d'un intervalle pointe-plan correspondant à la distance pointe-barrière et de celle d'un système plan-plan correspondant à l'intervalle barrière-plan. L'approximation du calcul de la tension disruptive est acceptable en tension positive pour des positions de la barrière proches du plan, à l'inverse de la tension continue de polarité négative. A. BOUBAKEUR a aussi étudié l'influence de la charge spatiale déposée sur la barrière en réalisant des trous de différents diamètres au centre de la barrière [27]. La décharge disruptive passe généralement par le bord de la barrière pour des trous de faible diamètre et elle passe par le trou à partir d'un certain diamètre limite de 10mm.

1.2.8 D'après Li MING

L'augmentation de la largeur de la barrière entraîne celle de la tension disruptive de l'intervalle pointe-barrière-plan. Pour les petites largeurs de la barrière, la tension disruptive est faiblement améliorée. Li MING [28] a mesuré la tension disruptive en système pointe-plan sous tension impulsionnelle. Il a obtenu une augmentation de 30 à 45% pour une barrière de forme hémisphérique et dont la cavité est en face de la pointe, par rapport à la valeur de la tension de claquage d'une barrière plane. La propagation des streamers influe sur la tenue diélectrique et ne mène pas nécessairement à la rupture de l'intervalle d'air. Les décharges préliminaires accélèrent le vieillissement de la barrière et augmentent la quantité de la charge superficielle qui facilite les décharges glissantes. La tension de rupture est inférieure à celle de l'intervalle sans barrière pour une barrière proche du plan.

1.2.9 D'après Z.YOUBIN

You BIN [29], a travaillé sur les intervalles pointe-barrière-plan sous tension continue. La distribution des porteurs de charges positifs sur la surface de la barrière et la chute de tension entre les faces opposées de la barrière sont influencées par l'épaisseur et la permittivité de la barrière utilisée. Lorsque ces dernières auront des valeurs importantes, le champ électrique entre la barrière et le plan devient de plus en plus uniforme, mais leur influence est beaucoup moins importante par comparaison à l'effet de la largeur et de la position de la barrière.

1.2.10 D'après M.V.SOKOLOVA

SOKOLOVA [30] a effectué des mesures des courants de décharges pour des intervalles d'air avec différents matériaux de la barrière. L'analyse des oscillogrammes a montré que chaque impulsion de courant a une structure complexe. Les deux matériaux utilisés produisent des effets différents sur la rigidité de l'intervalle malgré leur même épaisseur et même permittivité. SOKOLOVA a aussi effectué des mesures pour deux situations différentes:

- L'une pour une barrière propre lavée avec de l'alcool puis avec de l'eau distillée ;

Chapitre 1 Etat de l'art sur l'influence des barrières isolantes dans des intervalles d'air et d'huile

- L'autre pour la même barrière après trente heures sous une décharge électrique. La surface de la barrière devient polluée après la décharge.

1.2.11 D'après M. C. SIDDAGANGAPA

Selon SIDDAGANGAPA [31], La distribution du champ électrique et les niveaux de tension de claquage sont modifiés par l'accumulation de la charge sur un isolant où la modification du champ sur la surface peut mener aux décharges glissantes. Il est important de savoir que l'influence de cette accumulation sur la distribution du champ électrique dans les systèmes stratifiés (gaz-solide) est un paramètre fondamental pour établir une meilleure isolation. L'utilisation de la méthode de simulation de charge pour le calcul du champ électrique et de la tension disruptive concorde avec la base de données expérimentale obtenue, par NAKANISHI[3], [14], [20],[30].

1.2.12 D'après F.V. TOPALIS et I.A. STATHOPOULOS [32]

La rigidité diélectrique de l'air s'améliore pour des positions relativement éloignées de la barrière des deux électrodes, dans le cas des petits et moyens intervalles. L'effet de la barrière n'est plus le même dans le cas des longs intervalles et pour des positions de la barrière équivalentes à celles du cas précédent. Selon les conditions expérimentales, ceci est dû à l'influence du phénomène physique dénommé 'leader', qui est matérialisé par un canal lumineux observé dès que la distance inter électrodes dépasse 80cm. En tension impulsionnelle et en géométrie d'électrodes pointe-pointe, l'insertion de deux barrières de manière à ce que l'une soit fixe et l'autre mobile ne change presque pas la tension de claquage en fonction de la position de la barrière, mais reste toutefois supérieure à celle de l'intervalle d'air ayant une seule barrière[14], [17], [20], [30],[31],[32].

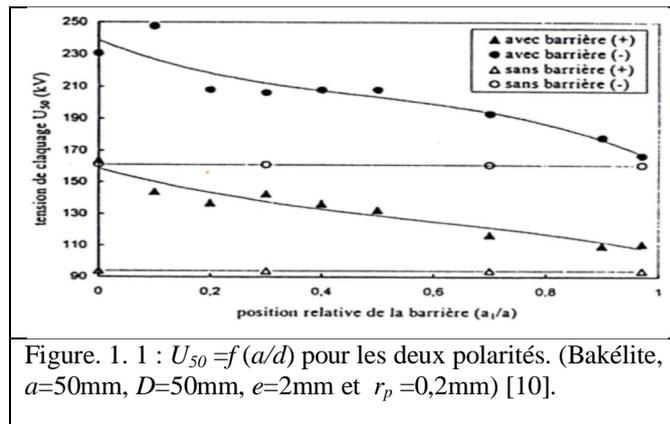
Dans le cas d'un système pointe-plan, la tension disruptive augmente de 35% pour une barrière située à 20% de la distance inter électrodes. L'insertion de trois barrières a été réalisée par Y JULLIARD, où il a constaté une amélioration de la rigidité diélectrique du système par rapport à l'introduction de deux barrières.

1.3 Influence de l'insertion d'une barrière isolante dans des intervalles d'huile

1.3.1 Influence de la polarité

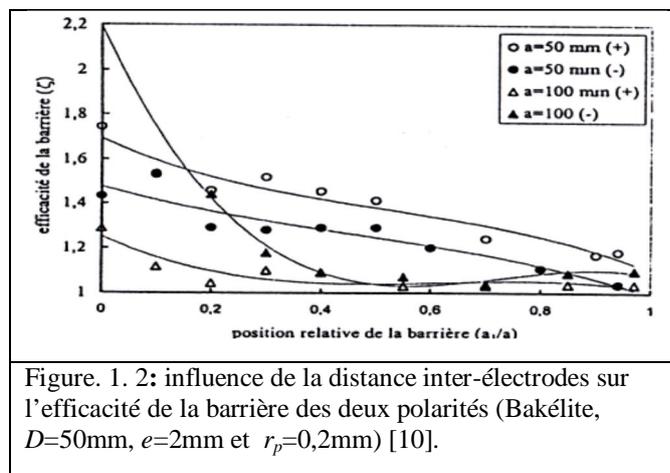
A.ZOUAGHI [10] a montré qu'un système d'électrode pointe-plan, est moins rigide en polarité négative qu'en polarité positive. La présence de la barrière améliore la tenue diélectrique de la structure quelle que soit la polarité. La tension de claquage dépend surtout de la position de la barrière dans l'intervalle [3], [10], [14]. Sur la figure (1.1) sont présentées les caractéristiques $U_{50} = f(a_1/a)$ en fonction de la polarité, pour une barrière en Bakélite. Il a été observé que lorsque la barrière est placée au voisinage de la pointe, son efficacité qui est définie par le rapport de la tension de claquage en présence de la barrière à celle sans barrière, en polarité négative est de 1,4 contre 1,7 en polarité positive pour un rayon donné de la barrière; l'efficacité de la barrière varie avec son rayon et sa nature.

Chapitre 1 Etat de l'art sur l'influence des barrières isolantes dans des intervalles d'air et d'huile



1.3.2 Influence de la distance inter-électrodes

Dans les grands intervalles ($a=50\text{cm}$), l'influence de la barrière est négligeable lorsqu'elle est placée au voisinage de l'électrode plane. Quelle que soit la polarité de la tension appliquée, et la nature de la barrière, la tension de claquage est plus importante au voisinage de l'électrode acérée. Pour une distance inter-électrodes de 100mm, soit le double de celle considérée dans le cas précédent ($a=50\text{mm}$), nous remarquons que dans les cas des grands intervalles, l'efficacité de la barrière est plus importante quand celle-ci est au voisinage de l'électrode acérée. Elle diminue avec l'augmentation de la distance inter-électrodes quelle que soit la nature de la barrière et la polarité de la tension appliquée, par contre elle est négligeable au voisinage de l'électrode plane (Figure.1.2) [10].



1.3.3 Influence de la position de la barrière

L'influence de la position de la barrière dépend également des paramètres électro géométriques du système à savoir la distance inter-électrodes, la configuration des électrodes. Les niveaux de tensions de claquages supérieurs sont obtenus dans l'huile minérale, quand la barrière est au voisinage de la pointe. Dans un système pointe-plan, en tension continue, c'est la distance pointe-barrière est faible, la tension de claquage devienne élevé. La barrière placée tout près de l'électrode pointe se comporte comme une électrode plane [10].

1.3.4 Influence des dimensions de la barrière

1.3.4.1 Influence des dimensions de la barrière

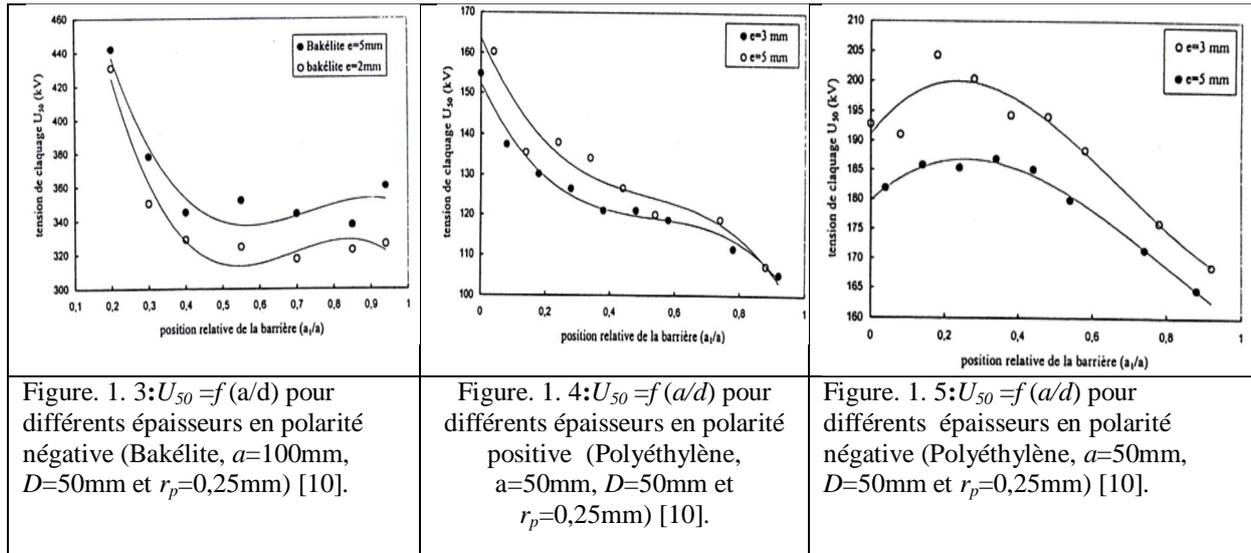
L'augmentation du rayon de la barrière améliore significativement la rigidité du système (de 1,25 à 1,5 selon la polarité), pour deux barrières de même nature (bakélite) et même

Chapitre 1 Etat de l'art sur l'influence des barrières isolantes dans des intervalles d'air et d'huile

épaisseur ($e=2\text{mm}$) mais de rayon deux fois plus grand, avec une distance inter-électrodes constante ($a=50\text{mm}$) [10].

1.3.4.2 Influence de l'épaisseur de la barrière

L'augmentation de l'épaisseur d'une barrière en bakélite entraîne une augmentation de la tension de claquage quelles que soient sa position entre les électrodes, la polarité de la tension appliquée et la distance inter-électrodes. Toutefois L'épaisseur influe sur la distribution de porteurs de charges positifs à la surface de la barrière. Par conséquent, le champ devient de plus en plus uniforme entre la barrière et le plan. [10], [14], [16], [18], [32].



1.3.4.3 Influence de la nature de la barrière

En polarité positive, une barrière en bakélite est plus efficace qu'une barrière en polyéthylène. Mais lorsque la distance inter-électrodes augmente, la barrière en polyéthylène est plus efficace qu'une barrière en bakélite. La différence entre eux réside, en plus des valeurs de leurs permittivités et des pertes diélectriques, dans la résistance mécanique de chocs de chaque matériau [10].

L'efficacité de la barrière dépend également de sa nature, sous tension de choc, il a été observé que pour des distances $d < 50\text{cm}$, en polarité négative comme en polarité positive, une barrière en bakélite est plus efficace qu'une barrière en polyéthylène (Figure.1.6). En augmentant la distance inter électrodes, une barrière en polyéthylène est plus efficace qu'une barrière en bakélite. La différence entre une barrière en bakélite et en autre en polyéthylène réside, en plus des valeurs de leur permittivité et des pertes diélectriques, dans la résistance mécanique aux chocs de chaque matériau. Par ailleurs, l'auteur [10] a remarqué qu'en augmentant la distance inter-électrodes ($a=100\text{mm}$), une barrière en polyéthylène est plus efficace qu'une barrière en bakélite. Cette efficacité est d'autant plus importante que la barrière est proche du plan.

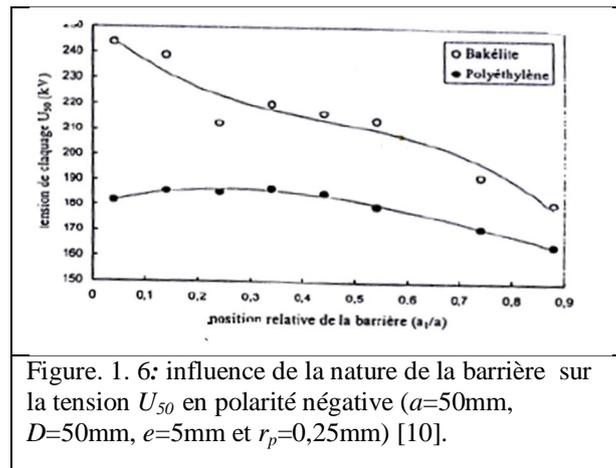


Figure. 1. 6: influence de la nature de la barrière sur la tension U_{50} en polarité négative ($a=50\text{mm}$, $D=50\text{mm}$, $e=5\text{mm}$ et $r_p=0,25\text{mm}$) [10].

1.3.4.4 Influence des perforations

Lorsque la barrière se trouve au voisinage de l'électrode acérée, la probabilité du passage de la décharge à travers l'ouverture est plus grande, elle devient faible lorsque on s'approche de l'électrode plane. Il apparaît que l'influence des perforations est d'autant plus marquée pour les petits intervalles que pour les grands intervalles [10].

1.3.4.5 Influence du nombre de barrières

Dans l'huile minérale, le nombre de barrières n'a aucune influence apparente sur la tension de claquage d'une structure divergente. Ceci peut être dû au fait que l'angle solide constitué par la pointe et la barrière dépend uniquement du rayon de la première barrière et de sa position. Cependant, l'intérêt de cette association peut apparaître lors d'un défaut sur la première [10], [14].

Les principaux résultats expérimentaux trouvés selon M.ZITOUNI [3]:

- L'augmentation de la distance inter-électrodes entraîne un accroissement de la tension de claquage sans barrière.
- Le rayon de courbure de la pointe, n'a pas d'influence sur la tension de claquage, pour les grandes distances supérieur à 8cm. Pour les moyennes distances ($d=6$ et 8cm), une diminution de la tension de claquage a été remarquée avec l'augmentation des rayons de courbures ($r_p=1,2$ et 3mm), puis elle augmente avec les rayons importants supérieurs à 4mm . Pour les petites distances, la tension de claquage augmente avec le rayon de courbure.
- L'insertion d'une barrière isolante dans un système d'électrodes divergent améliore de façon significative la tension disruptive du système, quels que soient la nature, l'épaisseur et le diamètre de la barrière.
- Notons que la tension de claquage est maximale à 20% à partir de l'électrode acérée. Au-delà de cet optimum, elle décroît avec la position de la barrière et tend vers une valeur proche à celle sans barrière, la tension de claquage prend des valeurs élevées pour les grandes distances par rapport aux petites, quels que soient la nature, le diamètre et l'épaisseur de la barrière isolante.
- L'efficacité de la barrière (le rapport de tensions de claquage du système avec barrière à celle sans barrière), dépend du diamètre et de l'épaisseur de cette dernière. Plus le diamètre est grand, plus le système d'isolation est rigide, surtout à la position 20% de l'intervalle inter-électrodes, cette amélioration est due à des conditions intrinsèques du milieu (charge d'espace, impuretés...). Cependant l'augmentation de l'épaisseur entraîne une augmentation de la tension de claquage lorsque la barrière en Presspahn est entre 0 et 20%, par contre la barrière en bakélite améliore la tension quelle que soit la position, pour dire que l'amélioration de la tension de claquage dépend de la nature de cette dernière.

Chapitre 1 Etat de l'art sur l'influence des barrières isolantes dans des intervalles d'air et d'huile

•Il apparaît qu'une barrière en bakélite est plus efficace que celle en Presspahn de diamètre 14cm, même lorsqu'on augmente la distance inter-électrodes, cette amélioration serait due au fait que la décharge se développe facilement sur l'isolant de plus grande permittivité.

1.4 Conclusion

L'insertion des barrières isolantes dans des intervalles d'air et d'huile augmente la rigidité diélectrique, cette augmentation dépend des paramètres concernant la barrière elle-même tels que: la permittivité (la nature), la position relative, la distance inter-électrodes et la dimension. La variation de ces paramètres influence la tension disruptive dans des configurations pointe- plan ou le champ est considéré divergent. La barrière divise l'intervalle en deux sous système : un premier système ou le champ électrique reste non-uniforme, et la deuxième, barrière- plan; dans cette configuration le champ électrique devient uniforme. Le déplacement des barrières entre l'intervalle et auprès de la position 20%, un optimum est bien remarqué, là où la tension de claquage devienne maximale. Les barrières jouent le rôle d'un obstacle géométrique à la décharge disruptive, elles assurent une meilleure qualité d'isolation.

CHAPITRE 2

*GÉNÉRALITÉS SUR LA MÉTHODE
DU PLAN D'EXPÉRIENCE ET
ALGORITHME DE CHAUVE-SOURIS*

2.1 Introduction

La technique du plan d'expérience constitue une stratégie de planification d'expériences, elle permet d'effectuer les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles, afin d'obtenir des conclusions solides de manière efficace et économique. Elle vise à établir et analyser les relations existant entre les grandeurs étudiées (les réponses ' y_i ') et leurs sources de variations (les paramètres d'entrées ' x_i ') et de chercher le lien qui existe entre eux. L'utilisation des plans d'expériences permet d'obtenir un maximum de renseignements avec un minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur, telles que les plans factoriels complets à deux niveaux et le plan composite centré.....

Elle a donc pour but de déterminer des modèles mathématiques reliant les grandeurs d'intérêt aux variables contrôlables. Les plans d'expériences apportent une aide notable aux expérimentateurs et constituent un outil indispensable à toute élaboration de stratégies expérimentales sans restriction disciplinaire.

Parmi les industries pouvant utiliser cette méthodologie, on peut notamment citer:

- Industries chimique, pétrochimique et pharmaceutique;
- Industries mécanique et automobile;
- Industrie métallurgique.

Le succès de la démarche originale des plans d'expériences réside dans la possibilité d'aboutir aux résultats escomptés et d'interpréter ces résultats avec un effort minimal sur le plan expérimental. La minimisation du nombre d'expériences à effectuer pour une étude donnée permet un gain en temps et en coût financier.

2.2 Modélisation à base de la méthodologie des plans d'expériences

La méthodologie des plans d'expériences permet de prévoir le nombre d'expériences à accomplir en fonction d'un objectif bien défini, d'étudier plusieurs paramètres simultanément, de réduire la dispersion liée à la mesure, d'apprécier les effets de couplage entre paramètres et d'évaluer l'influence respective des paramètres et leurs interactions [33], [34]. Cette méthode s'appuie sur des règles statistiques et analytiques pour modéliser le procédé étudié, afin de réduire, de contrôler au maximum le temps d'expérimentation et de détecter les points expérimentaux de mesure douteux [33]–[35].

2.2.1 Historique

Les premières lueurs de la méthode des plans d'expérience est le mathématicien britannique Sir Ronald FISHER en 1925[33]–[35]. Il proposa une technique qui organise et prend en charge la variation de toutes les variables d'une expérience en même temps. Mais à cause de son aspect trop théorique elle n'eut point le mérite qu'elle devait recevoir. Il fallait attendre les travaux de G. TAGUCHI au Japon pour que la méthode des plans d'expérience ait tout l'essor qu'elle connaît aujourd'hui. Sa contribution majeure a consisté à combiner les techniques de l'ingénierie et des statistiques pour obtenir une amélioration rapide des coûts et de la qualité, en recherchant une optimisation au niveau de la conception du produit et des processus de fabrication. On lui doit la fonction perte de qualité et le ratio (signal/bruit) qui permet de se positionner dès le début du développement du produit et lorsqu'il est encore temps d'apporter des améliorations d'un coût raisonnable. Les plans d'expériences TAGUCHI ont contribué au succès des japonais dans le domaine de la qualité, ce qui leur a permis de devenir, depuis maintenant plus de 20 ans, les leaders mondiaux au niveau de la qualité tout en ayant des prix de revient compétitifs. En occident, l'utilisation de la méthode a commencé à se développer tout d'abord aux Etats-Unis à partir de 1983, puis au Canada et en Grande Bretagne dès 1986, et en fin en France et en Espagne depuis 1988 [33]–[36].

2.2.2 Définition et conditions d'application des plans d'expériences

La technique des plans d'expériences va permettre de répondre à nos exigences. En effet, son principe consiste à faire varier simultanément les niveaux de un ou plusieurs paramètres (qui sont des variables discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre d'une part, de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de paramètres étudiés et d'autre part, à détecter les interactions entre les paramètres et la détermination du réglage dit optimal de ces paramètres par rapport à une réponse. Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision sur les résultats. Il existe actuellement un nombre important de plans différents. Chacun, par ses propriétés, permet de résoudre certains problèmes particuliers. On peut cependant, diviser les plans d'expériences en deux grandes catégories:

- Les plans pour étudier (estimer et comparer) les effets des paramètres;
- Les plans pour régler les paramètres afin d'atteindre un optimum.

L'application de la méthode des plans d'expérience exige les deux conditions suivantes [33], [34], [36], [37]:

- Condition 1: La valeur que prend chaque variable doit être connue sans erreur, ou soit très petite, voire négligeable devant la variation de cette même variable lorsqu'elle change de valeur.
- Condition 2: La réponse doit être homoscédastique. Cela signifie que l'erreur de mesure doit être la même sur tout le domaine expérimental (mêmes pratiques et matériels).

2.2.3 Vocabulaire et définitions de base

2.2.3.1 Paramètres

On définit par paramètre toute variable susceptible d'influencer la réponse d'un système lorsque celui-ci tend à changer de valeurs. Ces paramètres peuvent être [33], [35], [38]:

- Paramètres contrôlables: ce sont les paramètres qui dépendent directement du choix choisis pour l'étude.
- Paramètres non contrôlables: qui varient indépendamment du choix (conditions climatiques, environnement d'utilisation...).
- Paramètres quantitatifs: paramètres dont la valeur est mesurable, souvent à variation continue et rarement à variation discontinue.
- Paramètres qualitatifs: paramètres dont la valeur est non mesurable, comme la qualité, le type, la marque, ou d'autre caractéristique qu'on ne peut quantifier.

2.2.3.2 Niveau d'un paramètre

C'est la valeur que prend le paramètre au cours des essais, il est important d'attribuer à chaque paramètre au moins deux niveaux: un niveau supérieur et un niveau inférieur. Pour les paramètres quantitatifs la valeur est algébrique, donc ils sont classés numériquement. Pour les paramètres qualitatifs les valeurs ne sont pas mesurables, alors peu importe leur classement; l'important est de mettre une inférieure et une supérieure. Les niveaux extrêmes de chaque paramètre délimitent le domaine de l'étude [33], [35], [39].

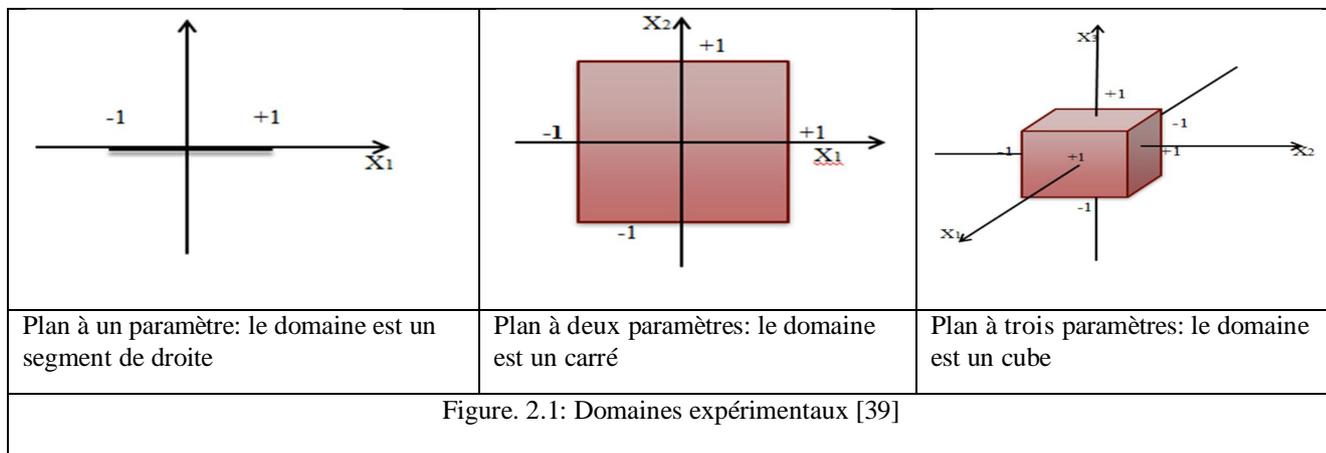
2.2.3.3 Valeurs centrées réduites ou codées

Le traitement des données issues des plans d'expériences, exige l'utilisation de variables centrées réduites sans dimension, désignées par variables codées à la place des variables réelles. L'utilisation des variables centrées réduites présente l'intérêt de pouvoir généraliser la théorie des plans d'expériences quel que soient les paramètres ou le domaine d'étude retenus. Remplacer les variables naturelles par les variables codées va permettre d'avoir pour chaque paramètre même domaine de variation (entre -1 et +1) et de pouvoir ainsi

comparer entre eux l'effet des paramètres. Le niveau bas est ainsi codé (-1) alors que le niveau haut est codé (+1), [33], [35].

2.2.3.4 Domaine expérimental

C'est le domaine délimité par les niveaux supérieur et inférieur de chaque paramètre étudiés. On l'appelle aussi domaine d'étude.[33], [35]–[37], [39], [40].



2.2.4 Réponse

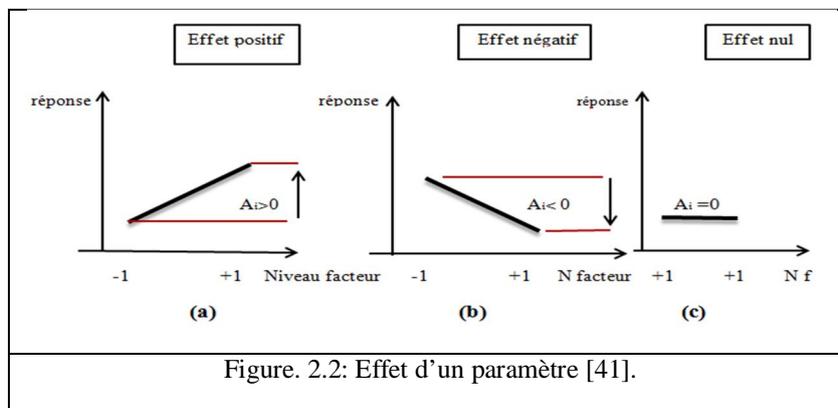
C'est la grandeur mesurée ou observée lors de chaque essai d'une expérience (Y). C'est le résultat de chaque combinaison des niveaux des paramètres. Elle peut être quantifiée (mesurée) ou observée.

2.2.5 Effet d'un paramètre

L'effet d'un paramètre X_i est la comparaison entre les valeurs prises par la réponse Y lorsque ce dernier passe du niveau (-1) au niveau (+1) [41]. Il est caractérisé par une constante notée « A_i » qui sera :

- Positive si cette variation du paramètre est favorable à l'accroissement de la réponse (Figure.2.1.a).
 - Négative si elle est favorable à la diminution de la valeur de la réponse (Figure.2.1.b).
 - Nul si elle est sans influence sur le système (Figure.2.1.c).
- Cette constante intervient dans le modèle mathématique décrivant cette réponse.

$$Y = A_0 + \sum_1^k A_i X_i \tag{2,1}$$

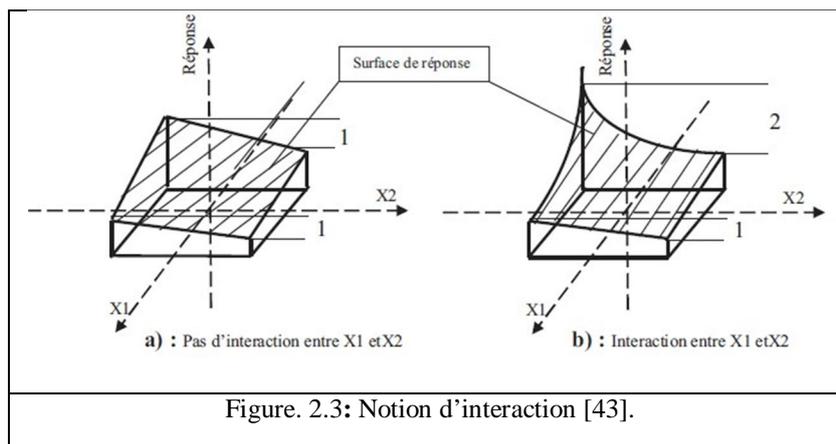


2.2.6 Interaction

On parle d'interaction entre deux paramètres X_i et X_j si l'effet de chacun sur la réponse dépend des niveaux des autres. Dans la plupart des cas, les études se limitent au premier ordre (interactions entre deux paramètres) [41]–[43].

A_{ij} : l'interaction intervient dans le modèle entre X_i et X_j de la manière suivante [43]:

$$Y = A_0 + \sum_1^k A_i X_i + \sum_{ij} A_{ij} X_i X_j \quad (2,2)$$



Le schéma (a) de la figure (2.3) montre que l'effet du paramètre X_1 quand le paramètre X_2 passe du niveau (-1) au niveau (+1) reste constant, donc il ne dépend pas de son niveau. Par conséquent il n'y a pas d'interaction.

Le schéma (b) de la figure (2.3) montre une variation de l'effet du paramètre X_1 suite à la variation du niveau du paramètre X_2 , ce qui se traduit par une dépendance. Donc il y a une interaction.

2.2.7 Matrice des effets

On appelle matrice des effets, la matrice $[X]$ servant au calcul des coefficients du modèle mathématique de la réponse. Les vecteurs colonnes sont orthogonaux deux à deux et prendre le (1) comme valeur codée. En ajoutant à gauche de la matrice d'expériences une colonne ne contenant que des 1 correspondant à la variable fictive x_0 . Les autres colonnes qui correspondent aux interactions des différents paramètres s'obtiennent en effectuant le produit ligne à ligne des colonnes des paramètres correspondants.

2.2.8 Notion de degré de liberté

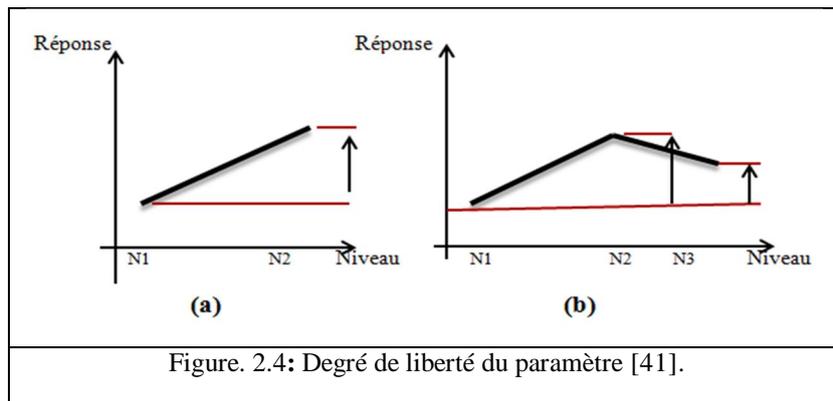
Le nombre de degré de liberté (ddl) est la mesure relative à la quantité d'informations que l'on peut obtenir d'une observation [43], [44].

Le schéma (a) de la figure (2.4) présente l'effet du paramètre X_1 quand il passe du premier niveau au deuxième niveau. Donc nous sommes en présence d'un nombre d'informations égal à 1, donc ($ddl=1$).

Le schéma (b) de la figure (2.4) présente les effets du paramètre X_2 quand il passe du premier niveau au deuxième niveau puis du deuxième niveau au troisième niveau. Le nombre d'informations est de 2, donc ($ddl=2$).

Mathématiquement le nombre de degré de liberté (ddl) pour un paramètre est égal au nombre de ces niveaux diminué de 1 ($ddl=n-1$). Pour une interaction, le (ddl) est égal au produit des (ddl) des paramètres formant cette interaction. Pour un modèle, la somme des

(ddl) des paramètres et des interactions constituant le modèle. Et pour une matrice d'expérience le (dd) est égale au nombre des essais diminué de 1(ddl=n-1).



2.3 Les plans composites centrés

Un plan composite est constitué de trois parties [41], [45]:

1. Un plan factoriel dont les paramètres prennent deux niveaux.
2. Au moins un point expérimental situé au centre du domaine d'étude.
3. Des points axiaux. Ces points expérimentaux sont situés sur les axes de chacun des paramètres.

2.3.1 Méthode 1

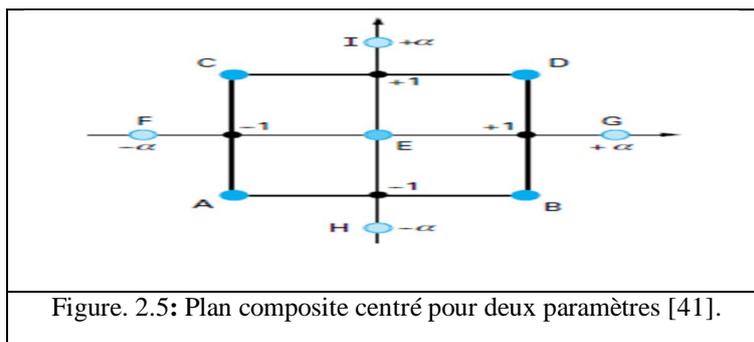
La figure (2.5) représente un plan composite pour deux paramètres. Les points A, B, C et D sont les points expérimentaux d'un plan $2^{k=2}$. Le point E est le point central. Ce point peut avoir été répliqué une ou plusieurs fois. Les points F, G, H et I sont les points axiaux. Ces quatre derniers points forment ce que l'on appelle le plan en étoile. On réalise 9 essais et 6 coefficients doivent être déterminés, il faut donc résoudre un système de 9 équations à 6 inconnues.

2.3.2 Méthode 2

Ces plans comprennent 3 catégories d'essais établis de telle sorte qu'à chaque variable X correspondent 3 niveaux :

- **Les essais du plan factoriel:** (pour 2^n et $n = 2$, il y en a 4) ;
- **Les essais en étoile:** par rapport aux essais précédents (au total $2n$, soit 4 pour 2 paramètres) ;
- **Les essais au centre du domaine:** $3^{\text{ème}}$ niveau de chaque paramètre, le nombre de répétitions augmentant avec le nombre de paramètres étudiés (pour $n = 2$, il est habituel d'en prendre 5).

On reconnaît les 3 catégories d'essais: 1 à 4 pour le plan factoriel, 5 à 8 pour les points en étoile et 9 à 13 pour les essais au centre.



2.3.3 Modèle mathématique postulé

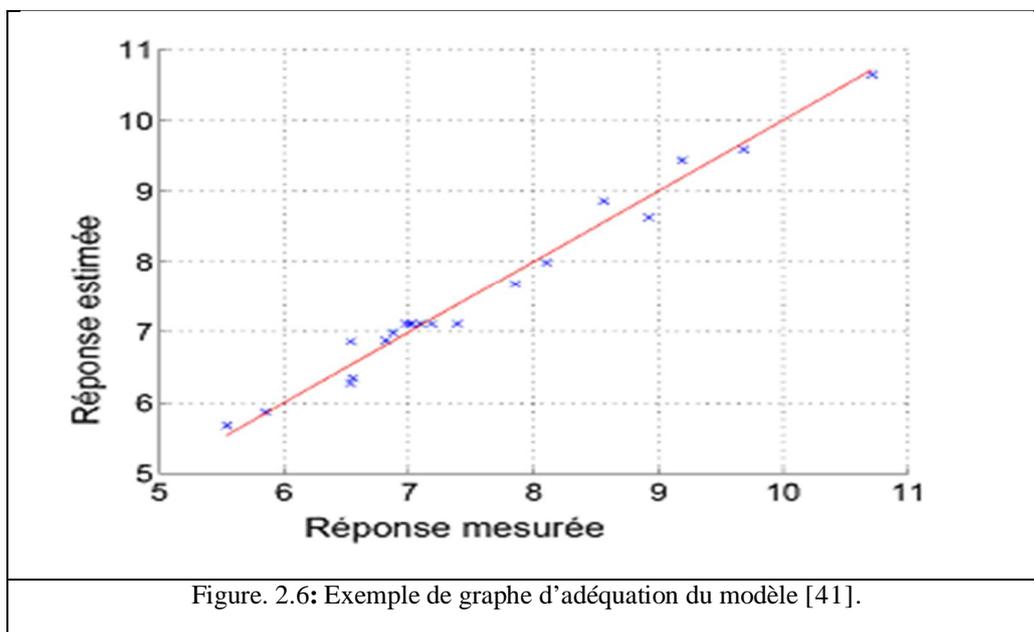
Le modèle mathématique construit à l'aide des plans composites est un polynôme du second degré avec interactions. L'équation de régression s'écrit:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i=1}^2 \left(\sum_{j=i+1}^3 b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j \right) \quad (2.3)$$

2.4 Calcul statistique et interprétation des résultats

2.4.1 Analyse des résultats

Les résultats obtenus peuvent alors être représentés graphiquement afin de comparer dans un premier temps les points mesurés et les réponses estimées. Pour cela, il est nécessaire de tracer le graphe d'adéquation du modèle. Les réponses mesurées sont placées en abscisse et les réponses estimées en ordonnée, figure (2.6). Si le nuage de points est aligné sur la droite d'équation $y = x$, la qualité descriptive du modèle sera a priori plutôt bonne. La figure (2.6) donne un exemple de graphe d'adéquation [46]–[48].



Par cette représentation graphique un premier estimateur de la qualité descriptive du modèle est alors obtenu.

Il existe d'autres représentations, comme par exemple les courbes iso-réponses donnant les zones dans lesquelles, le critère prend une même valeur. Cependant, de telles représentations sont difficilement exploitables, lorsque le nombre de paramètres étudiés est supérieur à deux. Dans tous les cas, avant d'exploiter le modèle obtenu, il faut mener l'étude statistique de celui-ci.

2.5 Intervalle de confiance des effets du modèle

On suppose que compte tenu de nombreuses expériences faites antérieurement on connaît l'écart-type expérimental (est obtenu en prenant la racine carré de la variance) l . Dans ce cas l'intervalle de confiance d'un effet est donné, par [41]:

Risque 5% : $[a_i - 1,96s_i; a_i + 1,96s_i](2,4)$

Risque 1% : $[a_i - 2,58s_i; a_i + 2,58s_i](2,5)$

Ou, s_i est la variance commune des estimateurs des coefficients. La variance porte la somme des carrés, elle est divisée par le nombre de valeurs d'essais moins 1.

2.6 Analyse de la variance

L'analyse de la variance consiste à comparer à l'aide d'un test **F** la somme des carrés des écarts due uniquement à la régression (donc au modèle) avec la somme des carrés des résidus. Précisons ces notions en introduisant un vocabulaire spécifique à l'analyse de variance. On notera par la suite Y_i les réponses observées lors de la réalisation des expériences et $Y_{i\text{pr}}$ les réponses estimées à l'aide du modèle linéaire. On notera de même Y_{moy} la moyenne des réponses.

On définit alors trois types de "variations" [48], [49]:

La variation due à la liaison linéaire:

$$SCEL = \sum (Y_{i\text{pr}} - Y_{\text{moy}})^2 \quad (2,6)$$

La variation résiduelle:

$$SCER = \sum (Y_i - Y_{i\text{pr}})^2 \quad (2,7)$$

SCER se lit : "somme des carrés des écarts des résidus".

La variation totale:

$$STCE = SCEL + SCER \quad (2,8)$$

STCE se lit : " somme totale des carrés des écarts".

On définit de plus un "carré moyen" qui est le quotient d'une somme de carrés par son degré de liberté.

SCEL aura $(p-1)$ degrés de liberté (p est le nombre de coefficients estimé à partir du modèle).

SCER aura $(n-p)$ degrés de libertés (n est le nombre d'expériences réalisées).

SCET aura $(n-1)$ degrés de liberté.

En outre, on note *CML* le carré moyen associé à *SCEL* et *CMR* le carré moyen associé à *SCER* [41], [50].

L'analyse de variance se présente alors de la façon suivante :

Tableau. 2. 1: Analyse de variance [41].

Variation due à la:	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	F
Liaison	SCEL	p-1	$CML = \frac{SCEL}{p-1}$	$F_{\text{obs}} = \frac{SCEL}{s^2}$
Résidus	SCER	n-p	$s^2 = \frac{SCER}{n-p}$	
Totale	SCET	n-1	$\frac{SCET}{n-1}$	

Le test *F* permet alors de comparer pour un risque fixé à l'avance le F_{obs} que l'on a calculé dans le tableau précédent avec un F_{critique} lu dans la table de Fisher-Snedecor [41], [51], avec $(p-1)$ et $(n-p)$ degrés de liberté.

Le test est le suivant :

Hypothèse H_0 : « les deux carrés moyens sont de même grandeur » et donc la régression n'est pas significative.

Hypothèse H_1 : « le carré moyen dû à la régression est significativement plus grand que le carré moyen dû aux résidus » donc la régression est globalement significative.

La règle du test est alors pour un risque α choisi :

- Si F_{obs} est inférieure au $F_{critique}$, on accepte l'hypothèse H_0 .
- Si F_{obs} est supérieur au $F_{critique}$, on accepte l'hypothèse H_1 avec la confiance $1 - \alpha$.

2.6.1 Coefficients de détermination (R^2 , $R^2_{ajusté}$)

Le coefficient de détermination R^2 est à la fois la fraction des variations de la réponse expliquée par le modèle seul et un indice de la qualité de la régression [41], [51].

Le tableau d'analyse de régression permet d'aboutir immédiatement au calcul du coefficient.

$$R^2 = \frac{SCM}{SCT} \Rightarrow 1 - \frac{SCE}{SCT} \quad (2,9)$$

Le coefficient R^2 peut s'interpréter comme le quotient de la variance expliquée par la variance des réponses mesurées. D'après cette formule (2.9), on voit que le rapport R^2 varie entre 0 et 1. Une valeur proche de 1 correspond à un modèle avec un très bon pouvoir prédictif.

Le coefficient de détermination R^2_{ajust} est défini de façon analogue comme étant la fraction des variations de la réponse expliquée par le modèle seul relativement aux degrés de liberté correspondants [41], [51], [52]:

$$R^2_{ajust} = 1 - \frac{SCE/N-P}{SCT/N-1} \quad (2,10)$$

2.6.2 Coefficient Q^2

Le coefficient Q^2 est très similaire au R^2 ; il est parfois appelé R^2 prédictif. Son expression est en effet :

$$Q^2 = 1 - \frac{PRESS}{SCT} \quad (2,11)$$

PRESS : signifie « somme des carrés des résiduels prédictifs ».

Avec h_i le $i^{\text{ème}}$ élément diagonal de la matrice de Hat : $X(X'X)^{-1}X'$. On notera que l'on a le coefficient Q^2 variant généralement entre 0 et 1. Il peut être négatif pour les très mauvais modèles. Des valeurs proches de l'unité désignent de la même façon des modèles bien ajustés aux données expérimentales[41], [51].

R^2 et Q^2 sont ainsi 2 mesures de la qualité d'ajustement; le premier étant une surestimation, le second une sous-estimation.

Le R^2 est descriptif: il mesure la relation entre le modèle et les réponses aux points initiaux, alors que le Q^2 est davantage prédictif: il mesure la capacité du modèle à prévoir la réponse aux points inconnus du domaine d'étude.

2.7 Validation du modèle

Deux possibilités existent [41], [52]:

- Soit le modèle est validé, ce qui signifie qu'il représente suffisamment bien le phénomène étudié dans le domaine expérimental, dans ce cas, les objectifs sont atteints: nous pouvons utiliser ce modèle pour faire de la prévision en n'importe quel point du domaine expérimental.
- Soit le modèle n'est pas validé et alors son utilisation n'est pas possible. Il faut donc s'acheminer vers la proposition d'un modèle différent.

La validation des résultats donnés par le modèle consiste à vérifier si les hypothèses retenues au départ du plan d'expériences sont bien vérifiées. La validation peut être réalisée en effectuant un essai complémentaire en dehors des essais du plan d'expériences pour valider le modèle du comportement obtenu par le plan d'expériences.

Nous avons présenté dans cette partie des éléments bibliographiques essentiels relatifs à la méthodologie des plans d'expériences.

Les plans d'expériences correspondent à une suite d'essais organisée à l'avance de manière à déterminer en un minimum d'essais et avec un maximum de précision l'influence de multiples paramètres sur une ou plusieurs réponses.

2.8 Optimisation par algorithme des chauves-souris

2.8.1 Historique

L'algorithme des chauves-souris, dont l'appellation d'origine Bat algorithme, a été proposé par X.S.YANG en 2010[53]–[55]. C'est un méta heuristique récent qui tente de modéliser le comportement d'écholocation chez les chauves-souris. Ces dernières émettent des pulsations sonores très fortes. Dès qu'un ultrason rencontre un obstacle (proie, végétation...), il rebondit vers la chauve-souris. Celle-ci capte l'écho grâce à ses oreilles. Son cerveau va alors calculer la distance, la vitesse, la position et la forme de l'objet détecté. Formellement, l'algorithme des chauves-souris considère chaque chauve-souris comme une classification possible des coefficients du modèle dans une plage bien définie. À chaque itération la chauve-souris se déplace selon trois équations correspondantes à la fréquence, la position et la vitesse. Chaque déplacement donne lieu à une classification possible des coefficients. Cette dernière est évaluée et comparée avec les classifications obtenues par la chauve-souris elle-même, puis avec toutes les autres chauves-souris de la volée.

La classification des coefficients retenue est celle qui est jugée meilleure selon une fonction objective, dans notre cas la fonction objective est l'erreur relative, et le meilleur jugement ici est la minimisation de l'erreur.

Finalement, notons que l'algorithme des chauves-souris, comme tout algorithme de classification, est influencé par des paramètres tels que la taille de la population, le nombre d'itérations, le critère d'arrêt, etc. Le choix de ses paramètres influence fortement sur la qualité de la classification.

2.9 Echolocation des chauves-souris

2.9.1 Comportement des microchiroptères

La chauve-souris est l'un des mammifères les plus méconnus. Elle a cependant fasciné les plus grands chercheurs et les scientifiques. Sa capacité de vol actif unique chez les mammifères, lui permet de voler la nuit en évitant les obstacles, même à grande vitesse grâce à son système l'écholocation très perfectionné [55]–[57]. C'est l'un des animaux dont le nombre d'espèces est très élevé: il existe environ 996 espèces. Leurs tailles varient entre la chauve-souris bourdon dite microchiroptère ou « microbat » en anglais d'un poids d'environ 1,5g à 2g jusqu'à la chauve-souris géante dite mégachiroptère ou « mégabat » en anglais avec une envergure d'environ 2 mètres et un poids jusqu'à 1 kg. Les microchiroptères ont un corps d'une longueur variant de 2,2 à 11cm. La plupart des chauves-souris utilisent l'écholocation à un certain degré; parmi toutes les espèces, les microchiroptères disposent d'une capacité d'écholocation très avancée, dont les mégachiroptères ne disposent pas. La majorité des microchiroptères sont des insectivores. Elles émettent des pulsations sonores très fortes par la bouche ou le nez (ultrason). Dès que cet ultrason rencontre un obstacle (proie, végétation...), il rebondit vers la chauve-souris. Les types et les modes d'émission des ultra-sons sont très variables suivant les genres et même les espèces. Il arrive que les chauves-souris émettent des cris audibles par l'homme[53], [56].

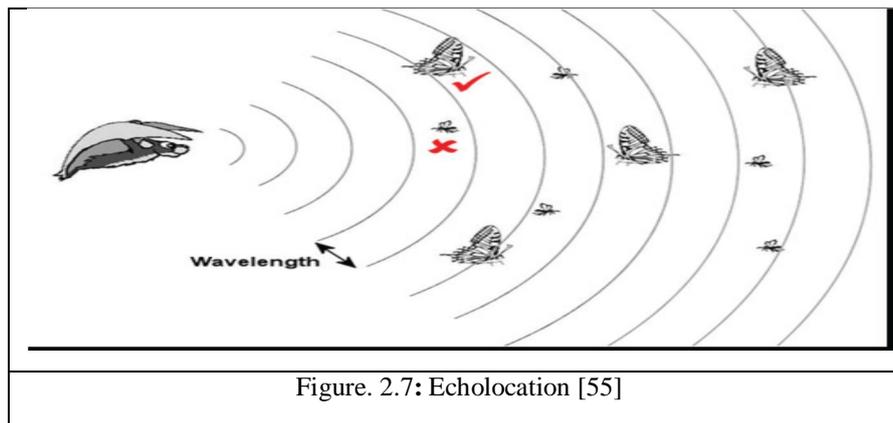


Figure. 2.7: Echolocation [55]

2.9.2 L'acoustique d'écholocation

Bien que chaque pulsation ne dure que quelques millièmes de seconde (de 8 à 10 ms). Elles ont des fréquences constantes qui sont entre 25kHz et 100 kHz pour la plus part des espèces des chauves-souris. Toutefois, certaines espèces peuvent émettre des fréquences plus élevées allant à 150 kHz (63). Chaque cri ultrasonique peut durer moyennement 5 à 20 ms. Typiquement les microchiroptères émettent de 10 à 20 cris par seconde. En cas de chasse, le taux d'émission peut être accéléré jusqu'à environ 200 pulsations par seconde quand celles-ci volent à proximité de leurs proie. Ces cris sonores trop courts marquent la capacité étonnante du traitement puissant du signal des chauves-souris[55], [58].

Comme la vitesse du son dans l'air est $v = 340$ m/s, la longueur d'onde λ des cris ultrasoniques avec une fréquence constante f est donné par :

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.12)$$

Les longueurs d'onde sont du même ordre de grandeur que les tailles de leurs proies.

L'impulsion émise pourrait être aussi forte que 110 dB appartenant à la région des ultrasons. L'intensité varie également de la plus forte lors de la recherche de proie et qui diminue en la poursuivant [55], [58]. Les microchiroptères peuvent éviter des obstacles même négligeables.

Les études ont prouvé que les microchiroptères utilisent le délai entre l'émission et la détection de l'écho, la différence de temps entre leurs deux oreilles, et les variations d'intensité des échos afin de construire un scénario tridimensionnel de l'environnement. Elles peuvent détecter la distance d'orientation de la cible, le type de la proie, et même la vitesse de mouvement de la proie telles que les petits insectes.

Bien évidemment, quelques chauves-souris ont une bonne vue, et la plupart d'entre elles ont une très grande sensibilité pour l'odorat. En réalité, elles emploient ses sens en combinaison afin de maximiser le coefficient de détection de proie et la navigation minutieuse particulièrement en obscurité totale. Cependant nous nous intéressons uniquement au comportement d'écholocation.

Le comportement d'écholocation des microchiroptères est associé à une fonction objective à optimiser.

2.10 Les démarches principales de l'algorithme de chauve-souris

Comme il a été déjà cité, l'algorithme des chauves-souris tente de modéliser le comportement d'écholocation des microchiroptères. Il repose essentiellement sur le scénario suivant: des chauves-souris volent aléatoirement en vue de trouver de la nourriture, celles-ci n'ont aucune connaissance sur l'endroit où se trouvent leurs proies. Cependant, elles peuvent calculer la distance qui sépare chacune d'elles de la cible au moyen de l'écholocation. Leur

objectif commun est non seulement d'atteindre leurs proies mais aussi de trouver la meilleure stratégie de chasse. La stratégie la plus efficace consiste à suivre la chauve-souris la plus proche de la volée. Ce comportement est similaire à résoudre un problème d'optimisation.

L'algorithme des chauves-souris est une méthode d'optimisation, où toutes les chauves-souris collaborent en population dans le but d'atteindre un but collectif. Ce dernier est formulé par une fonction dite fonction objectif. Chacune des chauves-souris volantes est considérée comme une solution dans l'espace de recherche appelée solution candidate ou locale. Celle-ci sera évaluée à chaque itération de l'algorithme en calculant sa fitness par la fonction objectif et mise à jour en ajustant sa position, sa vitesse et sa fréquence, en fonction de la meilleure position qu'elle a atteinte et celle trouvée par toute la population. Pour que finalement l'algorithme maintienne la meilleure solution atteinte parmi toute la volée dite solution globale après un nombre d'itérations prédéfini [53], [55].

Formellement, Les chauves-souris volent aléatoirement avec une vitesse v_i à une position x_i avec une fréquence fixée f_{min} , en variant la longueur d'onde λ et l'intensité A_0 de recherche de proie. Elles peuvent ajuster automatiquement la longueur d'onde (ou la fréquence) ainsi que le taux d'émission de pulsation $r \in [0,1]$, selon la proximité de leurs proies[59].

Bien que l'intensité peut varier de plusieurs manières, l'algorithme suppose que $A \in [A_0, A_{min}]$

L'algorithme des chauves-souris, est essentiellement composé des trois étapes suivantes, et qui seront répétées jusqu'à atteindre un certain nombre d'itérations:

1. Evaluer la fitness de chaque chauve-souris
2. Mettre à jour les meilleures solutions locales et globales.
3. Mettre à jour les positions, les vitesses et les fréquences de chacune des chauves-souris.

Les deux premières étapes sont assez simples. L'évaluation de la fitness de chacune des chauves-souris s'effectue à l'aide de la fonction objective. Tandis que la mise à jour des meilleures solutions locales et globales s'effectue en comparant la fitness courante de chacune des chauves-souris avec la fitness de la meilleure solution qu'elle a rencontré jusqu'ici, puis de choisir la meilleure d'entre elles. Quant à la recherche de la solution globale, il suffira de comparer toutes les meilleures solutions locales et garder la meilleure [59]–[61].

La troisième étape est la plus cruciale, en effet, le mouvement des chauves-souris est responsable de l'efficacité de l'algorithme. Les règles définissant la nouvelle solution et mettant à jour la position et la vitesse de chacune des chauves-souris dans un espace d de dimensions sont les suivantes:

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta \quad (2.13)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t - x_*)f_i \quad (2.14)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (2.15)$$

Tel que :

- f_i est la fréquence d'émission de la chauve-souris x_i et qui appartient à la gamme $[f_{min}, f_{max}]$ correspondant à la gamme de longueurs d'ondes $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$. Par exemple, la gamme de fréquence [20kHz, 500kHz] correspond à la gamme de longueurs d'ondes [0.7mm, 17mm] vers les plus petites distances. Afin de simplifier l'implémentation, il a été supposé que $f \in [0, f_{max}]$. Sachant que les hautes fréquences correspondent aux courtes longueurs d'ondes. Pour les chauves-souris, les gammes typiques sont de quelques mètres. Par conséquent le taux d'émission de pulsation peut être de la gamme [0 -1] où 0 signifie qu'il n'a aucune pulsation, et 1 signifie le taux maximale d'émission de pulsations.

- $\beta \in [0,1]$ est un vecteur aléatoire tiré à partir d'une distribution uniforme.
- x_* est la meilleure location (solution) courante globale, qui sera calculée par comparaison de toutes les solutions obtenues par chacune des n chauves-souris.
- Pour la recherche locale, une fois une solution est sélectionnée parmi les meilleures solutions courantes, une nouvelle solution pour chaque chauve-souris est générée localement en utilisant le parcours aléatoire

$$x_{new} = x_{old} + \epsilon A^t \quad (2.16)$$

d'où : $\epsilon \in [-1,1]$ est un nombre aléatoire, tandis que $A^t = \langle A_i^t \rangle$ est la moyenne d'intensité de toutes les chauves-souris à l'instant t .

En se basant sur ces règles et ces explications, les étapes basiques de l'algorithme des chauves-souris peuvent être résumées comme suit [53], [57], [58], [62]–[64].

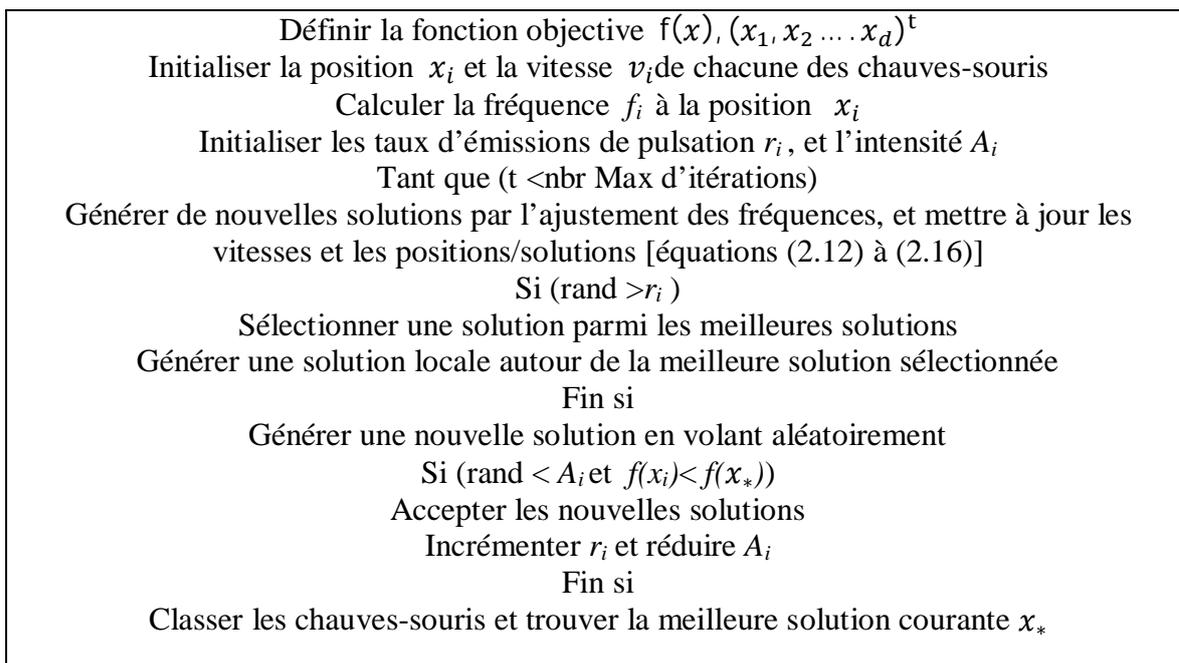


Figure. 2.7: Les principales étapes de l'algorithme BAT

2.11 Conclusion

L'utilisation de la méthodologie du plan d'expérience, nous aide à s'organiser dans le but de transformer une base de donnée assez grande, qui a été réalisée pendant une très longue période, à des modèles mathématiques ce forme $y=f(x_1, x_2, x_3 \dots)$ de bonne qualité. DOE permet de réduire le nombre d'essai au laboratoire en satisfaisant par 3 essais pour chaque paramètre d'entrée, puis on laisse le modèle prédire les valeurs des sorties, pour d'autre valeurs des paramètres choisis. Il est bien connu que la sortie prédite par la modélisation donne des erreurs par rapport à celle trouvé par les essais. Cela est un des problèmes les plus difficiles de l'analyse numérique. L'utilisation des méthodes d'intelligence artificielle telle que l'algorithme de chauve-souris (BAT) à la modélisation, fait l'objet de ce choix dans le but d'avoir une erreur minimale.

CHAPITRE 3

*MODELISATION MATHEMATIQUE
DE LA TENSION DE CLAQUAGE ET
DE LA RIGIDITE DIELECTRIQUE*

3.1 Introduction

L'insertion des barrières dans des configurations pointe-plan dans les grands intervalles d'huile comme dans l'air, améliore significativement la tension de claquage, sous l'effet de différents paramètres de la barrière (position entre électrodes, épaisseur, dimension et permittivité) et de leurs interactions pour différentes longueurs d'intervalles, sous tension alternative de fréquence industrielle 50Hz. Ainsi, l'objectif principal que nous nous sommes fixé dans notre thèse, est la recherche de modèles fidèles via l'approche des plans d'expériences de réponses choisies, afin de faire le minimum d'expériences en un minimum de temps, avec une minimisation des erreurs et une compréhension de l'influence de ces paramètres sur les réponses désirées, qui constitue une nouveauté dans le domaine de la Haute tension. Les moyens mis à notre disposition au Laboratoire de Haute Tension de L'Ecole Nationale Polytechnique nous ont permis d'effectuer des essais et sur la base de ces derniers, on a élaboré des modèles mathématiques (empiriques) de la tension de claquage et de la rigidité d'électrique pour des barrières en Presspahn et Bakélite d'épaisseurs 2 et 4mm par la méthode des plans d'expériences, dite DOE (Design of Experiment), un outil robuste introduit par le scientifique britannique A. FISHER. En variant les paramètres, les résultats trouvés par les modèles sont appelés prédits. Ils sont calculés à l'aide d'un tableur Excel. Pour vérifier la précision des résultats trouvés par nos modèles empiriques, on doit calculer les erreurs relatives des deux sorties prédite et expérimentale, qui doivent être minimales à 5%, une valeur référence de la méthode DOE. La validation est faite pour des valeurs a/d de la position relative de la barrière de 40 et 80%, et de la distance inter-électrodes ($d=6$ et $10cm$). On note que ces valeurs ont été choisies dans le but de valider nos résultats. Nous donnons des informations sur la cellule d'essai, le circuit d'essai et les caractéristiques des échantillons solides et l'huile minérale considérés. Compte tenu de l'importance de l'état de l'huile minérale dans la détermination des paramètres de claquage et de pré-claquage, il est intéressant de connaître les caractéristiques de l'huile minérale du transformateur avant et après son utilisation.

3.2 Techniques expérimentales

3.2.1 Cellule d'essais

La cellule d'essais est une cuve en plexiglas, de 50cm de longueur, 50cm de largeur et 70cm de hauteur. Ses parois transparentes sont d'épaisseurs 1,5cm, servant à la visualisation des phénomènes de claquage et de pré-claquage. La cellule peut contenir 175l d'huile de transformateur (Borak 22). Elle contient un système d'électrodes pointe-plan monté horizontalement dans la cuve. Cette dernière est posée sur une table en bois à 80,6cm du sol (Figures 3.1 et 3.2).

Le système d'électrodes est constitué d'une pointe et d'un plan. L'électrode pointe de forme conique est en laiton de rayon de courbure 6mm. L'utilisation du laiton permet d'effectuer un très grand nombre d'essais sans trop éroder la tête de la pointe. Cette tête est montée sur une tige mobile en acier. L'électrode plane est un disque en acier de 35cm de diamètre. La distance inter-électrodes est ajustable et varie de 0 jusqu'à 12cm.

3.2.2 Barrières isolantes

Les barrières de diamètre variable. Elles sont maintenues verticalement entre les électrodes à différentes positions (a/d) par rapport à la pointe (Figure 3.3). Elles sont de nature Bakélite ($\epsilon_r = 5$) et de Presspahn ($\epsilon_r = 3$). Les barrières ont pour épaisseurs respectivement 2 et 4mm. Leur état de surface est contrôlé après chaque claquage. Elles sont changées dans le cas d'une perforation. Elles sont bien nettoyées avec de l'alcool propylée puis insérées entre les électrodes.

La position relative de la barrière est définie par la distance (a/d). Les positions choisissent sont: $a/d=20\%$; $a/d=40\%$; $a/d=60\%$; $a/d=80\%$ et $a/d=100\%$.



Figure. 3.1: Vue de la cellule d'essais

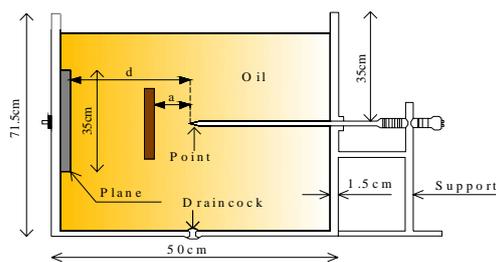


Figure. 3.2: Schéma de la cellule d'essais

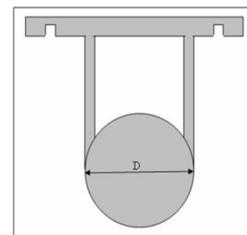


Figure. 3.3: Forme de la barrière utilisée

3.2.3 Présentation de l'huile

Le liquide utilisé dénommé Borak 22 est une huile minérale, de type naphthénique de permittivité $\epsilon_r = 2,12$. Ses propriétés physiques sont présentées dans le Tableau 3.1. Celle-ci obéit à des conditions de stockage rigoureuses dans des fûts étanches, en vue de sa protection de la dégradation et de l'humidité.

Tableau. 3. 1: Propriétés de la Borak 22 [65].

Propriétés	Valeurs Mesurées	Valeurs Normalisée (CEI)
Indice de couleur	0.8	≤ 2
Facteur de dissipation diélectrique	0.00382	<0.9
Indice d'acidité [mgKOH/g]	0.025	<0.1
Viscosité cinématique [CST]	7.7	≤ 12.5
Tension de claquage [kV]	38.4	≥ 50
Humidité [ppm]	<30	<40

3.3 Circuit d'essai du laboratoire de l'ENP

Le dispositif expérimental est constitué d'une station d'essai à fréquence industrielle (50 Hz) de marque HEAFELY. Elle comporte un transformateur d'essai 300kV-50 Hz, un transformateur de réglage, un diviseur capacitif de tension, un pupitre de commande et un dispositif de protection (Figure 3.4).

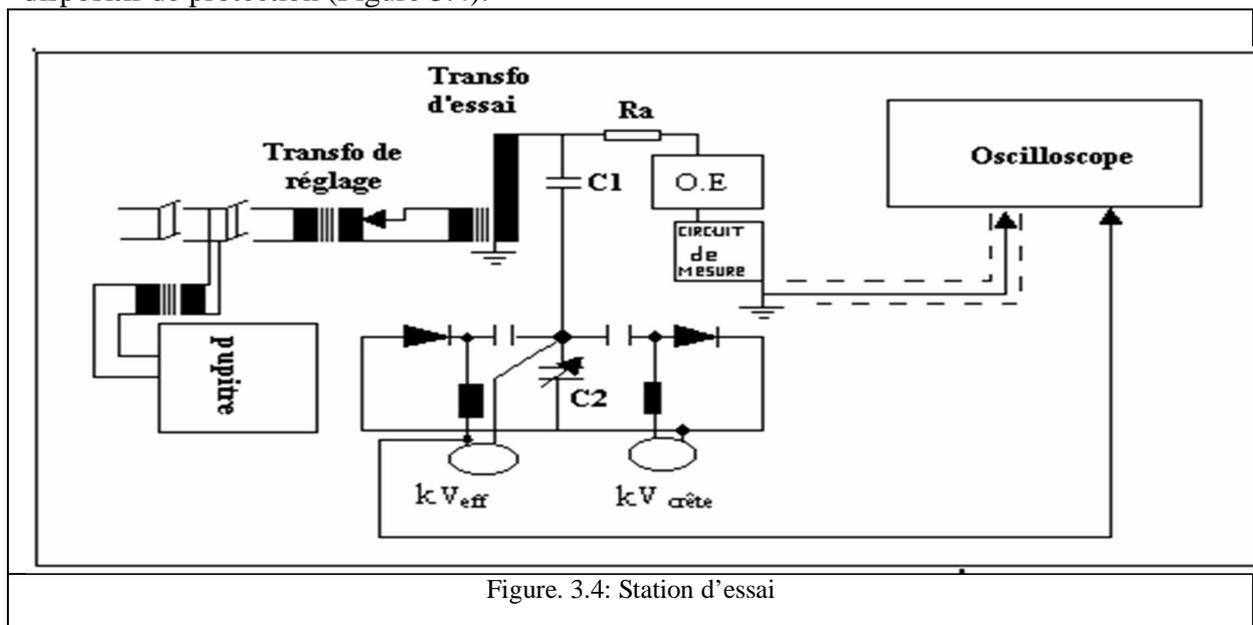


Figure. 3.4: Station d'essai

3.3.1 Station d'essai

Le circuit d'essais comprend les organes suivants :

- **Un transformateur de réglage**

Il permet le réglage continu de la tension à la sortie du transformateur d'essai de zéro à la pleine tension indépendamment de la charge. Le réglage peut se faire, soit manuellement (à l'aide d'un volant), soit à l'aide d'un moteur dont le fonctionnement est commandé à partir du pupitre. Ses caractéristiques sont :

Tension primaire nominale : $U_{In}= 220V$ (50 Hz).

Tension secondaire réglable de 0 à 500V.

Puissance apparente nominale : $S_n= 50kVA$.

- **Un transformateur d'essais**

Il délivre la tension appliquée à l'objet d'essai, il est de type monophasé, ses caractéristiques sont les suivantes :

Tension primaire $U_{In}=0,5kV$ (50Hz).

Tension secondaire nominale : $U_n=300kV$.

Puissance apparente nominale : $S_n=50kVA$.

Tension de court-circuit : $U_{cc}= 5,46 \%$.

Résistance d'amortissement: $R_a \cong 30\Omega/kV$ de la tension d'essais, la résistance de l'enroulement BT : $r_1= 0,0365\Omega$ et celle de l'enroulement HT : $r_2=4893\Omega$.

- **Un diviseur capacitif de tension**

Il est alimenté par la tension secondaire du transformateur d'essai et délivre une tension réduite aux bornes des voltmètres installés sur le pupitre de commande. Le diviseur capacitif est formé d'une capacité HT ($C_1= 400pF$) en série avec une capacité C_2 variable, permettant de réduire de 1/1000 la tension d'essai. Ce branchement permet d'obtenir les calibres de mesures: 75kV, 150kV et 300kV.

La tension recueillie aux bornes de la capacité variable est mesurée à l'aide d'un voltmètre électrostatique donnant la valeur efficace de tension et d'un galvanomètre échelonné en kV_{max} permettant la lecture de la valeur de crête de la tension.

- **Un pupitre de commande**

Celui-ci est alimenté en 220V indépendamment du régulateur de tension et du transformateur d'essai à travers un transformateur d'isolement. On y trouve les appareils de mesure permettant la lecture de la tension au secondaire du transformateur de réglage, ainsi que des tensions de crête et efficace au secondaire du transformateur d'essai.

- **Des appareils annexes de protection**

L'alimentation du laboratoire se fait à partir d'un tableau général situé dans le laboratoire à l'extérieur de la plate-forme d'essai ayant effet cage de Faraday. Le transformateur de haute tension et son régulateur sont protégés indépendamment par un fusible et un relais thermique de 250A. Ces protections sont liées au circuit de la bobine du contacteur principal. La protection est suffisante contre les surcharges du transformateur et les courants de court-circuit.

3.3.2 Circuits de mesures

3.3.2. 1 Mesure de la tension de claquage

La mesure de la tension de claquage a été effectuée pour chaque configuration à l'aide d'un voltmètre électrostatique, donnant la valeur de la tension en kilovolts efficace. Cette mesure permet non seulement de déterminer l'impact de la configuration du modèle sur la tension de claquage, mais aussi de déterminer les paliers des tensions à appliquer pour l'enregistrement du courant. La tension de claquage est déterminée sur une moyenne de six essais pour chaque distance[3], [14], [66].

3.4 Modélisation par plan d'expérience

La démarche de la modélisation de la tension de claquage et de la rigidité diélectrique pour les deux natures des barrières d'épaisseurs 2 et 4mm est composée de quatre étapes: choix des paramètres, domaine proposé, analyse graphiques des résultats et analyse statistique du modèle.

3.4.1 Choix des paramètres du domaine expérimental

Les paramètres principaux sont normalisés et limités entre les deux niveaux: bas (-1) et haut (+1). Cela revient à utiliser des variables centrées réduites au moyen d'un changement d'unité de mesure. Le choix consiste à prendre trois niveaux d'étude pour chaque paramètre et entre ces niveaux on suppose une linéarité ou au moins une monotonie de l'évolution de la réponse [34,35]. Les Tableaux (3.2) et (3.3) montrent le domaine de variation des paramètres considérés. Les entrées de la tension de claquage sont (d , a/d , D), et, (d , a/d , D , e) pour celle de la rigidité diélectrique.

Tableau. 3. 2: Domaine des variations des paramètres pour (U_c)

Valeurs Normalisées		Paramètres pour la tension de claquage (U_c)		
		$x_1=d$ (cm)	$x_2=a/d$ (%)	$x_3=D$ (cm)
Niveau	-1	4	20	10
Niveau	0	8	60	14
Niveau	1	12	100	20

Tableau. 3. 3: Domaine des variations des paramètres pour (E)

Valeurs Normalisées		Paramètres pour la rigidité diélectrique(E)			
		$x_1=d$ (cm)	$x_2=a/d$ (%)	$x_3=D$ (cm)	$x_4=e$ (mm)
Niveau	-1	4	20	10	2
Niveau	0	8	60	14	3
Niveau	1	12	100	20	4

3.4.2 Domaine Proposé

La modélisation des deux sorties (Tableaux 3.2 et 3.3), est faite par le plan composite à faces centrées (CCF), défini par :

- un plan factoriel complet de dimension 2^k , avec k désignant le nombre des paramètres étudiés ($k=3$), donc nous avons huit points A,B,C,D,E,F,G et H représentés dans la figure (3.5), et pour le cas de la rigidité diélectrique ($k=4$), ce qui donne seize points (les points aux sommets) (Figure 3.6).
- n_0 répétitions au centre du domaine expérimental dédié à l'analyse statistique présenté sur les Figures 3.5 et 3.6, la répétition est toujours égale 3.
- deux points par paramètre sont positionnés sur les axes de chacun de ceux-ci, ($x_1=d$, $x_2=a/d$ et $x_3=D$). Ces points aident à l'évaluation des termes quadratiques du modèle polynomial, ils sont mentionnés dans la Figure 3.5 par a, b, c, d, e et f. Ils donnent des informations sur la courbure de la surface de réponse de la tension de claquage[47].

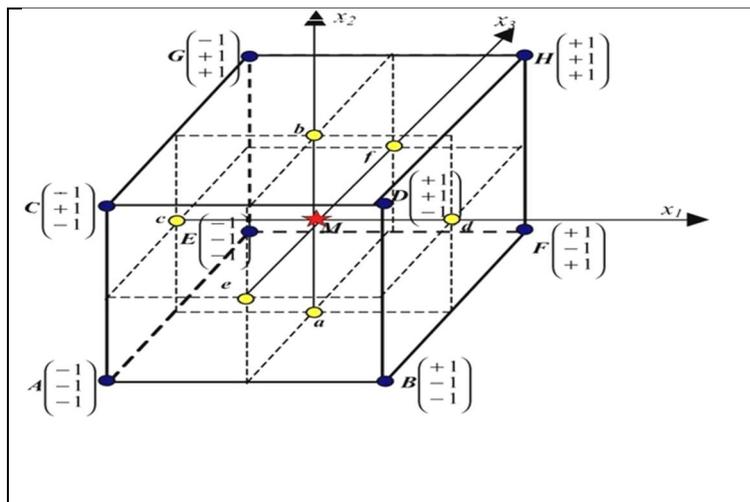


Figure. 3.5: Représentation des points expérimentaux du CCF de la tension de claquage, pour $(d, a/d, D)$ [47]

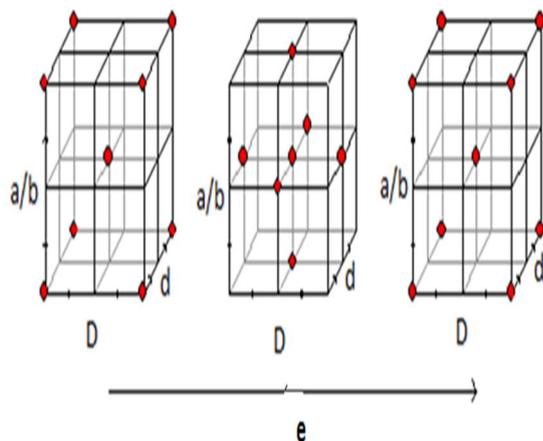


Figure. 3.6: Représentation des points expérimentaux du CCF de la rigidité diélectrique pour $(d, a/d, D, e)$ [47].

Le nombre total d'essais (n) dépend du nombre de paramètres k étudiés et du nombre de répétitions au centre du domaine n_0 , représenté par:

$$n = 2^k + 2k + n_0 \tag{3.1}$$

Dans le cas de la tension de claquage, $n=17$ pour $k=3$ et $n_0=3$. Pour la rigidité diélectrique, $n=27$ si $k=4$ et $n_0=3$.

Le modèle mathématique cherché est donné par l'équation (3.2):

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i=1}^2 \left(\sum_{j=i+1}^3 b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j \right) \tag{3.2}$$

Où :

b_0 : est une constante (la valeur de la réponse au point d'origine), b_i : les coefficients associés pour chaque paramètre, b_{ii} : les coefficients associés aux termes quadratiques.

b_{ij} : les coefficients associés à l'interaction des paramètres i et j de l'étude et x_i et x_j sont les éléments de matrice expérimentale.

Les matrices expérimentales de la tension de claquage et de la rigidité diélectrique respectivement sont de dimensions 10×17 (10 lignes, 17 colonnes) et 15×27 (15 lignes et 27 colonnes) la différence entre les deux tailles sont dépend de nombre de paramètres et de vecteur des coefficients qui influence les deux sorties.

Pour définir les coefficients du modèle analytique, nous avons codé les niveaux des paramètres (les entrées) comme illustré dans les Tableaux (3.2 et 3.3).

Le niveau bas de la distance inter-électrodes d est 4cm qui correspond à '-1', le niveau moyen est 8cm qui correspond à '0' et finalement le niveau haut est 12cm qui correspond à '+1'.

Le niveau bas de la position relative de la barrière a/d est 20% correspond à '-1', le niveau moyen est 60 % correspond à '0', le niveau haut est 100% qui correspond à '+1'.

Le niveau bas du diamètre de la barrière D est 10cm correspond à '-1', le niveau moyen est 14cm correspond à '0', le niveau haut est 20cm qui correspond à '+1'.

Le niveau bas de l'épaisseur de la barrière e est 2mm correspond à '-1', le niveau moyen est 3mm correspond à '0', le niveau haut est 4mm qui correspond à '+1'.

Les tableaux (3.4 et 3.5) regroupent les niveaux des paramètres considérés comme entrées. La tension de claquage (U_c) et la rigidité diélectrique (E) comme sorties. La distance

inter-électrodes varie entre 0 et 12cm. Les valeurs des sorties représentent la moyenne de 6 essais pour chaque distances, d’après la norme IEC 156 [66].

Les trois lignes des tableaux précédents correspond à un essai au centre du domaine expérimental, qui doit être répété trois fois, afin d’assurer certaines propriétés à la matrice d’expériences [43].

Le vecteur des coefficients du modèle analytique est déterminé par la méthode de moindres carrés, donné par l’équation (3.3) :

$$b = (x'x)^{-1} x'y \tag{3.3}$$

Où: x est la matrice expérimentale, x' la matrice transposé et y est la réponse (la tension de claquage ou la rigidité diélectrique).

Le nombre des coefficients b_i du polynôme des deux sorties sont déterminé par l’équation (3.4) :

$$b = \frac{(k+1)(k+2)}{2} \tag{3.4}$$

Le vecteur b contient donc dix et quinze coefficients pour la tension de claquage et la rigidité diélectrique respectivement.

$$b_{Tension} = [b_0 b_1 b_2 b_3 b_4 b_{11} b_{22} b_{33} b_{12} b_{13} b_{23}] \text{ et}$$

$$b_{rigidité} = [b_0 b_1 b_2 b_3 b_4 b_{11} b_{22} b_{33} b_{44} b_{12} b_{13} b_{14} b_{23} b_{24} b_{34}]$$

Tableau. 3. 4: Matrice expérimentale de la tension de claquage (U_c)

N°	d (cm)	a/d (%)	D (cm)	U_{cexp} (kV), Presspahn, $e=4mm$	U_{cexp} (kV), Presspahn, $e=2mm$	U_{cexp} (kV), Bakélite, $e=4mm$
1	-1	-1	-1	94	87	134
2	1	-1	-1	136.33	129	166
3	-1	1	-1	80.16	79	99
4	1	1	-1	110	113.66	128
5	-1	-1	1	77.5	83.66	130
6	1	-1	1	131.33	138.16	198
7	-1	1	1	63.33	69	110
8	1	1	1	95	114.33	130
9	-1	0	0	75.5	79.5	72.66
10	1	0	0	98	113.66	129.33
11	0	-1	0	115.5	109.16	117.33
12	0	1	0	98	73.5	160
13	0	0	-1	92.33	97.66	118
14	0	0	1	95.16	102.33	146
15	0	0	0	110	98	116
16	0	0	0	103	95	118
17	0	0	0	102	94	114

Tableau. 3. 5: Matrice expérimentale de la rigidité diélectrique (E)

N°	d (cm)	a/d (%)	D (cm)	e (mm)	E_{exp} (kV/cm) Presspahn.	E_{exp} (kV/cm) Bakélite
1	-1	-1	-1	-1	21.83	32
2	1	-1	-1	-1	10.75	12.5
3	-1	1	-1	-1	19.75	21.5
4	1	1	-1	-1	9.47	10.16
5	-1	-1	1	-1	20.91	32
6	1	-1	1	-1	11.51	15.5
7	-1	1	1	-1	17.25	22
8	1	1	1	-1	9.51	11
9	-1	-1	-1	1	23.5	33.5
10	1	-1	-1	1	11.36	13.83
11	-1	1	-1	1	20.04	24.75
12	1	1	-1	1	9.16	10.66
13	-1	-1	1	1	19.73	32.5
14	1	-1	1	1	10.93	16.5
15	-1	1	1	1	15.83	27.5
16	1	1	1	1	7.91	10.83
17	-1	0	0	0	18.87	18.16
18	1	0	0	0	10.33	10.77
19	0	-1	0	0	14.43	14.66
20	0	1	0	0	12.25	12.16
21	0	0	-1	0	11.54	14.75
22	0	0	1	0	11.89	18.25
23	0	0	0	-1	11.31	12.58
24	0	0	0	1	13.54	13.83
25	0	0	0	0	11.5	12.5
26	0	0	0	0	10.25	12
27	0	0	0	0	9.5	13.5

3.4.3 Modèle mathématique

Pour estimer les coefficients des modèles mathématiques, nous avons développé un programme Matlab, en utilisant le moindre carrée. Ils permettent de donner entre autres une forme analytique de la surface de réponse étudiée.

Les valeurs obtenues des différents coefficients de la tension de claquage et de la rigidité diélectrique sont présentées respectivement dans les Tableaux (3.6) et (3.7).

Tableau. 3. 6: Coefficients des modèles mathématiques (U_c)

Paramètres	Tension de claquage (U_c) (kV)		
	Coefficients du modèle pour la barrière en Presspahn. $e=4mm$	Coefficients du modèle pour la barrière en Presspahn. $e=2mm$	Coefficients du modèle pour la barrière en Bakélite. $e=4mm$
Constant	$b_0= 100.2$	$b_0= 94.4958$	$b_0= 116.6276$
d	$b_1= 18.017$	$b_1= 21.0320$	$b_1= 26.567$
a/d	$b_2= -10.817$	$b_2= -9.7820$	$b_2= -11.833$
D	$b_3= -5.05$	$b_3= 0.0830$	$b_3= 6.9$
$d \times d$	$b_{11}= -9.885$	$b_{11}= 2.9624$	$b_{11}= -16.1033$
$a/d \times a/d$	$b_{22}= 10.115$	$b_{22}= - 2.2876$	$b_{22}= 21.5667$
$D \times D$	$b_{33}= -2.890$	$b_{33}= 6.3774$	$b_{33}= 14.9017$
$d \times a/d$	$b_{12}= - 4.3313$	$b_{12}= - 2.0225$	$b_{12}= - 6.375$
$d \times D$	$b_{13}= 1.6662$	$b_{13}= 3.9375$	$b_{13}= 3.375$
$a/d \times D$	$b_{23}= - 1.2912$	$b_{23}= - 1.8525$	$b_{23}= - 1.875$

Tableau. 3. 7: Coefficients des modèles mathématiques (E)

Paramètres	Rigidité diélectrique(E) (kV/cm)	
	Coefficients du modèle pour la barrière en Presspahn, e=2mm	Coefficients du modèle pour la barrière en Bakélite, e=4mm
Constant	$b_0=11.5752$	$b_0= 12.5$
d	$b_1=- 4.8211$	$b_1=- 7.3422$
a/d	$b_2=- 1.3211$	$b_2=- 2.9128$
D	$b_3=- 0.6628$	$b_3= 0.6906$
E	$b_4=- 0.0161$	$b_4= 0.8144$
$d \times d$	$b_{11}= 2.4456$	$b_{11}=2.0474$
$a/d \times a/d$	$b_{22}= 1.1856$	$b_{22}=0.9924$
$D \times D$	$b_{33}= -0.4394$	$b_{33}=4.0824$
$e \times e$	$b_{44}= 0.2706$	$b_{44}= 0.7874$
$d \times a/d$	$b_{12}=0.2875$	$b_{12}= 1.1606$
$d \times D$	$b_{13}= 0.6575$	$b_{13}=0.2769$
$d \times e$	$b_{14}= -0.0775$	$b_{14}= - 0.5056$
$a/d \times D$	$b_{23}= -0.2225$	$b_{23}= - 0.0256$
$a/d \times e$	$b_{24}= -0.2225$	$b_{24}= 0.2969$
$D \times e$	$b_{34}= - 0.44$	$b_{34}= 0.0156$

Donc l'expression mathématique de la tension de claquage d'une barrière en Presspahn (e=4mm) est donnée par l'équation (3.5):

$$\begin{aligned}
 U_c = & 100,2 + 18,017(d) - 10,817\left(\frac{a}{d}\right) - 5,05(D) - \\
 & 9,885(d)^2 - 10,115\left(\frac{a}{d}\right)^2 - 2,890(D)^2 - 4,3313 \\
 & \left(d \times \frac{a}{d} + 1,6662(d \times D) - 1,2912\left(\frac{a}{d} \times D\right)\right).
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

L'expression mathématique de la tension de claquage d'une barrière en Presspahn (e=2mm) est donnée par l'équation (3.6) :

$$\begin{aligned}
 U_c = & 94,4958 + 21,0320(d) - 9,7820\left(\frac{a}{d}\right) + 0,0830(D) + \\
 & 2,9624(d)^2 - 2,2876\left(\frac{a}{d}\right)^2 + 6,3774(D)^2 - 2,0225 \\
 & \left(d \times \frac{a}{d} + 3,9375(d \times D) - 1,8525\left(\frac{a}{d} \times D\right)\right).
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

L'expression mathématique de la tension de claquage d'une barrière en Bakélite (e=4mm) est donnée par l'équation (3.7) :

$$\begin{aligned}
 U_c &= 116,6276 + 26,567 (d) - 11,833 \left(\frac{a}{d}\right) + 6,9(D) - 16,1033 \\
 &(d)^2 + 21,5667 \left(\frac{a}{d}\right)^2 - 6,375 (D)^2 + 3,375 \\
 &\left(d \times \frac{a}{d}\right) + 3,375 (d \times D) - 1,875 \left(\frac{a}{d} \times D\right).
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

L'expression mathématique de la rigidité diélectrique d'une barrière en Presspahn ($e=2\text{mm}$) est donnée par l'équation (3.8):

$$\begin{aligned}
 E &= 11,5752 - 4,8211(d) - 1,3211\left(\frac{a}{d}\right) - 0,6628(e) - 0,0161(d)^2 + 2,4456\left(\frac{a}{d}\right)^2 + 1,1856(D)^2 - 0,4394 \\
 &(e)^2 + 0,2706\left(d \times \frac{a}{d}\right) + 0,2875(d \times D) + 0,6575(d \times e) - 0,0775\left(\frac{a}{d} \times D\right) - 0,2225\left(\frac{a}{d} \times e\right) - 0,44(D \times e)
 \end{aligned}
 \tag{3.8}$$

L'expression mathématique de la rigidité diélectrique d'une barrière en Bakélite ($e=4\text{mm}$) est donnée par l'équation (3.9) :

$$\begin{aligned}
 E &= 12,5 - 7,3122 (d) - 2,9128 \left(\frac{a}{d}\right) - 0,6906 (e) + 0,8144 (d)^2 + 2,0474 \left(\frac{a}{d}\right)^2 + 0,9924 (D)^2 + 4,0824 \\
 &(e)^2 + 0,7874 \left(d \times \frac{a}{d}\right) + 1,1606 (d \times D) + 0,2769 (d \times e) - 0,5056 \left(\frac{a}{d} \times D\right) - 0,2969 \left(\frac{a}{d} \times e\right) + 0,0156 (D \times e)
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

Les différentes valeurs de la réponse prédite trouvées par Matlab sont regroupées dans les Tableaux (3.8) et (3.9).

Tableau. 3. 8: La matrice prédite de la tension de claquage (U_c)

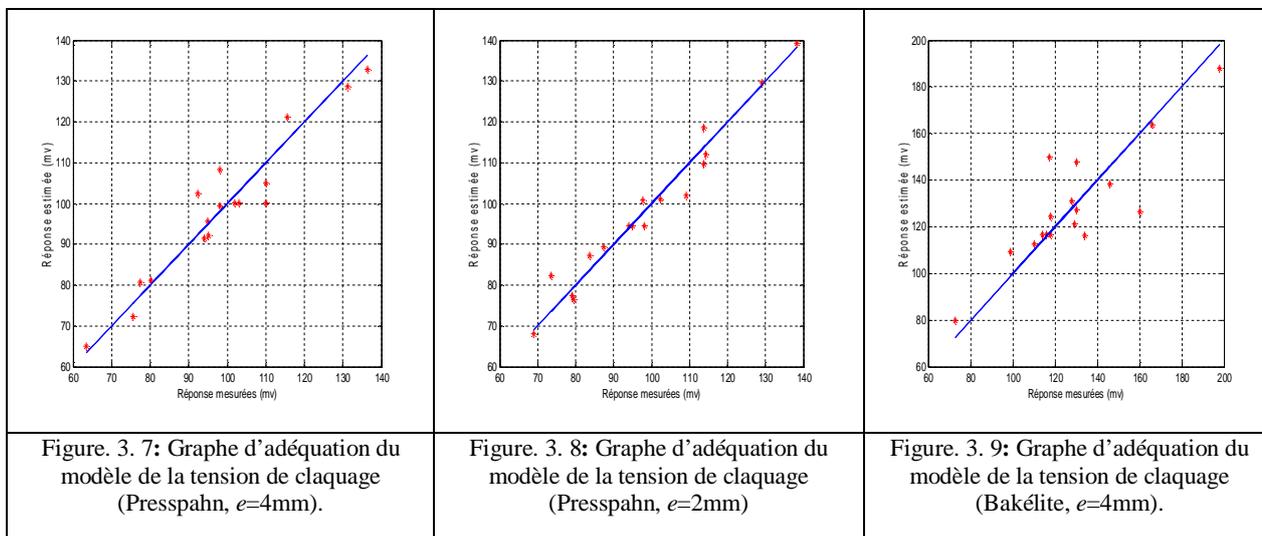
N°	d (cm)	a/d (%)	D (cm)	$U_{c\text{pred}}$ (kV).		$U_{c\text{pred}}$ (kV). Bakélite. $e=4\text{mm}$
				Presspahn, $e=4\text{mm}$	Presspahn, $e=2\text{mm}$	
1	4	20	10	91.4538	89.2775	116.4837
2	12	20	10	132.8178	129.5115	163.6177
3	4	100	10	81.0648	77.4635	109.3177
4	12	100	10	105.1038	109.6075	130.9517
5	4	20	20	80.6038	87.2735	127.2837
6	12	20	20	128.6328	139.2575	187.9177
7	4	100	20	65.0498	68.0495	112.6177
8	12	100	20	95.7538	111.9435	147.7517
9	4	60	14	72.3180	76.4262	79.9573
10	12	60	14	108.3520	118.4902	121.0913
11	8	20	14	121.1520	101.9902	150.0273
12	8	100	14	99.5180	82.4262	126.3613
13	8	60	10	102.3800	100.7902	124.6293
14	8	60	20	92.2800	100.9562	138.4293
15	8	60	14	100.2200	94.4958	116.6276
16	8	60	14	100.2200	94.4958	116.6276
17	8	60	14	100.2200	94.4958	116.6276

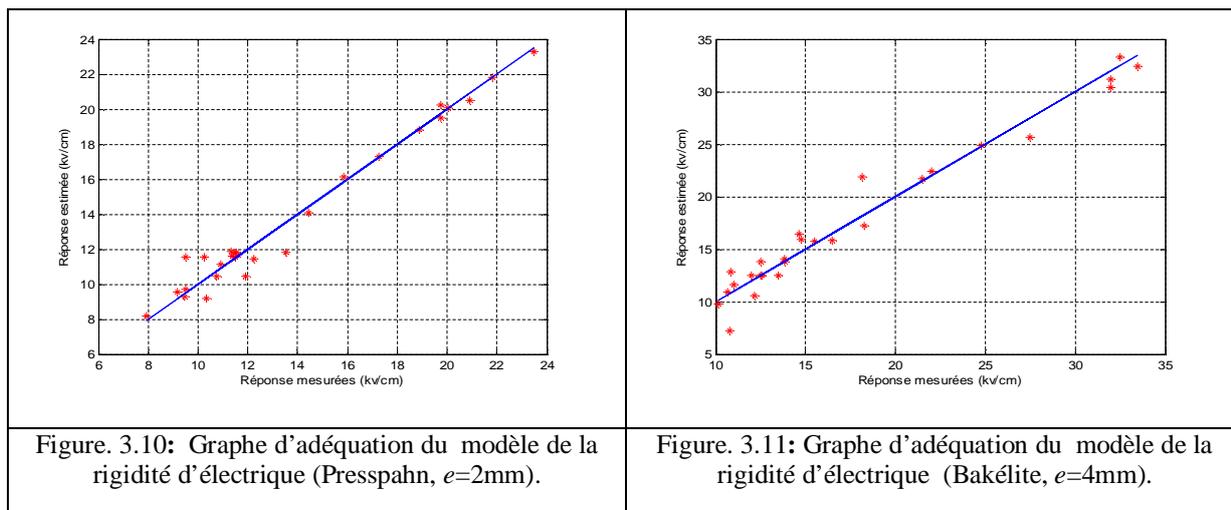
Tableau. 3. 9: La matrice prédite de la rigidité diélectrique (E)

N°	d (cm)	a/d (%)	D (cm)	e (mm)	E (kV/cm). Presspahn	E (kV/cm). Bakélite
1	4	20	10	2	21.841	30.379
2	12	20	10	2	10.4638	13.8308
3	4	100	10	2	19.5138	21.6897
4	12	100	10	2	9.2866	9.784
5	4	20	20	2	20.5255	31.2264
6	12	20	20	2	11.7782	15.7857
7	4	100	20	2	17.3082	22.4346
8	12	100	20	2	9.711	11.6364
9	4	20	10	4	23.2888	32.3941
10	12	20	10	4	11.6016	13.8234
11	4	100	10	4	20.0716	24.8923
12	12	100	10	4	9.5344	10.9641
13	4	20	20	4	20.2132	33.304
14	12	20	20	4	11.156	15.8408
15	4	100	20	4	16.106	25.6997
16	12	100	20	4	8.1988	12.879
17	4	60	14	3	18.8419	21.8902
18	12	60	14	3	9.1996	7.2058
19	8	20	14	3	14.0819	16.4058
20	8	100	14	3	11.4396	10.5802
21	8	60	10	3	11.7985	15.8925
22	8	60	20	3	10.473	17.2736
23	8	60	14	2	11.8619	12.4736
24	8	60	14	4	11.8296	14.1025
25	8	60	14	3	11.5752	12.5006
26	8	60	14	3	11.5752	12.5006
27	8	60	14	3	11.5752	12.5006

3.4.4 Analyse graphique des résultats

L’analyse graphique est représentée par le graphe d’adéquation du modèle. Elle permet de comparer les résultats prédits à ceux trouvés expérimentalement. Les résultats prédits sont placés en ordonné, ceux mesurés en abscisse. D’après les Figures (3.7-3.11), nous remarquons que le nuage de points est aligné sur la droite d’équation (y= x). Ceci permet de conclure que la qualité descriptive des modèles trouvés est acceptable.





3.4.5 Analyse statistique du modèle

L'analyse statistique a pour but d'estimer la qualité descriptive et prédictive des réponses prédites. Elle est représentée par les coefficients de détermination R^2 (d'avantage descriptif), Q^2 (d'avantage prédictif) et R_{ad}^2 (coefficient de détermination ajusté). Les deux coefficients R^2 et Q^2 consistent à expliquer la variation totale de la réponse définie à partir de la somme des carrés des écarts entre les résultats d'essais et leurs moyennes [36], [43], [47].

La somme des carrés totale (SCT) donné par l'équation (3.10) :

$$SCT(U_c) = \sum_{i=1}^{17} (y_i - \bar{y})^2 \tag{3.10}$$

avec: y_i sont les réponses mesurées; \bar{y} est la moyenne arithmétique de la réponse mesurée.

La quantité SCT (Somme des Carrés Totale) est indépendante du modèle postulé. Elle est décomposé en deux sommes de carrés SCM et SCE (Somme des Carrés associés aux Modèles et Somme des Carrés associés aux Ecarts respectivement (résidus)). Le premier terme traduit la variation de réponses calculées autour de leurs moyennes [35], [41], [67]. Elles sont données par les équations (3.11) et (3.12):

$$SCM(U_c) = \sum_{i=1}^{17} (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \tag{3.11}$$

$$SCE(U_c) = \sum_{i=1}^{17} (y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{3.12}$$

Avec \hat{y}_i les réponses calculées par le modèle.

Le test statistique F_{sv} est donné comme le rapport des deux sommes (variances) SCM et SCE :

$$F_{sv} = \frac{SCM/df_m}{SCE/df_r} \tag{3.13}$$

Avec:

df_m : est le nombre de degrés de liberté du modèle.

df_r : est le nombre de degrés de liberté du résidu.

Après calcul, les coefficients de déterminations pour la tension de claquage et la rigidité diélectrique respectivement sont regroupés dans les deux tableaux dénommé l'analyse de régression (Tableaux 3.10 et 3.11).

R^2 est le coefficient descriptif; il donne la relation entre les réponses mesurées et prédites.

R_{adj}^2 est le coefficient de détermination ajusté.

Si R^2 et Q^2 sont proches de 1 cela signifie que le modèle élaboré peu donner les mêmes résultats que les mesures expérimentaux.

Q^2 est le coefficient prédictif. Il donne une idée de l'habilité du modèle pour prédire la réponse à des points inconnus.

Les coefficients de déterminations sont donnés par les équations (3.14- 3.16):

$$R^2 = \frac{SSM}{TSS} \tag{3.14}$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SSR/n - p}{TSS/n - 1} \tag{3.15}$$

$$Q^2 = 1 - \frac{PSSR}{TSS} \tag{3.16}$$

Où : n est le nombre d'expériences et p le nombre des coefficients du modèle.

$PRESS$: est la somme prédictive des carrées des résidus. Donnée par l'équation (3.17) :

$$PSSR = \sum_1^{17} \frac{(Y_i - y_{pr})^2}{(1 - h_i)^2} \tag{3.17}$$

Avec : h_i étant les i^{eme} éléments diagonaux de la matrice.

Les résultats sont regroupés dans les Tableaux (3.10 et 3.11)

Tableau. 3. 10: Coefficients de détermination de la tension de claquage (U_c)

	Presspahn. $e=4mm$			Presspahn. $e=2mm$			Bakélite. $e=4mm$		
Coefficients	R^2	R_{adj}^2	Q^2	R^2	R_{adj}^2	Q^2	R^2	R_{adj}^2	Q^2
U_c (kV)	1.00	0.98	0.9	1.00	0.975	0.8	1.00	0.975	0.9

Tableau. 3. 11: Coefficients de déterminations de la rigidité diélectrique (E)

	Presspahn, $e=2mm$			Bakélite, $e=4mm$		
Coefficients	R^2	R_{adj}^2	Q^2	R^2	R_{adj}^2	Q^2
E (kV/cm)	0.997	0.994	0.991	0.994	0.988	0.970

Comme il est indiqué dans les Tableaux (3.10) et (3.11), les valeurs des coefficients de déterminations sont proches de 1. Cela signifie que les valeurs prédites sont relativement proches de celles obtenues expérimentalement. Les modèles proposés donc sont de bonne qualité.

Le critère de STUDENT présenté par t_{crit} , permet de tester l'effet significatif de chaque paramètre. Nous avons choisi un intervalle de risque ($\alpha=5\%$), et du Tableau de STUDENT nous prenons la valeur correspondante de t_{crit} donné par l'équation (3.18):

$$t_{crit} = (\alpha, n - p) \tag{3.18}$$

D'après le tableau de STUDENT (voir l'annexe): $t_{crit} = (5\%, 17-10) = (0.05, 7) = 2,364$ pour la tension de claquage et $t_{crit} = (5\%, 27-15) = (0.05, 12) = 2.179$ pour la rigidité diélectrique. Sachant que n : est le nombre total d'essai. p : le nombre des coefficients, $n-p$: le nombre de degrés de liberté et α l'intervalle de risque (l'erreur entre valeurs prédites et expérimentales).

L'effet sera significatif au risque de 5%, si les coefficients des modèles de test de STUDENT t_i , sont supérieurs par rapport à la valeur critique de STUDENT ($t_{i\text{Tension}} > 2.3646$) et ($t_{i\text{rigidité}} > 2.179$). (Tableaux (3.12 à 3.16).

Tableau. 3. 12: Test de signification des coefficients du modèle de la tension de claquage (Presspahn. e=4mm)

Paramètres	Effet	$t_i=2.3646$	Résultats
Constant	$b_0= 100.2$	$t_0= 52.7473$	Significatif
d	$b_1= 18.017$	$t_1= 9.4826$	Significatif
a/d	$b_2= -10.817$	$t_2= 5.6931$	Significatif
D	$b_3= -5.05$	$t_3= 2.6578$	Significatif
$d \times d$	$b_{11}= -9.885$	$t_{11}= 5.2026$	Significatif
$a/d \times a/d$	$b_{22}= 10.115$	$t_{22}= 5.3236$	Significatif
$D \times D$	$b_{33}= -2.890$	$t_{33}= 1.5210$	Non significatif
$d \times a/d$	$b_{12}= -4.3313$	$t_{12}= 0.8769$	Non significatif
$d \times D$	$b_{13}= 1.6662$	$t_{13}= 0.226498$	Non significatif
$a/d \times D$	$b_{23}= -1.2912$	$t_{23}= 0.6795$	Non significatif

Tableau. 3. 13: Test de signification des coefficients du modèle de la tension de claquage (Presspahn. e=2mm)

Paramètres	Effet	$t_i=2.3646$	Résultats
Constant	$b_0= 94.4958$	$t_0= 67.9825$	Significatif
d	$b_1= 21.023$	$t_1= 15.9825$	Significatif
a/d	$b_2= -9.7820$	$t_2= 7.1309$	Significatif
D	$b_3= 0.0830$	$t_3= 0.0597$	Non significatif
$d \times d$	$b_{11}= 2.9624$	$t_{11}= 2.1312$	Non significatif
$a/d \times a/d$	$b_{22}= -2.7876$	$t_{22}= 1.6457$	Non significatif
$D \times D$	$b_{33}= 6.3774$	$t_{33}= 4.5880$	Significatif
$d \times a/d$	$b_{12}= -2.0225$	$t_{12}= 1.4550$	Non significatif
$d \times D$	$b_{13}= 2.9375$	$t_{13}= 2.1133$	Non significatif
$a/d \times D$	$b_{23}= -1.8525$	$t_{23}= 1.3327$	Non significatif

Tableau. 3. 14: Test de signification des coefficients du modèle de la tension de claquage (Bakélite. e=4mm)

Paramètres	Effet	$t_i=2.3646$	Résultats
Constant	$b_0= 116.6276$	$t_0= 22.214$	Significatif
d	$b_1= 20.567$	$t_1= 3.9175$	Significatif
a/d	$b_2= -11.833$	$t_2= -2.2539$	Non significatif
D	$b_3= 6.9$	$t_3= 1.3142$	Non significatif
$d \times d$	$b_{11}= -16.1033$	$t_{11}= -3.0672$	Significatif
$a/d \times a/d$	$b_{22}= 21.5667$	$t_{22}= 4.1079$	Significatif
$D \times D$	$b_{33}= 14.9017$	$t_{33}= 2.8384$	Significatif
$d \times a/d$	$b_{12}= -6.375$	$t_{12}= -1.2142$	Non significatif
$d \times D$	$b_{13}= 3.375$	$t_{13}= 0.6428$	Non significatif
$a/d \times D$	$b_{23}= -1.875$	$t_{23}= -0.3571$	Non significatif

Tableau. 3. 15: Test de signification des coefficients du modèle de la rigidité d'électrique (Presspahn, e=2mm)

Paramètres	Effet	$t_i=2.179$	Résultats
Constant	$b_0= 11.5752$	$t_0= 54.858$	Significatif
d	$b_1= - 4.8211$	$t_1= 22.8488$	Significatif
a/d	$b_2= -1.3211$	$t_2= 6.26113$	Significatif
D	$b_3= - 0.6628$	$t_3= 3.14123$	Significatif
$d \times d$	$b_{11}= 2.4456$	$t_{11}= 11.59052$	Significatif
$a/d \times a/d$	$b_{22}= 1.1856$	$t_{22}= 5.6189$	Significatif
$d \times D$	$b_{33}= 0.6575$	$t_{33}= 3.1161$	Significatif

Tableau. 3. 16: Test de signification des coefficients du modèle de la rigidité d'électrique (Bakélite, e=4mm)

Parameters	Effet	$t_i=2.179$	Résultats
Constant	$b_0= 12.5006$	$t_0= 31.4085$	Significatif
d	$b_1= -7.3422$	$t_1= 18.4477$	Significatif
a/d	$b_2= - 2.9128$	$t_2= 7.3185$	Significatif
$d \times d$	$b_3= 2.0474$	$t_3= 5.14422$	Significatif
$a/d \times a/d$	$b_{11}= 0.9924$	$t_{11}= 2.4934$	Significatif
$D \times D$	$b_{22}= 4.0824$	$t_{22}= 10.2572$	Significatif
$d \times a/d$	$b_{33}= 1.1606$	$t_{33}= 2.9160$	Significatif

La signification des coefficients b_i et b_{ij} est calculée à partir de résidus e_i (c.-à-d. la différence entre les valeurs expérimentales et prédites par le modèle). L'équation (3.19) donne l'expression de la variance s . Et l'équation (3.20) donne l'expression de la variance des coefficients s_i . Le test de STUDENT de coefficients du modèle t_i est calculé par l'équation (3.21) :

$$s^2 = \frac{1}{n - p} \sum e_i^2 \tag{3.19}$$

$$s_i^2 = \frac{s^2}{n} \tag{3.20}$$

$$t_i = \frac{|b_i|}{s_i} \tag{3.21}$$

Les coefficients b_i des modèles mathématiques sont représentés dans des histogrammes (Figures 3.12 à 3.16) et sur la base du critère de STUDENT ($t_i > t_{crit}$) on peut affirmer que seuls les coefficients apportant une qualité descriptive aux modèles seront conservés.

Il convient de rejeter les variables $[(D \times D), (d \times a/d), (d \times D) \text{ et } (a/d \times D)]$ du modèle de la tension de claquage de la barrière en Presspahn d'épaisseur 4mm.

Pour le modèle de la tension de claquage de l'isolant en Presspahn d'épaisseur 2mm, les variables rejetées sont $[(D), (d \times d), (a/d \times a/d), (d \times a/d), (d \times D) \text{ et } (a/d \times D)]$.

Pour le modèle de la tension de claquage de la barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm, les variables rejetées sont $[(a/d), (D), (d \times a/d), (d \times D) \text{ et } (a/d \times D)]$.

Pour le modèle de la rigidité d'électrique de la barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm, les variables rejetées sont $[e, (e \times e), (D \times D), (d \times a/d), (d \times e), (a/d \times e) \text{ et } (a/d \times D)]$.

Pour le modèle la rigidité d'électrique de la barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm, les variables rejetées sont $[(D), (d \times d), (a/d \times a/d), (d \times a/d), (d \times D), (a/d \times D)] [D, e, (e \times e), (d \times D), (d \times e), (a/d \times D), (a/d \times e), (D \times e)]$.

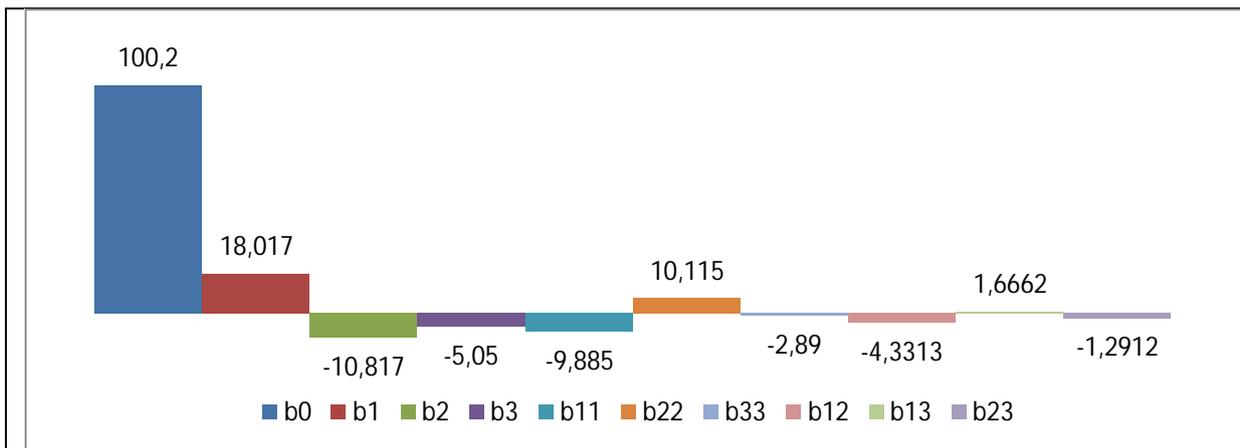


Figure. 3. 12: Histogramme des coefficients du modèle postulé de (U_c) (Presspahn $e=4\text{mm}$)

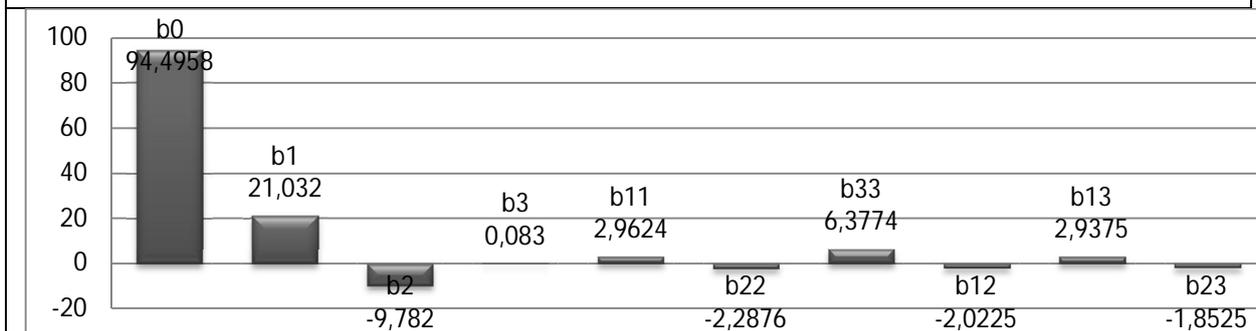


Figure. 3.13: Histogramme des coefficients du modèle postulé de (U_c) (Presspahn $e=2\text{mm}$)

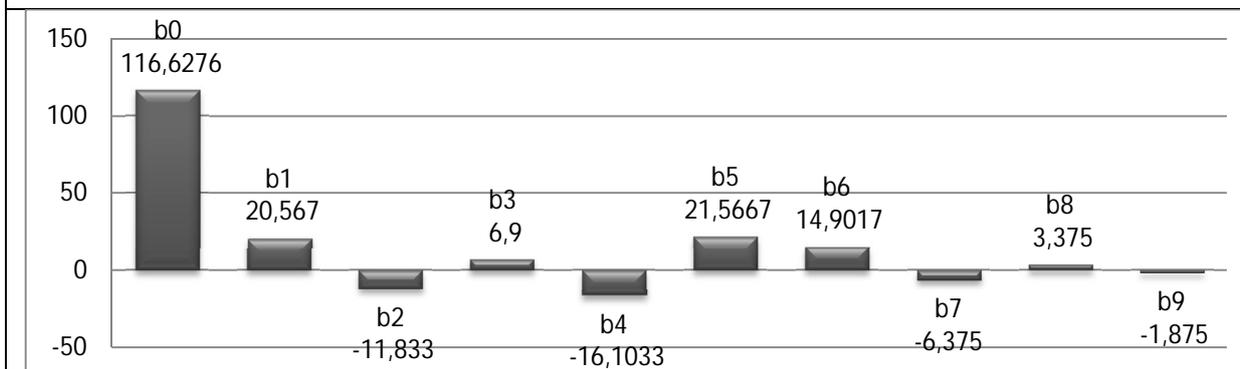


Figure. 3.14: Histogramme des coefficients du modèle postulé de (U_c) (Bakélite, $e=4\text{mm}$)

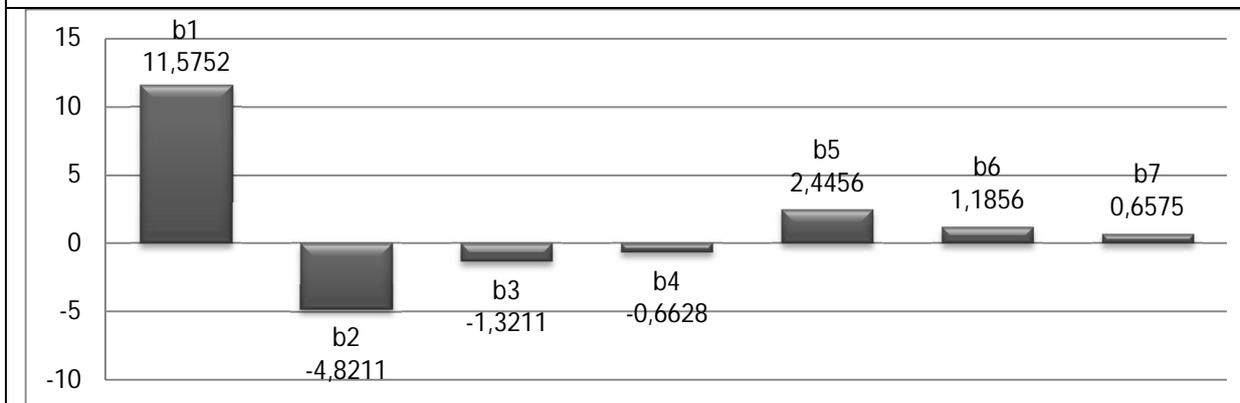
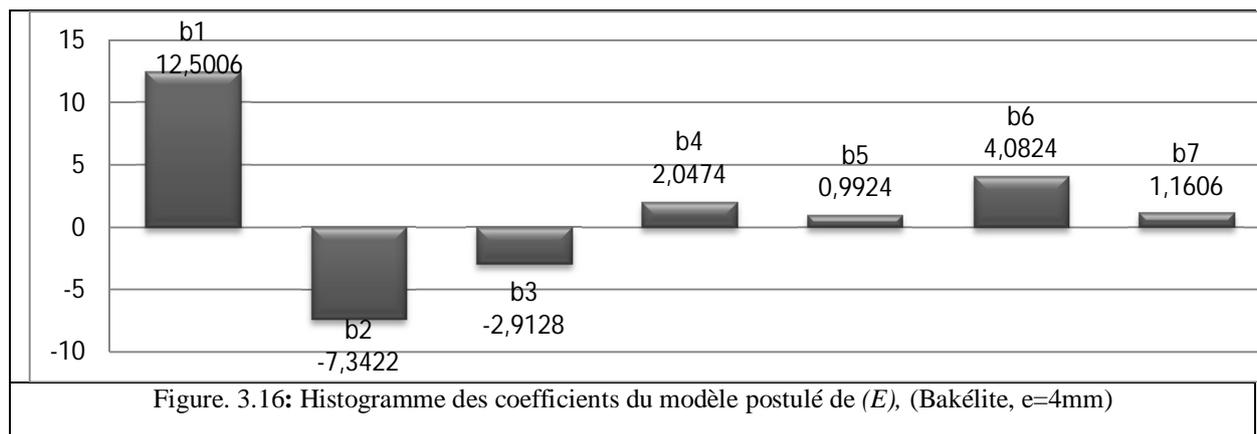


Figure. 3.15: Histogramme des coefficients du modèle postulé de (E) (Presspahn, $e=2\text{mm}$)



Les modèles simplifiés par le test de STUDENT des deux sorties (la tension de claquage et la rigidité diélectrique) en fonction des paramètres significatifs sont donnés par les équations (3.22 à 3.26):

- **Modèle mathématique simplifié de la tension de claquage d’une barrière en Presspahn d’épaisseur 4mm:**

$$U_c = 100,2 + 18.017 (d) - 10.817 \left(\frac{a}{d}\right) - 5.05 (D) - 9.885 (d)^2 + 10.115 \left(\frac{a}{d}\right)^2 \quad (3.22)$$

- **Modèle mathématique simplifié de la tension de claquage d’une barrière en Presspahn d’épaisseur 2mm:**

$$U_c = 94,4958 + 21.0320 (d) - 9.7820 \left(\frac{a}{d}\right) + 6.3774 (D^2) \quad (3.23)$$

- **Modèle mathématique simplifié de la tension de claquage d’une barrière en Bakélite d’épaisseur 4mm :**

$$U_c = 116,6276 + 20,567 (d) - 16,1033 (d)^2 + 21,5667 \left(\frac{a}{d}\right)^2 + 14,9017 (D)^2 \quad (3.24)$$

- **Modèle mathématique simplifié de la rigidité diélectrique d’une barrière en Presspahn d’épaisseur 2mm:**

$$E = 11,5752 - 4,8211 (d) - 1,3211 \left(\frac{a}{d}\right) - 0,6628 (D) + 2,4456 (d)^2 + 1,1856 \left(\frac{a}{d}\right)^2 + 0,6575 (d \times D) \quad (3.25)$$

- **Modèle mathématique simplifié de la rigidité diélectrique d’une barrière en Bakélite d’épaisseur 4mm:**

$$E = 12,5 - 7,3122 (d) - 2,9128 \left(\frac{a}{d}\right) + 2,0474 (d)^2 + 0,9924 \left(\frac{a}{d}\right)^2 + 4,0824 (D)^2 + 1,1606 \left(d \times \frac{a}{d}\right) \quad (3.26)$$

Les modèles mathématiques donnés par les équations (3.22) à (3.26) permettent, de prédire les valeurs de la tension de claquage et de la rigidité diélectrique.

Par la suite, ces valeurs seront exploitées pour étudier l’effet de l’insertion de la barrière sur la tension de claquage et sur la rigidité diélectrique. Une comparaison entre les valeurs prédites et expérimentales sera caractérisée par le terme $k \%$ donné par la relation (3.27):

$$k_{\%} = \left| \frac{S_{c\ pred} - S_{c\ exp}}{S_{c\ pred}} \right| \times 100 \quad (3.27)$$

Avec : S est la tension de claquage ou la rigidité d’électrique (les sorties).

Comme mentionné précédemment, les valeurs utilisées dans la conception du modèle sont données dans les Tableaux (3.2) et (3.3). Les valeurs ($d=6\text{cm}$, $d=10\text{cm}$ pour les distances inter électrodes et $a/d=40\%$ et $a/d=80\%$ pour les positions relatives) sont utilisées pour la validation du modèle de prédiction. Dans ce cas, les valeurs codées correspondantes sont '-0.5' pour $d=6\text{cm}$ et $a/d=40\%$ et '+0.5' pour les valeurs $d=10\text{cm}$ et $a/d=80\%$.

3.5 Influence de l'insertion de la barrière

3.5.1 Tension de claquage

3.5.1.1 Barrière en Presspahn d'épaisseur 4mm

Les Figures (3.17 à 3.22) représentent la variation de la tension de claquage, en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière isolante en Presspahn de différents diamètres ($D=10,14$ et 20cm) et d'épaisseur 4mm . La tension de claquage croît quasi-linéairement avec la distance inter-électrodes pour les trois diamètres de la barrière.

Ceci est attribué à la diminution de l'effet du champ électrique. Nos résultats concordent avec ceux obtenus par d'autres chercheurs sous tension impulsionnelle en polarité positive [10], [14], [52]. Les allures des trois graphes, montrent l'effet de l'insertion de la barrière dans l'intervalle pointe-plan. L'insertion conduit à uniformiser le champ électrique entre la barrière et l'électrode plane. Ce sous système est considéré comme un système plan-plan qui est le plus rigide. La barrière isolante modifie la distribution de la charge déposée. Les ions positifs créant la charge sont alors freinés par la barrière et se répartissent sur sa surface constituant une surface équipotentielle [10], [68].

Les Tableaux 3.17 et 3.18 représentent les résultats de modélisation. Les erreurs relatives des distance inter-électrodes $d=6$ et 10cm à la position 40% d'une barrière en Presspahn de diamètre 10cm sont respectivement : $k\% = 4.8$ et 2.4 , $k\% = 2.5$ et 7.3 pour le diamètre 14cm et $k\% = 5.5$ et 11 pour la barrière de diamètre 20cm .

Pour les mêmes distances à la position 80% , les erreurs sont respectivement: $k\% = 1.5$ et 6.1 pour la barrière de diamètre $D=10\text{cm}$. $k\%=3.6$ et 1.5 pour le diamètre 14cm et $k\% = 7.6$ et 11.3 pour le diamètre 20cm .

Nous pouvons dire que les résultats obtenus sont satisfaisants. Nous remarquons que les coefficients $k\%$ sont très proches de l'erreur considérée par la méthode du plan d'expériences qui est 5% , sauf quelques rares cas.

Tableau. 3. 17: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $a/d=40\%$).

Nature	Presspahn, $e=4\text{mm}, a/d=40\%$								
D(cm)	10			14			20		
d(cm)	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%
4	80,2	91.1	11,9	75.2	78.5	4.2	70.1	74.8	6.3
6	96,6	92.1	4,8	91.6	89.33	2,5	86.6	91.8	5,5
8	108,1	97.3	11	103.1	110.83	6.9	98	100.1	2.1
10	114,6	117.5	2,4	109.6	118.33	7,3	104.6	117.5	11
12	116,2	120.6	3,6	111.2	127.5	12.8	106.2	126.6	16.2

Tableau. 3. 18: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $a/d=80\%$).

Nature	Presspahn, $e=4\text{mm}, a/d=80\%$								
D(cm)	10			14			20		
d(cm)	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%
4	69.4	88.6	21.7	64.4	71.6	10.1	59.3	64.3	7.8
6	85.8	87.1	1,5	80.8	83.8	3,6	75.7	82	7,6
8	97.3	91.5	6.3	92.3	101	8.6	87.2	92.3	5.5
10	103.9	110.6	6,1	98.8	100.3	1,5	93.8	105.5	11,3
12	105.4	115.8	8.9	100.4	116.6	13.9	95.3	100.5	5.1

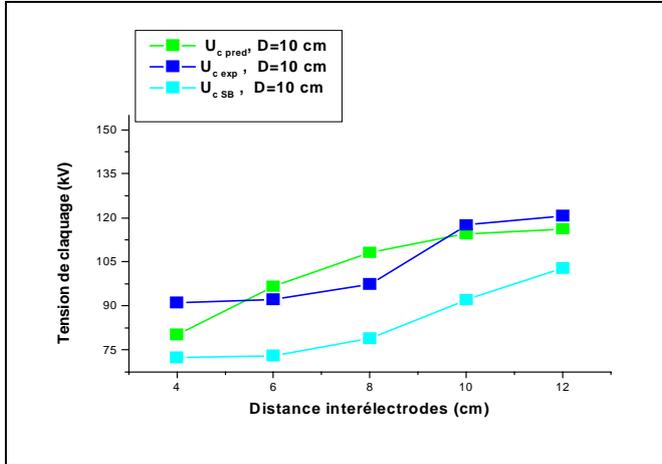


Figure. 3. 17: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=40\%$)

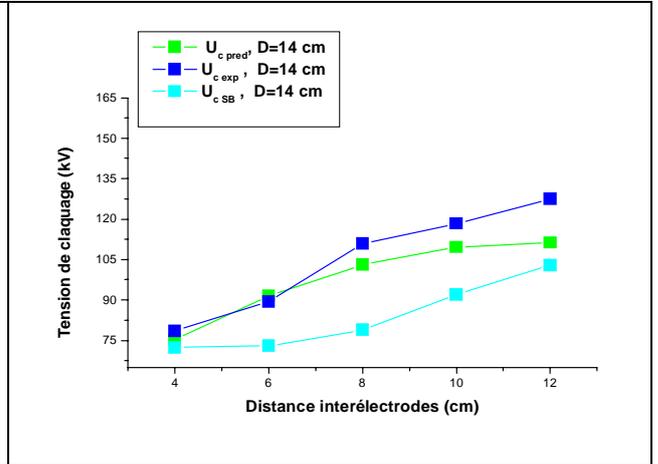


Figure. 3. 18: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d=40\%$)

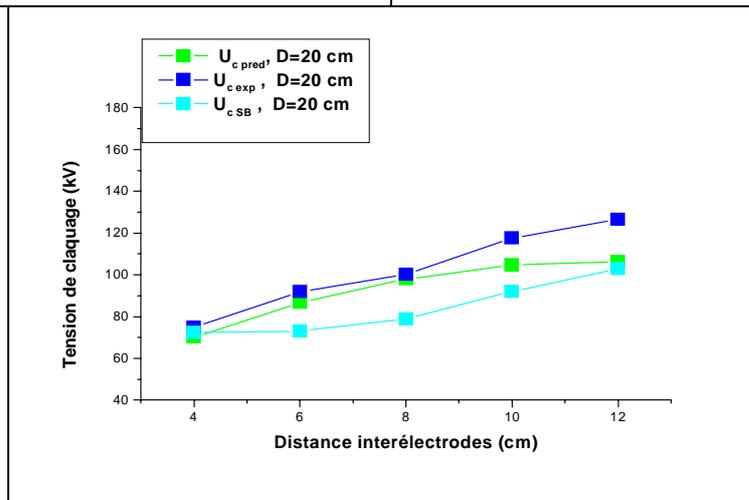


Figure. 3.19: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=40\%$)

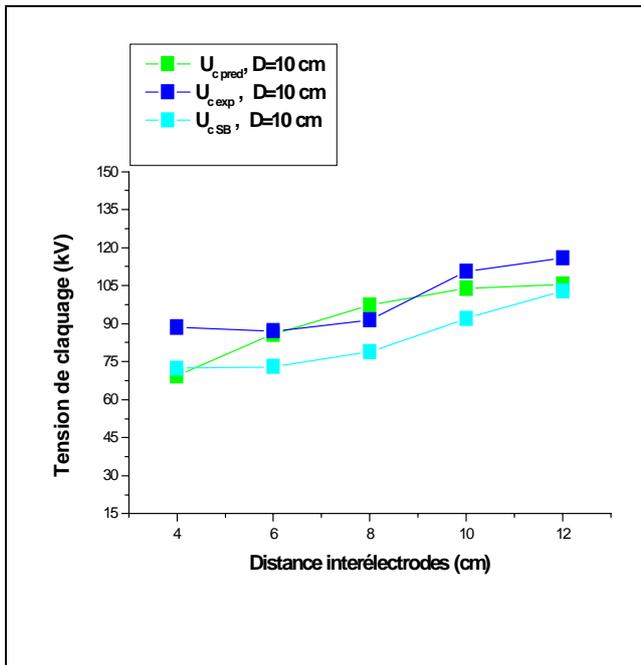


Figure. 3. 20: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=80\%$)

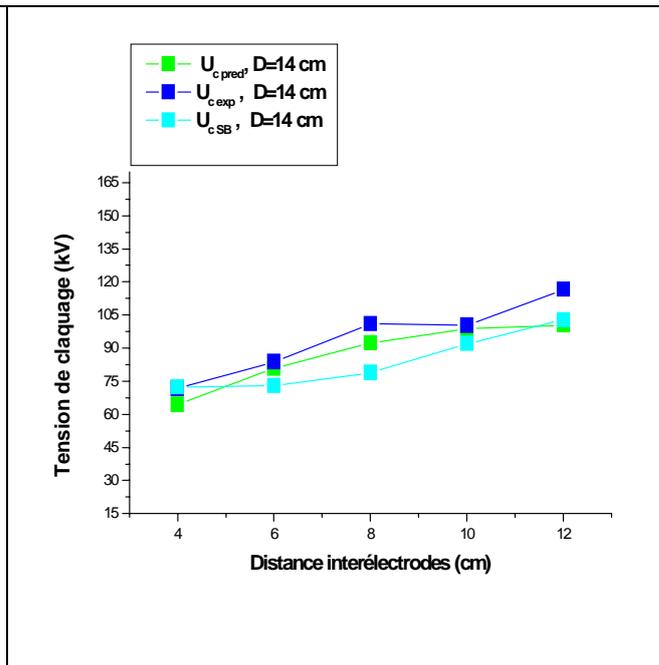


Figure. 3. 21: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d=80\%$)

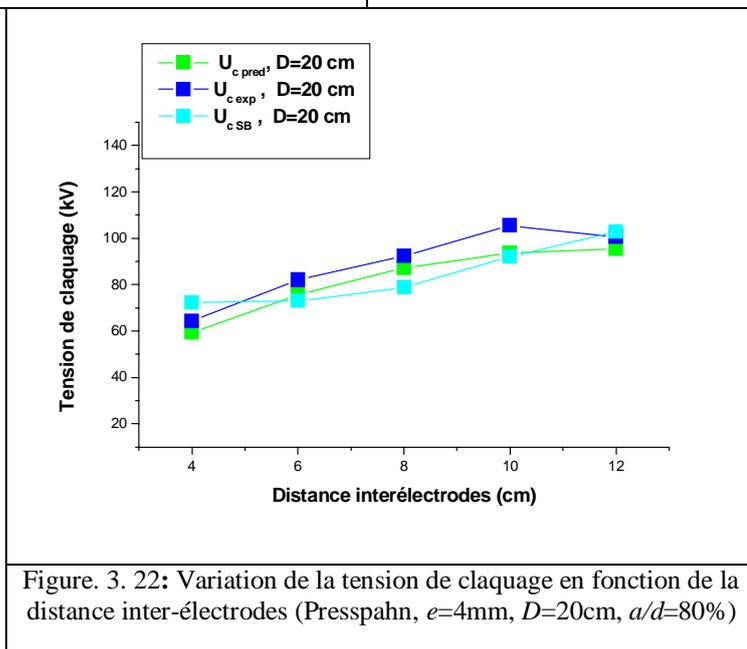


Figure. 3. 22: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=80\%$)

3.5.1.2 Barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm

On change la barrière en Presspahn d'épaisseur 4mm, par une autre d'épaisseur 2mm. Les erreurs sont données dans les Tableaux 3.19 et 3.20. L'accroissement de la tension de claquage est proportionnel à l'augmentation de l'intervalle. Les deux Tableaux, illustrent la comparaison des résultats expérimentaux avec ceux obtenus par la modélisation.

Les erreurs relatives pour le diamètre 10cm à la position 40% pour $d=6$ et 10cm respectivement sont: $k\%=5$ et **9.6**. Pour la barrière de diamètre 14cm, $k\%=6.6$ et **17.3**, et pour le diamètre 20cm, $k\%=10.5$ et **5.8**. D'après les résultats obtenus, nous constatons une bonne corrélation avec les erreurs retenues par DOE pour les diamètres 10 et 14cm à l'intervalle 6cm. En augmentant l'intervalle, l'erreur croit et dépasse les 5% pour les deux diamètres 10 et 14cm. Pour le diamètre 20cm, l'erreur atteinte une autre fois l'erreur désiré. Pour la position (80%) les erreurs relatives de la barrière de diamètre 10cm atteignent les valeurs **7** et **15.7%**. Pour le diamètre 14cm $k\%=0.2$ et **9.8**, et $k\%=14.2$ et **0.7** pour le diamètre 20cm. Nous remarquons dans la plupart des cas, que les erreurs relatives sont supérieures à l'erreur choisie par la méthode (5%). Ceci est dû à l'influence des valeurs des coefficients des modèles mathématiques, trouvés par la méthode du plan d'expérience (DOE).

Tableau. 3. 19: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $a/d=40\%$).

Nature	Presspahn, $e=2\text{mm}$, $a/d=40\%$								
D(cm)	10			14			20		
d(cm)	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%
4	84.7	86.1	1.6	78.3	80.1	2.2	84.7	80.8	4.8
6	95.2	90.6	5	88.8	95.1	6.6	95.2	106.5	10.5
8	105.7	104.6	1	99.3	99.5	0.1	105.7	102.8	2.8
10	116.2	106	9.6	109.8	133	17.3	116.2	123.5	5.8
12	126.7	124.8	1.5	120.4	122.5	1.71	126.7	134.1	5.4

Tableau. 3. 20: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $a/d=80\%$).

Nature	Presspahn, $e=2\text{mm}$, $a/d=80\%$								
D(cm)	10			14			20		
d(cm)	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%
4	74.9	80	6.3	68.5	78	12	74.9	75.8	1.1
6	85.4	79.8	7	79	79.3	0.2	85.4	99.6	14.2
8	95.9	89.6	7	89.6	85.6	4.6	95.9	99.1	3.2
10	106.4	92	15.7	100.1	111	9.8	106.4	105.6	0.7
12	117	117.6	0.5	110.6	112	1.2	117	116.8	0.1

3.5.1.3 Barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm

En remplaçant la barrière en Presspahn par une autre en Bakélite. Le modèle développé pour une épaisseur de 4mm est présenté par l'équation (3.24). Les résultats trouvés par l'application des valeurs des paramètres de validation dans cette dernière équation sont représentés dans les deux Tableaux (3.21) et (3.22). Les différentes valeurs prédites et expérimentales de cette barrière, nous ont permis de calculer les erreurs relatives aux deux positions de validations. Pour la position 40% et pour la barrière de diamètre $D=10\text{cm}$, les erreurs pour les distances inter-électrodes 6 et 10cm respectivement sont: $k\%=4.2$ et **2.2**. Ces deux valeurs sont inférieures à l'erreur considérée par la méthode des plans d'expérience. Pour $D=14\text{cm}$, $k\%=22.3$ et **6** et pour le diamètre 20cm, $k\%=8.4$ et **11.6**. Les erreurs relatives de la barrière à la position 80% sont: $k\%=10.4$ et **10.1** pour le diamètre 10cm. $k\%=31.3$ et **21** pour le diamètre 14cm, et pour $D=20\text{cm}$, $k\%=4.2$ et **3.2**.

Tableau. 3. 21: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (**Bakélite**, $e=4\text{mm}$, $a/d= 40\%$).

Nature	Bakélite, $e=4\text{mm}$, $a/d=40\%$								
D(cm)	10			14			20		
d(cm)	$U_{\text{préd}}$	U_{exp}	K%	$U_{\text{préd}}$	U_{exp}	K%	$U_{\text{préd}}$	U_{exp}	K%
4	100.2	122	17.8	85.3	73.6	15.8	100,2	124	19.1
6	122.6	128	4.2	107.7	88	22.3	122,6	134	8.4
8	136.9	132	3.7	122	113	7.9	136,9	156	12.2
10	143.1	140	2.2	128.2	121	6	143,1	162	11.6
12	141.3	155	8.7	126.4	132	4.1	141,3	190	25.5

Tableau. 3.22: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (**Bakélite**, $e=4\text{mm}$, $a/d= 80\%$).

Nature	Bakélite, $e=4\text{mm}$, $a/d=80\%$								
D(cm)	10			14			20		
d(cm)	$U_{\text{préd}}$	U_{exp}	K%	$U_{\text{préd}}$	U_{exp}	K%	$U_{\text{préd}}$	U_{exp}	K%
4	100.2	118	15	85.3	65	31.3	100.2	112	10.4
6	122.6	111	10.4	107.7	82	31.1	122.6	128	4.2
8	136.9	118	16	122	103.3	18	136.9	136	0.6
10	143.1	130	10.1	128.2	106	21	143.1	148	3.2
12	141.3	144	1.8	126.4	119.6	5.7	141.3	146	3.16

3.5.2 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique moyenne est définie par le rapport de la tension de claquage sur la distance inter-électrodes (U/d). Les Figures (3.23) à (3.28) montrent la variation de cette dernière en fonction de l'intervalle inter-électrodes, pour plusieurs diamètres ($D=10,14$ et 20cm). La rigidité diélectrique diminue quand la distance inter-électrodes augmente [10], [14], [31]. Les deux Tableaux (3.23) et (3.24) donnent les résultats obtenus par le modèle et ils sont comparés avec ceux obtenus expérimentalement.

3.5.2.1 Barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm

Une inspection visuelle des Tableaux (3.23 et 3.24) montre que les valeurs $E_{\text{préd}}$ et E_{exp} sont très cohérentes pour les barrières de diamètres 14cm et 10cm , et ceci pour la distance $d=6\text{cm}$ et $d=10\text{cm}$ à 40% . Dans ces cas $K\%= 4.4$ et 1.9 respectivement. Cependant, pour la position 80% uniquement la barrière de diamètre 10cm située à une distance également égale à 10cm donne de bon résultat. Sachant qu'on a comparé l'erreur obtenue avec celle exigée par notre méthode. Pour le reste des résultats les erreurs sont relativement importantes. La réduction de cet écart nécessite une tâche d'optimisation qui fera l'objet de la dernière partie de notre travail.

Tableau. 3. 23: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (**Presspahn**, $e=2\text{mm}$, $a/d= 40\%$).

Nature	Presspahn, $e=2\text{mm}$, $a/d=40\%$								
D(cm)	10			14			20		
d(cm)	$E_{\text{préd}}$	E_{exp}	K%	$E_{\text{préd}}$	E_{exp}	K%	$E_{\text{préd}}$	E_{exp}	K%
4	21.1	21.5	1.9	19.7	20	1.2	18.4	20.2	8.5
6	16.5	15.1	9.5	15.5	15.8	1.9	14.5	17.7	17.9
8	13.1	13	0.8	12.5	12.4	0.7	11.8	12.8	7.6
10	11	10.6	4.4	10.7	13.3	19.3	10.3	12.3	15.7
12	10.1	10.4	2.3	10.1	10.2	0.5	10.1	11.1	9.2

Tableau. 3.24: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (**Presspahn**, $e=2\text{mm}$, $a/d= 80\%$).

Nature	Presspahn, $e=2\text{mm}$, $a/d=80\%$								
D(cm)	10			14			20		
d(cm)	$E_{\text{préd}}$	E_{exp}	K%	$E_{\text{préd}}$	E_{exp}	K%	$E_{\text{préd}}$	E_{exp}	K%
4	19.7	20	1	18.4	19.5	5.2	17.1	18.9	9.4
6	15.2	13.3	14.4	14.2	13.2	7.6	13.2	16.6	20.2
8	11.8	11.2	5.9	11.2	10.7	4.7	10.5	12.3	14.8
10	9.7	9.2	5.9	9.4	11.1	15.2	9	10.5	14
12	8.8	9.8	9.8	8.8	9.3	5.3	8.8	9.7	9.3

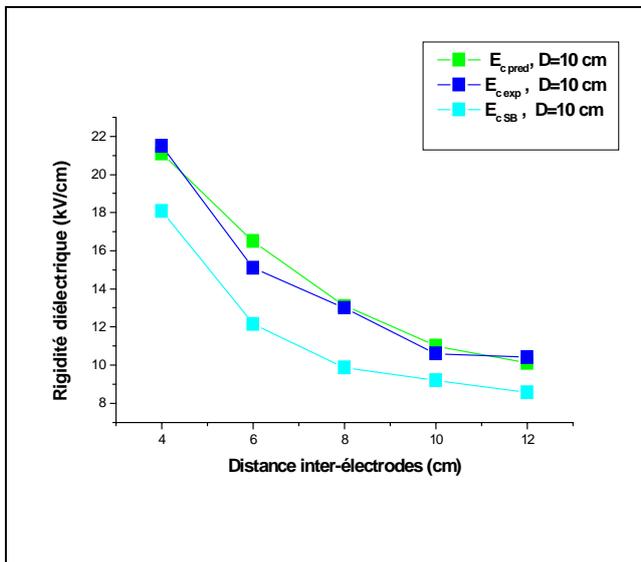


Figure. 3. 23: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=40\%$)

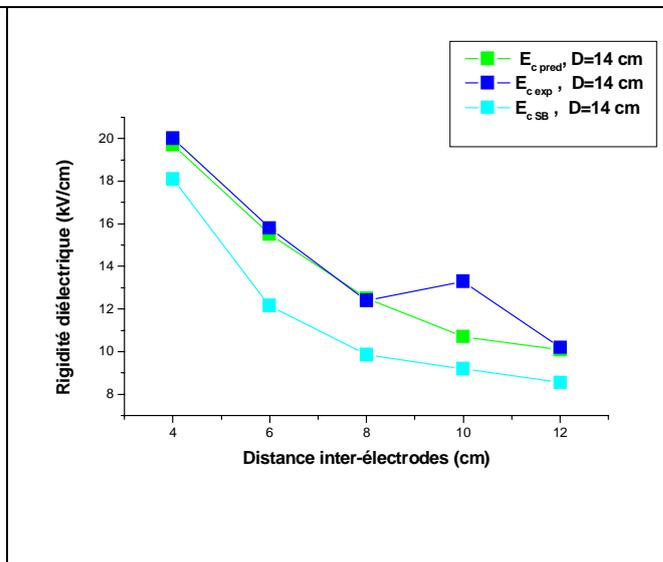


Figure. 3. 24: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d=40\%$)

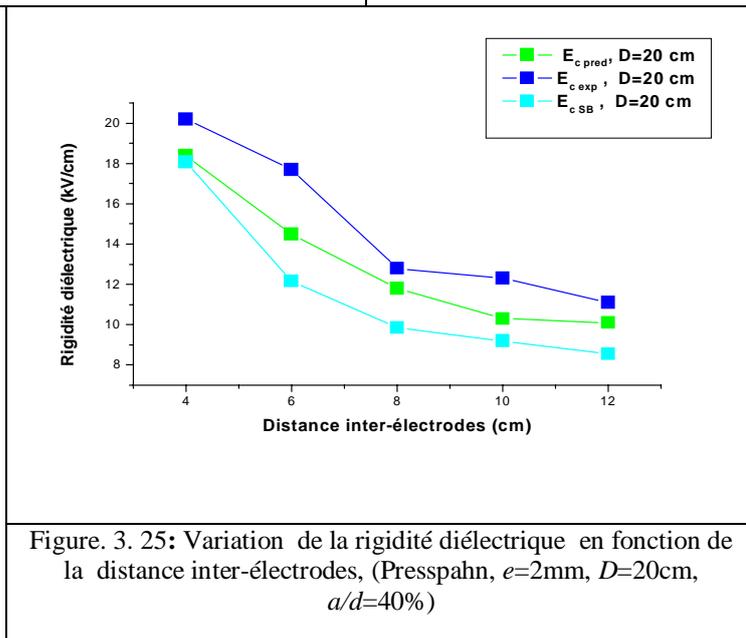


Figure. 3. 25: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=40\%$)

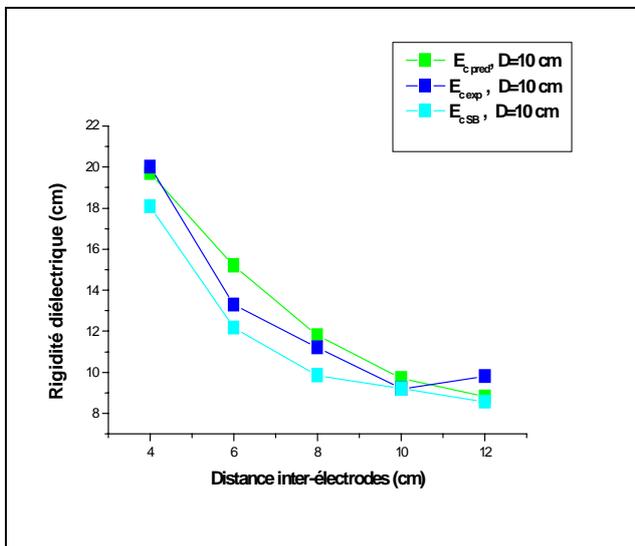


Figure. 3. 26: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=80\%$)

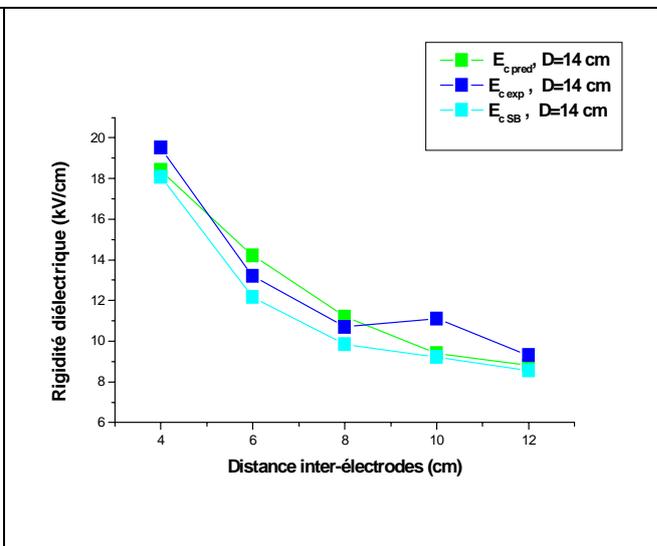


Figure. 3. 27: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d=80\%$)

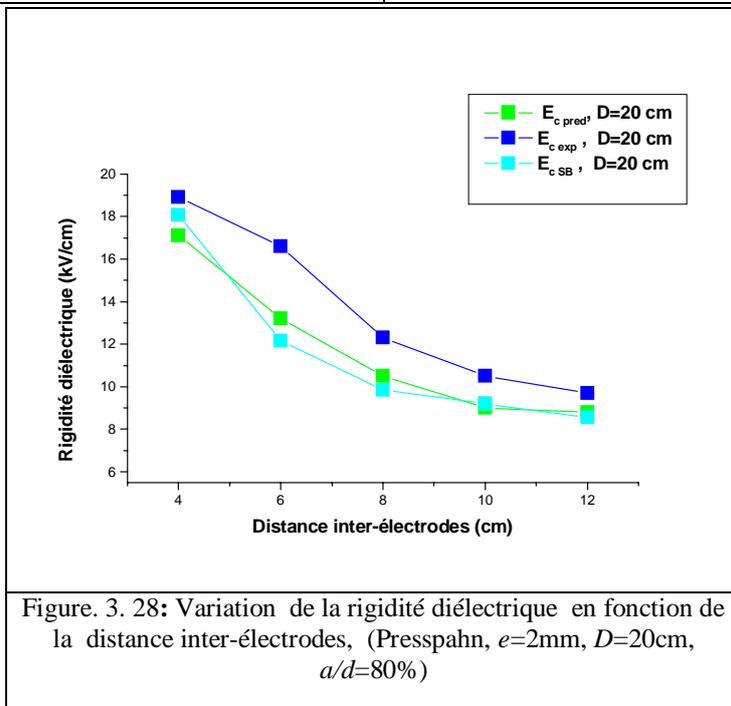


Figure. 3. 28: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=80\%$)

3.5.2.2 Barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm

Les deux Tableaux (3.25 et 3.26) représentent les différentes valeurs prédites et expérimentales de la barrière en Bakélite. Les erreurs pour les distances inter-électrodes 6 et 10cm respectivement sont: **50.6** et **39.9%**, pour un diamètre 10cm. Pour le diamètre 14cm les erreurs sont **17.7** et **19.1%**. Pour le diamètre 20cm les erreurs sont **28.2** et **20.1%**.

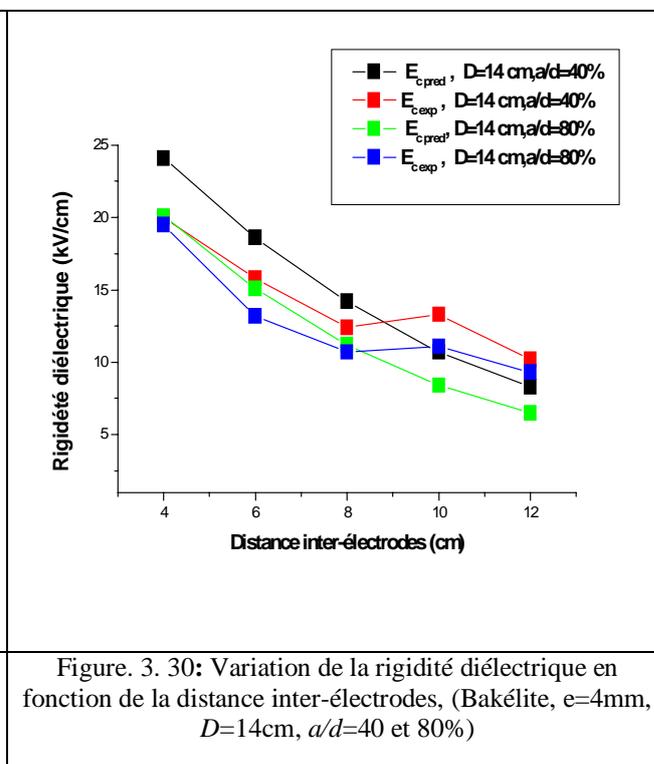
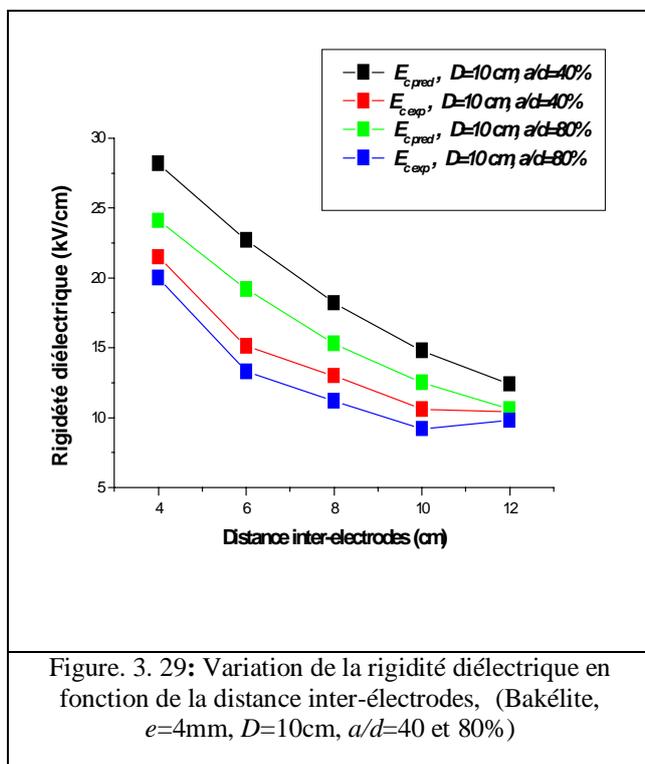
Les erreurs obtenues atteignent des valeurs importantes supérieures à l'erreur de 5% comme le montrent clairement les Figures (3.29 à 3.31). Nous remarquons aussi que les courbes issues de la modélisation reproduisent d'une manière satisfaisante la courbe expérimentale malgré le grand écart observé. Les mêmes remarques peuvent être faites aussi pour la position relative de la barrière 80%.

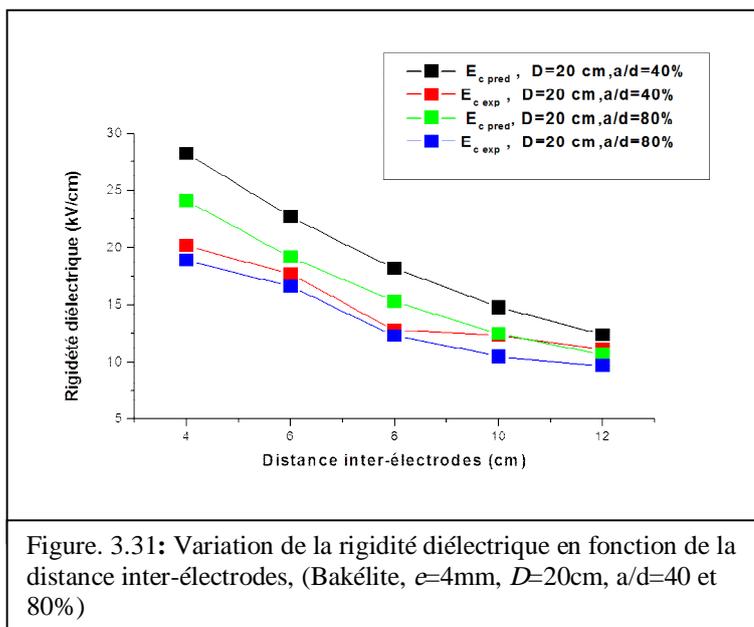
Tableau. 3. 25: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Bakélite, e=4mm, a/d=40%).

Nature	Bakélite, e=4mm, a/d=40%								
D(cm)	10			14			20		
d(cm)	$E_{préd}$	E_{exp}	K%	$E_{préd}$	E_{exp}	K%	$E_{préd}$	E_{exp}	K%
4	28,2	21,5	31,1	24,1	20	20,6	28,2	20,2	39,8
6	22,7	15,1	50,6	18,6	15,8	17,7	22,7	17,7	28,2
8	18,2	13	39,7	14,2	12,4	14,2	18,2	12,8	42,2
10	14,8	10,6	39,9	10,7	13,3	19,1	14,8	12,3	20,1
12	12,4	10,4	19,3	8,3	10,2	18,3	12,4	11,1	11

Tableau. 3.26: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Bakélite, e=4mm, a/d=80%).

Nature	Bakélite, e=4mm, a/d=80%								
D(cm)	10			14			20		
d(cm)	$E_{préd}$	E_{exp}	K%	$E_{préd}$	E_{exp}	K%	$E_{préd}$	E_{exp}	K%
4	24,1	20	20,9	20,1	19,5	3	24,1	18,9	27,5
6	19,2	13,3	44,8	15,1	13,2	14,8	19,2	16,6	15,9
8	15,3	11,2	37,1	11,2	10,7	5,4	15,3	12,3	24
10	12,5	9,2	35,9	8,4	11,1	24,1	12,5	10,5	18,3
12	10,6	9,8	8,7	6,5	9,3	29,5	10,6	9,7	9,4





3.6 Influence de la position de la barrière

3.6.1 Tension de claquage

Les Figures (3.32) et (3.33) représentent la variation de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière pour différentes distances. L’allongement du canal de la décharge disruptive et la présence de la charge d’espace superficielle sur la barrière en face de la pointe, engendrent l’augmentation de la tension de claquage avec un optimum pour a/d de l’ordre de 20% [52], [69], [70]. En augmentant la position relative (supérieure à 20%), la tension de claquage décroît vers des valeurs proches de celle sans barrière. La décroissance de la tension est la conséquence de la longueur minimale de fuite [71]. Les allures de la tension de claquage prédite dans les figures sont identiques à celles trouvées expérimentalement. L’analyse statistique et l’évaluation de la qualité de prédiction pour différentes natures de barrières utilisées sont regroupées dans les Tableaux (3.27 et 3.28) pour différents paramètres géométriques et pour les deux natures de la barrière (Presspahn et Bakélite).

3.6.1.1 Barrière en Presspahn d’épaisseur 4mm

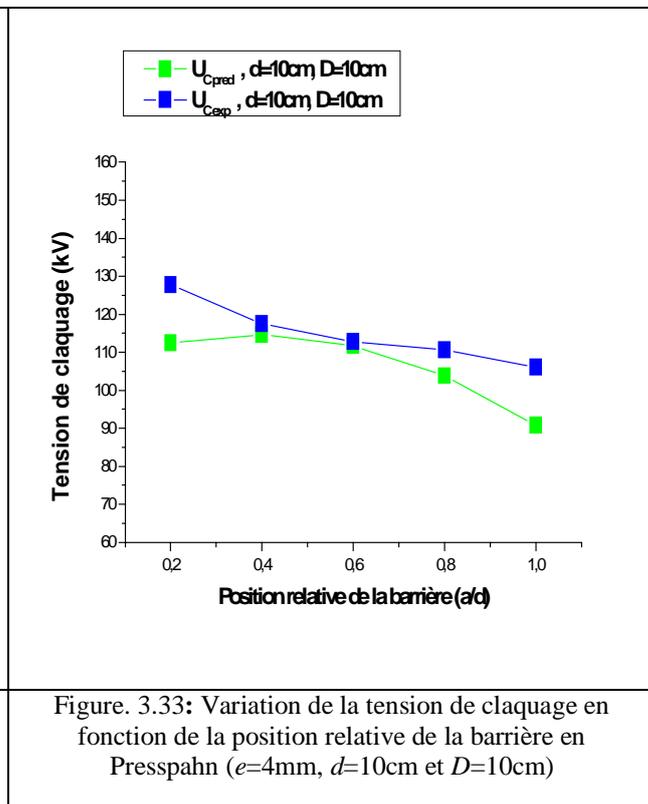
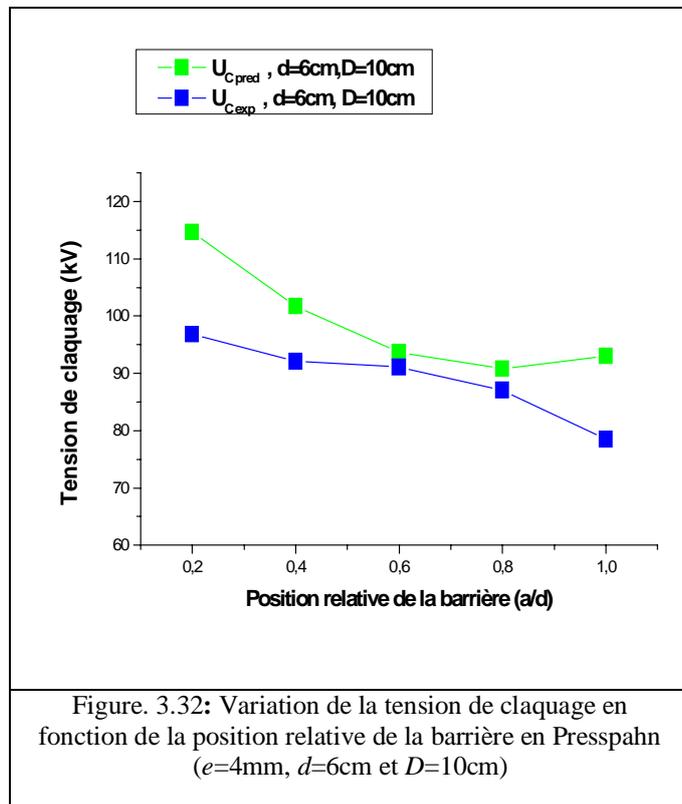
Les erreurs relatives pour ($d=6\text{cm}$, $a/d=40\%$) décroissent en fonction du diamètre de **4.8%** vers une valeur très petite égale **2.5%**, puis augmente pour atteindre l’erreur référence de la méthode. Nous remarquons une bonne corrélation pour $a/d=80\%$ entre les tensions prédites (U_{cpred}) et expérimentales (U_{cexp}). Les petites valeurs des erreurs relatives traduisent cette corrélation. Pour $D=20\text{cm}$ l’erreur reste toujours supérieure à notre référence qui est 5%. On augmentant l’intervalle à $d=10\text{cm}$, les erreurs augmentent en fonction du diamètre pour la position 40%. Pour la position 80% l’erreur décroît de **6.1** à une valeur minimale **1.5%**. Notons dans ce cas, les erreurs sont dans la limite de 5%, sauf le cas du diamètre 20cm (Tableaux 3.27 et 3.28).

Tableau. 3. 27: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $d=6\text{cm}$).

Nature	Presspahn, $e=4\text{mm}$, $d=6\text{cm}$								
$D(\text{cm})$	10			14			20		
$a/d(\%)$	U_{cpred}	U_{cexp}	K%	U_{cpred}	U_{cexp}	K%	U_{cpred}	U_{cexp}	K%
20	114.7	96.8	2,4	89,4	94.3	5,2	84,3	98	13,9
40	101.7	92.1	4,8	91,6	89.3	2,5	86,5	91.8	5,7
60	93.7	91.1	2,8	88,7	85.3	3,9	83,6	88.3	5,2
80	90.8	87.1	1,5	80,7	83.8	3,6	75,7	82	7,6
100	93	78.5	7,2	67,7	79.6	14,9	62,7	78.5	20

Tableau. 3. 28: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $d=10\text{cm}$).

Nature	Presspahn, $e=4\text{mm}$, $d=10\text{cm}$								
D(cm)	10			14			20		
a/d(%)	$U_{\text{cpréd}}$	U_{cexp}	K%	$U_{\text{cpréd}}$	U_{cexp}	K%	$U_{\text{cpréd}}$	U_{cexp}	K%
20	112,4	127.8	12	107,4	126.1	14,8	102,3	126.3	18,9
40	114,6	117.5	2,4	109,6	118.8	7,3	104,5	117.5	11
60	111,7	112.8	0,9	106,7	103.8	2,8	101,6	107	4,9
80	103,8	110.6	6,1	98,8	100.3	1,5	93,7	105.5	11,1
100	90,8	106.1	14,4	85,8	92.3	7	80,7	102.5	21,2



3.6.1.2 Barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm

Après le remplacement des valeurs codées de ce cas dans l'équation (3.23), nous obtenons les résultats regroupés dans les Tableaux (3.29 et 3.30). Nous remarquons pour la position 40% que l'erreur relative pour $d=6\text{cm}$ est **5%**. Elle augmente avec l'accroissement du diamètre pour atteindre la grande valeur **10.5%**. En augmentant le diamètre de la barrière et à la position relative 80% l'erreur décroît de **7** à **0.2%**, puis croit brusquement à une valeur très élevées égale **14.2%** dépassant les 5% de DOE. Pour $d=10\text{cm}$ la variation de l'erreur est acceptable dans les cas ($a/d=40\%$, $D=20\text{cm}$) et ($a/d=80\%$, $D=20\text{cm}$).

Tableau. 3. 29: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $d=6\text{m}$).

Nature	Presspahn, $e=2\text{mm}$, $d=6\text{cm}$ (U_c)								
D(cm)	10			14			20		
a/d(%)	$U_{\text{cpréd}}$	U_{cexp}	K%	$U_{\text{cpréd}}$	U_{cexp}	K%	$U_{\text{cpréd}}$	U_{cexp}	K%
20	100.1	92.5	8.2	74.1	99.33	5.6	80.5	113.1	11.5
40	95.2	90.6	5	79	95.16	6.6	85.4	106.5	10.5
60	90.3	89.8	0.5	83.9	93	9.6	90.3	103.6	12.8
80	85.4	79.8	7	88.8	79.33	0.2	95.2	99.66	14.2
100	80.5	77.5	3.9	93.7	75.16	1.2	100.2	86.5	6.8

Tableau. 3. 30: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (*Presspahn, e=2mm, d=10cm*).

Nature	Presspahn, e=2mm, d=10cm (U_c)								
	10			14			20		
D(cm)									
a/d(%)	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%
20	121.1	107.6	12.5	114.7	137.3	16.4	121.1	133	8.8
40	116.2	106	9.6	109.8	133	17.3	116.2	123.5	5.8
60	111.3	101.5	9.7	105	116.3	9.7	111.3	116.5	4.4
80	106.4	92	15.7	100.1	111	9.8	106.4	105.6	0.7
100	101.6	83.8	21.2	95.2	107.1	11.1	101.6	94.3	7.7

3.6.1.3 Barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm

Nous remarquons d'après les Tableaux (3.31 et 3.32) que les résultats obtenus présentent une bonne corrélation entre les tensions de claquages prédites et expérimentales pour: ($d=6cm$. $a/d=40\%$ et $D=10cm$), ($d=6cm$. $a/d=80\%$ et $D=20cm$), ($d=10cm$. $a/d=40\%$ et $D=10cm$), ($d=10cm$. $a/d=80\%$ et $D=20cm$). Dans ces cas l'erreur est strictement inférieure à notre erreur de choix optimal. Pour le reste des résultats les erreurs sont importantes dépassant ainsi les 5%.

Tableau. 3. 31: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (*Bakélite, e= 4mm, d= 6cm*).

Nature	Bakélite, e=4mm, d=6cm (U_c)								
	10			14			20		
D(cm)									
a/d(%)	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%
20	138.7	132	5.1	123.8	90.3	37.1	138.7	142	2.2
40	122.6	128	4.2	107.7	88	22.3	122.6	134	8.4
60	117.2	128	8.4	102.3	87.3	17.1	117.2	130	9.8
80	122.6	111	10.4	107.7	82	31.3	122.6	128	4.2
100	138.7	107	29.7	123.8	69	79.5	138.7	125	11

Tableau. 3. 32: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (*Bakélite, e= 4mm, d=10cm*).

Nature	Bakélite, e=4mm, d=10cm, (U_c)								
	10			14			20		
D(cm)									
a/d(%)	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%
20	159.3	152	4.8	144.4	131.3	9.9	159.3	170	6.2
40	143.1	140	2.2	128.2	121	6	143.1	162	11.6
60	137.7	140	1.5	122.8	117.3	4.7	137.7	154	10.5
80	143.1	130	10.1	128.2	106	21	143.1	148	3.2
100	159.3	122	30.6	144.4	82	76.1	159.3	130	22.5

3.6.2 Rigidité diélectrique

Les Figures (3.34 à 3.36) représentent la variation de la rigidité diélectrique en fonction de la position relative de la barrière, pour les différents cas étudiés auparavant. Il a été trouvé dans des travaux antérieurs. Que l'insertion de la barrière isolante augmente considérablement la rigidité diélectrique à une position optimale 20% [3], [10], [52], [70]. En augmentant la position relative de la barrière, la rigidité diélectrique décroît vers des valeurs proches de celles trouvées dans le cas sans barrière. Nous remarquons qu'il existe des petites déviations entre $E_{préd}$ et E_{exp} . Les Tableaux (3.33) et (3.34) regroupent l'ensemble des résultats de l'analyse statistique effectuée pour les différents cas étudiés.

3.6.2.1 Barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm

Pour cette barrière l'analyse statistique montre quelle cas caractérisés par ($d=6cm$. $a/d=40\%$ et $D=14cm$) et ($d=10cm$. $a/d=40\%$ et $D=10cm$) et ($d=10cm$. $D=10cm$ et $a/d=80\%$) donnent les meilleurs résultats. Les erreurs relatives sont minimales, elles valent respectivement **1.9%**, **4.4%** et **5.9%**.

Tableau. 3. 33: Comparaison des résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $d=6\text{cm}$).

Nature	Presspahn, $e=2\text{mm}$, $d=6\text{cm}$								
D(cm)	10			14			20		
a/d(%)	$E_{\text{préd}}$	E_{exp}	K%	$E_{\text{préd}}$	E_{exp}	K%	$E_{\text{préd}}$	E_{exp}	K%
20	18	15.4	17.4	17.1	16.5	3.3	16.1	18.8	14.5
40	16.5	15.1	9.5	15.5	15.8	1.9	14.5	17.7	17.9
60	15.5	14.9	4.1	14.5	15.5	5.8	13.6	17.2	21.2
80	15.2	13.3	14.4	14.2	13.2	7.6	13.2	16.6	20.2
100	15.4	12.9	19.6	14.4	12.5	15.4	13.4	14.4	6.5

Tableau. 3. 34: Comparaison des résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $d=10\text{cm}$).

Nature	Presspahn, $e=2\text{mm}$, $d=10\text{cm}$								
D(cm)	10			14			20		
a/d(%)	$E_{\text{préd}}$	E_{exp}	K%	$E_{\text{préd}}$	E_{exp}	K%	$E_{\text{préd}}$	E_{exp}	K%
20	12.6	10.7	17.2	12.2	13.7	10.5	11.9	13.3	10.1
40	11	10.6	4.4	10.7	13.3	19.3	10.3	12.3	15.7
60	10.1	10.1	0.3	9.7	11.6	15.9	9.4	11.6	18.9
80	9.7	9.2	5.9	9.4	11.1	15.2	9	10.5	14
100	9.9	8.33	18.9	9.6	10.7	10	9.3	9.4	1.3

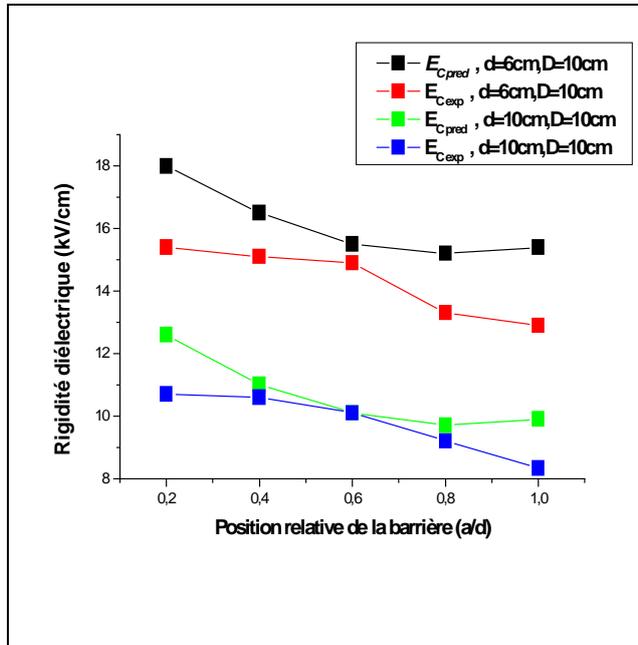


Figure. 3.34: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la position relative de la barrière (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $d=6$ et 10cm)

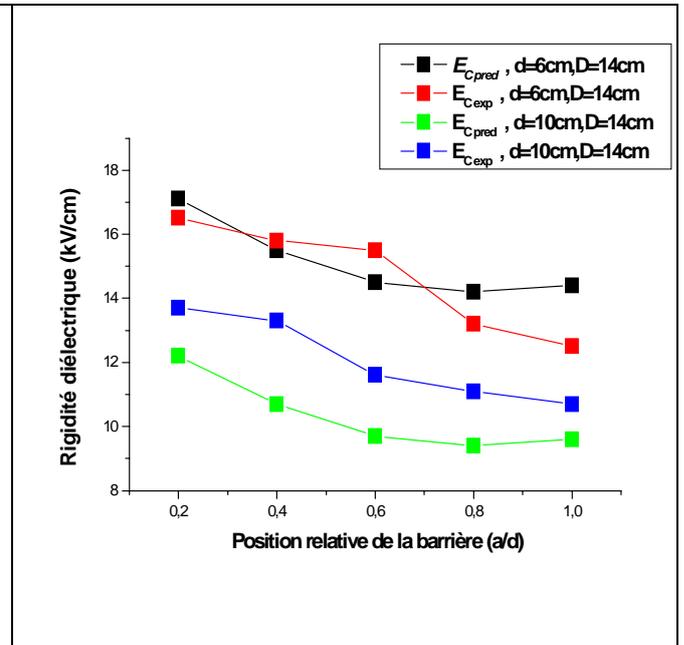


Figure. 3.35: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la position relative de la barrière (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d=6$ et 10cm)

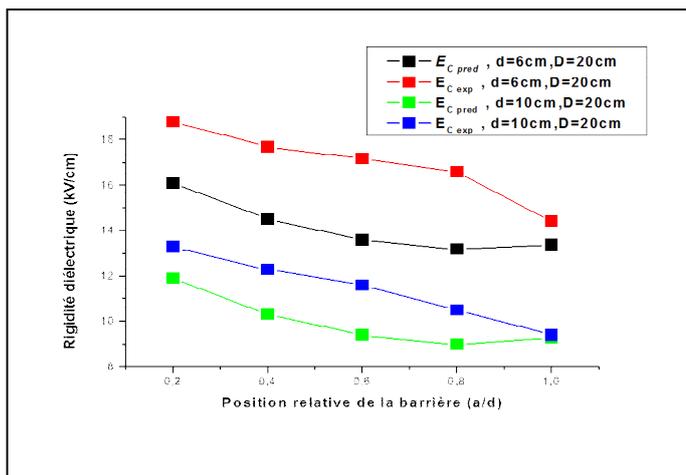


Figure. 3. 36: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la position relative de la barrière (Presspahn, $e=2mm$, $D=20cm$, $d= 6$ et $10cm$)

3.6.2.2 Barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm

L'analyse statistique présentée dans les Tableaux 3.35 et 3.36 stipule des écarts très importants pour tous les diamètres de la barrière et pour les positions relatives 40 et 80%. Ce grand écart est comparé par rapport à la référence qui est 5%. Ceci nécessite une tache de minimisation de l'erreur.

Tableau. 3. 35: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Bakélite, $e= 4mm$, $d= 6cm$).

Nature	Bakélite, $e=4mm$, $d=6cm$								
D(cm)	10			14			20		
a/d(%)	$E_{préd}$	E_{exp}	K%	$E_{préd}$	E_{exp}	K%	$E_{préd}$	E_{exp}	K%
20	25.2	15.4	63.8	21.1	16.5	27.9	25.2	18.8	33.8
40	22.7	15.1	50.6	18.6	15.8	17.7	22.7	17.7	28.2
60	20.7	14.9	38.7	16.6	15.5	7.6	20.7	17.2	20.1
80	19.2	13.3	44.8	15.1	13.2	14.8	19.2	16.6	15.9
100	18.2	12.9	41.4	14.1	12.5	13.2	18.2	14.4	26.6

Tableau. 3. 36: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Bakélite, $e=4mm$, $d= 10cm$).

Nature	Bakélite, $e=4mm$, $d=10cm$								
D(cm)	10			14			20		
a/d(%)	$E_{préd}$	E_{exp}	K%	$E_{préd}$	E_{exp}	K%	$E_{préd}$	E_{exp}	K%
20	16.7	10.7	55.6	12.6	13.7	7.7	16.7	13.3	25.9
40	14.8	10.6	39.9	10.7	13.3	19.1	14.8	12.3	20.1
60	13.4	10.1	32.2	9.3	11.6	19.6	13.4	11.6	15.1
80	12.5	9.2	35.9	8.4	11.1	24.1	12.5	10.5	18.3
100	12	8.3	44.1	8	10.7	25.3	12	9.4	28

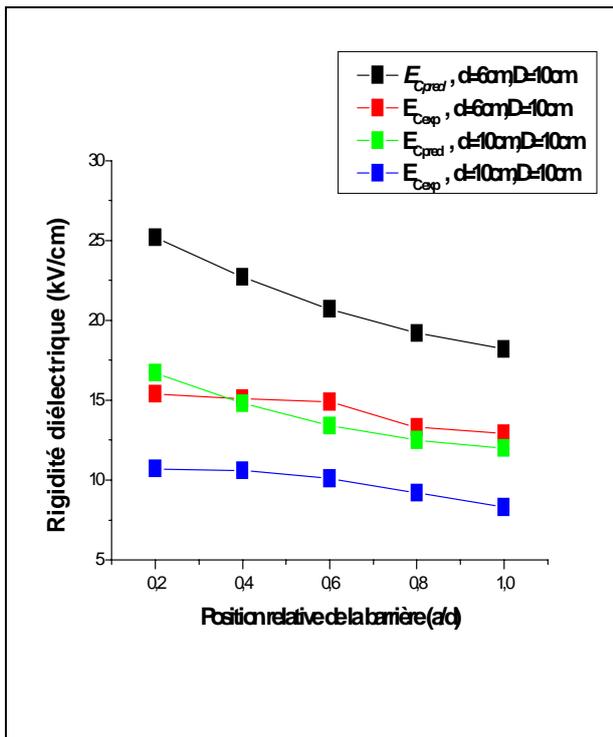


Figure. 3.37: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la position relative de la barrière (Bakélite, $e=4mm$, $D=10cm$, $d=6$ et $10cm$)

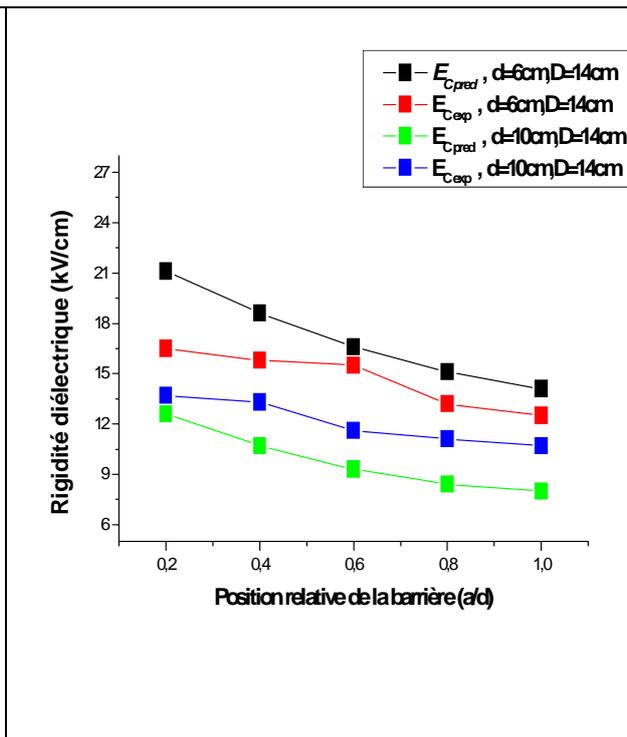


Figure. 3.38: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la position relative de la barrière (Bakélite, $e=4mm$, $D=14cm$, $d=6$ et $10cm$)

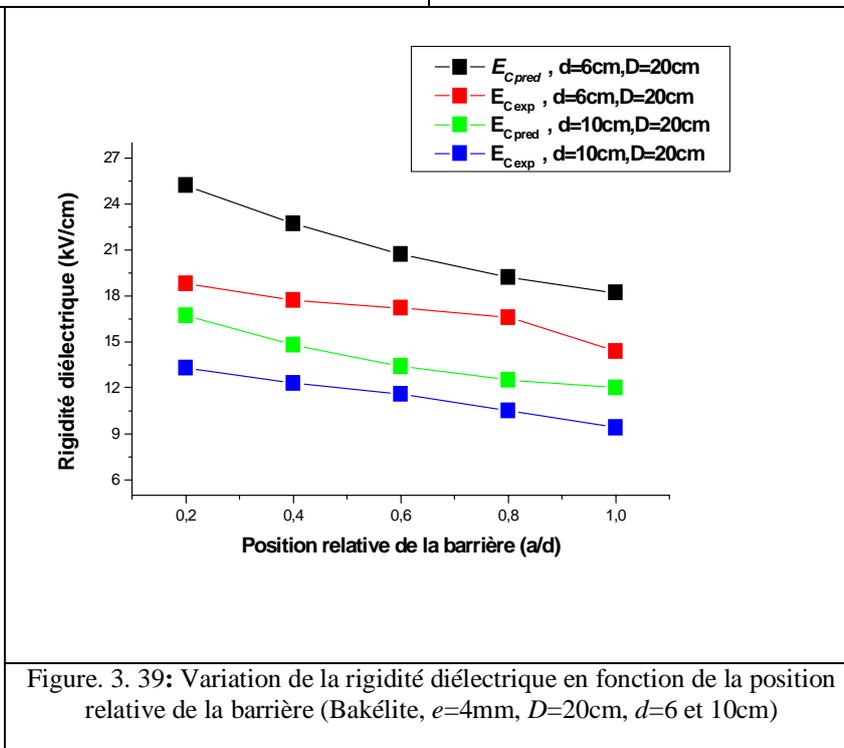


Figure. 3.39: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la position relative de la barrière (Bakélite, $e=4mm$, $D=20cm$, $d=6$ et $10cm$)

3.7 Influence du diamètre de la barrière

3.7.1 Tension de claquage

Pour évaluer l'influence du diamètre sur la tension de claquage, nous considérons la barrière de même nature et épaisseur et nous changeons le diamètre. Les résultats sont présentés à la Figure (3.40). Nos résultats sont en accord avec ceux obtenus par d'autres chercheurs. En général, la tension de claquage dépendra des différents mécanismes de décharges généralement observés[3], [14].

3.7.1.1 Barrière en Presspahn d'épaisseur 4mm

L'erreur relative pour $d=6\text{cm}$, donne des bon résultats, elle est diminuée de **4,8%** pour $D=10\text{cm}$ pour atteindre l'erreur minimale **2,5%**, puis se stabilise à une valeur très proche de notre choix optimal qui égale **5.7%** tout en augmentant le diamètre de la barrière. Cependant, pour $d=10\text{cm}$, l'erreur croît avec le diamètre de la barrière de **2.4%** vers la valeur **11%**. Les deux dernières valeurs observées dans le tableau (3. 37) sont supérieures à notre référence 5%. Pour la position 80%, les résultats regroupés dans le tableau (3.38) montrent que les erreurs sont dans l'ordre de 5%, sauf le cas de la barrière 20cm.

Tableau. 3. 37: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (**Presspahn**, $e=4\text{mm}$, $a/d=40\%$).

Nature	Presspahn, $e=4\text{mm}$, $a/d=40\%$, (U_c)								
D(cm)	10			14			20		
d(cm)	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%
4	80,2	91.1	11,9	75,1	78.5	4,2	70,1	74.8	6,2
6	96,6	92.1	4,8	91,6	89.3	2,5	86,5	91.8	5,7
8	108,1	97.3	11	103	110.8	6,9	98	100.1	2,1
10	114,6	117.5	2,4	109,6	118.8	7,3	104,5	117.5	11
12	116,2	120.6	3,6	111,2	127.5	12,7	106,1	126.6	16,1

Tableau. 3. 38: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (**Presspahn**, $e=4\text{mm}$, $a/d=80\%$).

Nature	Presspahn, $e=4\text{mm}$, $a/d=80\%$, (U_c)								
D(cm)	10			14			20		
d(cm)	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%
4	69,4	88,6	21,7	64,3	71,6	10,1	59,3	64,3	7,8
6	85,8	87,1	1,5	80,7	83,8	3,6	75,7	82	7,6
8	97,3	91,5	6,3	92,2	101	8,6	87,2	92,3	5,5
10	103,8	110,6	6,1	98,8	100,3	1,5	93,7	105,5	11,1
12	105,4	115,8	8,9	100,3	116,6	13,9	95,3	100,5	5,1

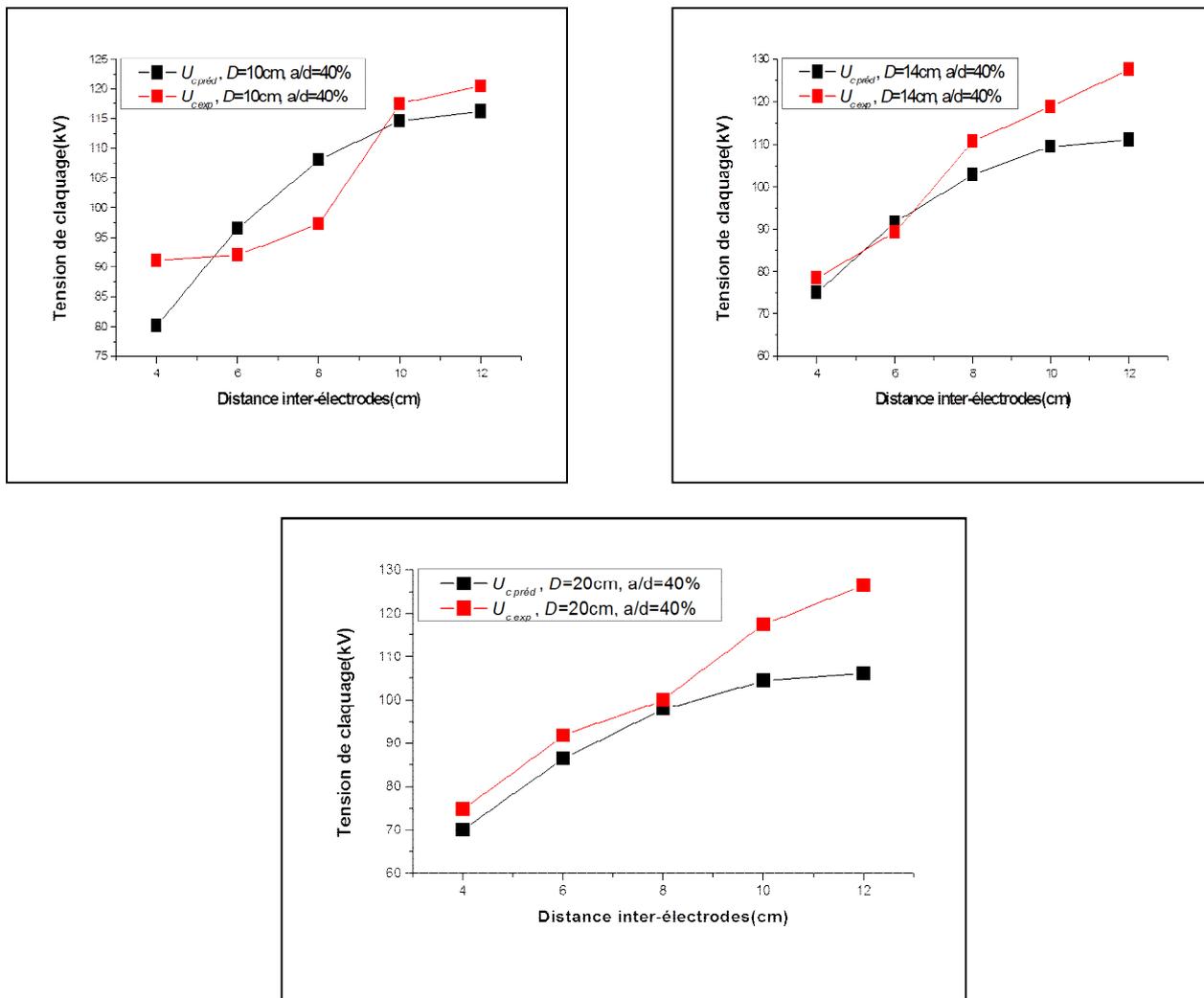


Figure. 3.40: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes (Presspahn, $e=4mm$, $a/d = 40%$) pour différents diamètres.

3.7.1.2 Barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm

D'après les résultats obtenus et présentés dans le Tableau (3.39), nous remarquons que seules les barrières de diamètres 10 et 20cm présentent les plus faibles erreurs en concordance avec ce que donne DOE. Elles égalent **5** et **5.8%** pour les cas ($d=6cm$, $a/d=40%$ et $D=10cm$) et ($d=10cm$, $a/d=40%$ et $D=20cm$). Pour la position 80%, les erreurs faibles sont caractérisées par les cas présenter dans le Tableau (3.40), ($d=6cm$, $a/d=80%$ et $D=14cm$)et ($d=10cm$, $a/d=80%$ et $D=20cm$).

Tableau. 3. 39: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e= 2mm$, $a/d= 40%$).

Nature	Presspahn, $e=2mm$, $a/d=40%$								
D(cm)	10			14			20		
d(cm)	U_{cpred}	U_{cexp}	K%	U_{cpred}	U_{cexp}	K%	U_{cpred}	U_{cexp}	K%
4	84.7	86.1	1.6	78.3	80.1	2.2	84.7	80.8	4.8
6	95.2	90.6	5	88.8	95.1	6.6	95.2	106.5	10.5
8	105.7	104.6	1	99.3	99.5	0.1	105.7	102.8	2.8
10	116.2	106	9.6	109.8	133	17.3	116.2	123.5	5.8
12	126.7	124.8	1.5	120.4	122.5	1.7	126.7	134.1	5.4

Tableau. 3. 40: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $a/d=80\%$).

Nature	Presspahn, $e=2\text{mm}$, $a/d=80\%$								
D(cm)	10			14			20		
d(cm)	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%
4	74,9	80	6,3	68,5	78	12	74,9	75,8	1,1
6	85,4	79,8	7	79	79,3	0,2	85,4	99,6	14,2
8	95,9	89,6	7	89,6	85,6	4,6	95,9	99,1	3,2
10	106,4	92	15,7	100,1	111	9,8	106,4	105,6	0,7
12	117	117,6	0,5	110,6	112	1,2	117	116,8	0,1

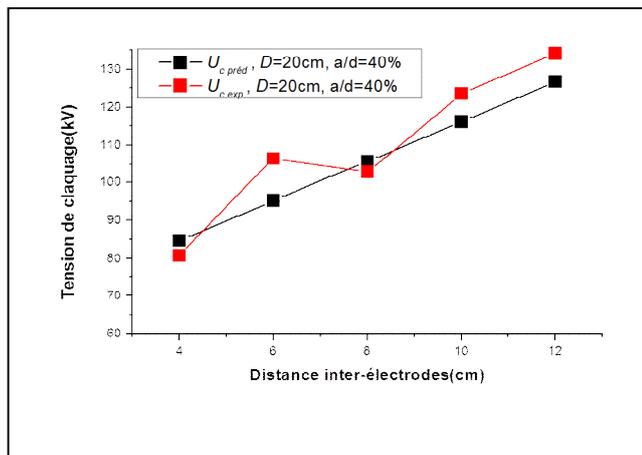
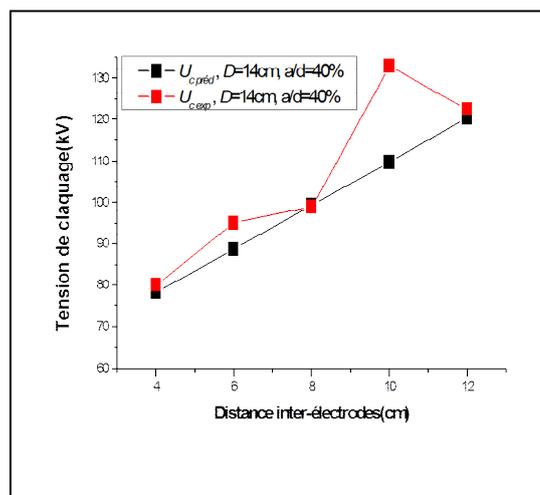
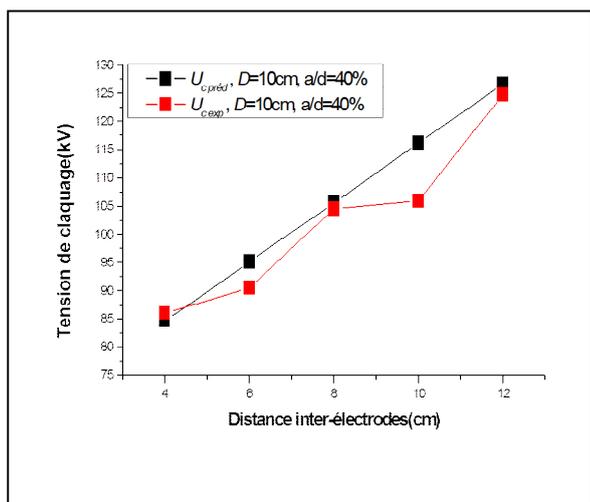


Figure. 3. 41: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour différents diamètres (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $a/d=40\%$).

3.7.1.3 Barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm

Nous remarquons à partir du Tableau (3.41) que les meilleurs résultats sont obtenus dans le cas de la barrière de petit diamètre $D=10\text{cm}$, où les erreurs relatives sont inférieures à 5% pour les deux distances inter-électrodes 6 et 10cm. L'augmentation du diamètre affecte les erreurs de manières différentes. En augmentant la position à 80%, seule la barrière de diamètre 20cm donne des bons résultats.

Tableau. 3. 41: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Bakélite, $e=4\text{mm}$, $a/d= 40\%$).

Nature	Bakélite, $e=4\text{mm}$, $a/d=40\%$								
D(cm)	10			14			20		
d(cm)	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%
4	100.2	122	17.8	85.3	73.6	15.8	100.2	124	19.1
6	122.6	128	4.2	107.7	88	22.3	122.6	134	8.4
8	136.9	132	3.7	122	113	7.9	136.9	156	12.2
10	143.1	140	2.29	128.2	121	6	143.1	162	11.6
12	141.3	155	8.7	126.4	132	4.1	141.3	190	25.5

Tableau. 3. 42: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour (Bakélite, $e= 4\text{mm}$, $a/d= 80\%$).

Nature	Bakélite, $e=4\text{mm}$, $a/d=80\%$								
D(cm)	10			14			20		
d(cm)	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%	$U_{cpréd}$	U_{cexp}	K%
4	100,2	118	15	85,3	65	31,3	100,2	112	10,4
6	122,6	111	10,4	107,7	82	31,3	122,6	128	4,2
8	136,9	118	16	122	103,3	18	136,9	136	0,6
10	143,1	130	10,1	128,2	106	21	143,1	148	3,2
12	141,3	144	1,8	126,4	119,6	5,7	141,3	146	3,1

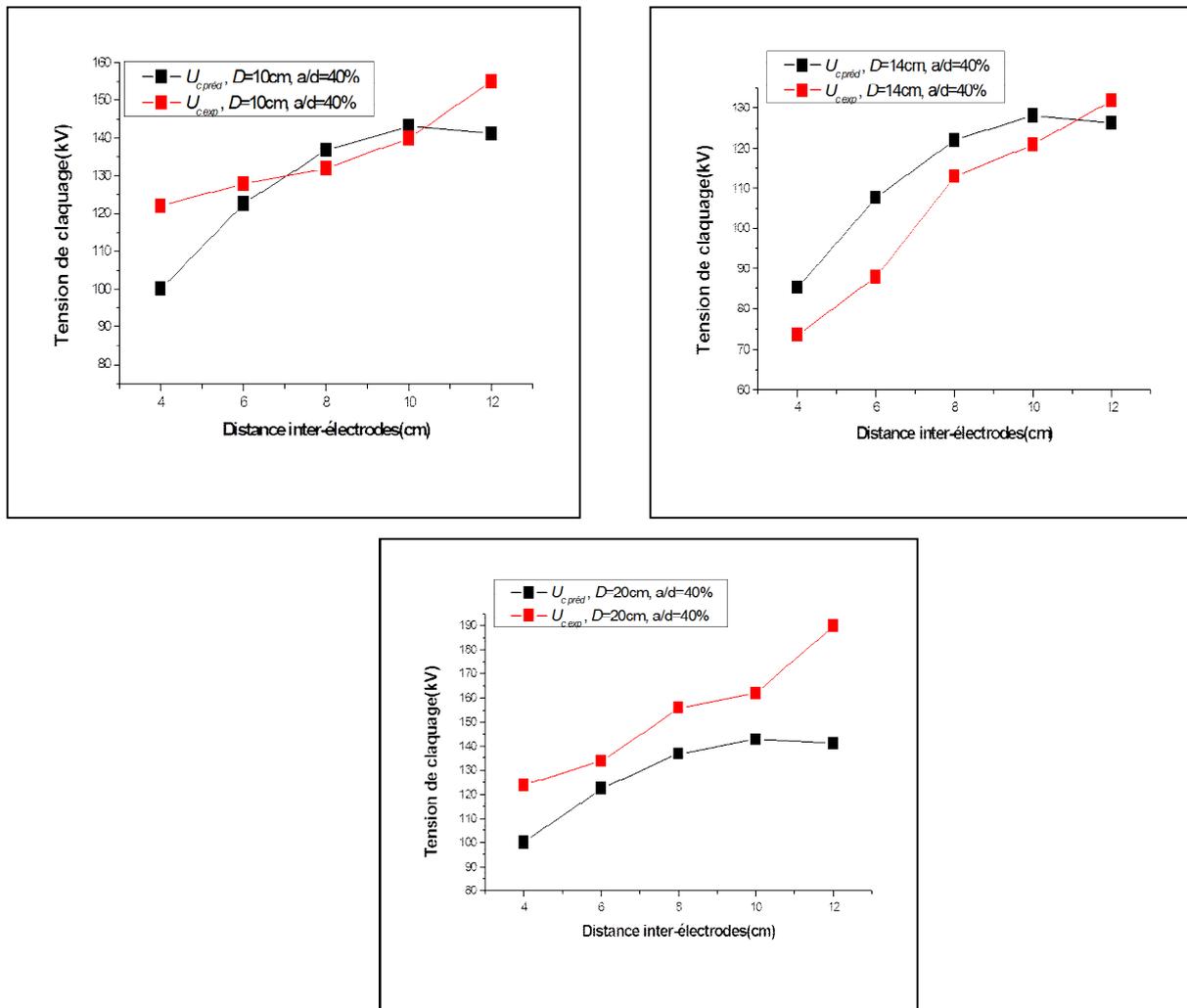


Figure. 3. 42: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour différents diamètres de la barrière en Bakélite ($e=4\text{mm}$, $a/d= 40\%$).

3.7.2 Rigidité diélectrique

Pour évaluer l'influence du diamètre de la barrière sur la rigidité diélectrique, nous considérons deux barrières de même nature et de même épaisseurs mais de diamètre différents $D=10\text{cm}$, $D=14\text{cm}$ et $D=20\text{cm}$. Nous fixons dans ces essais la position relative de la barrière et nous varions la distance inter-électrodes de 4cm à 12cm. La décharge se développe de la pointe vers le bord de la barrière et du bord vers l'électrode plane [3], [14], [72]. Les allures de la rigidité diélectrique prédites et expérimentales correspondant à chaque diamètre sont en décroissance avec l'augmentation de la distance inter-électrodes figures (3.43 et 3.44). Ceci est dû à l'allongement de la décharge disruptive. Cette dernière peut se propager de deux manières différentes. Elle peut se développer de manière directe de la pointe vers le bord de la barrière et du bord de la barrière vers l'électrode plane ; Comme elle peut s'effectuer par étapes. Dont la première, la décharge se propageant de la pointe vers le centre de la barrière. La seconde par l'apparition de décharges glissantes contournant la surface en face de la pointe et la troisième par le claquage de l'intervalle d'huile entre le bord de la barrière et l'électrode plane entraînant la rupture totale [3], [10], [14], [71].

3.7.2.1 Barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm

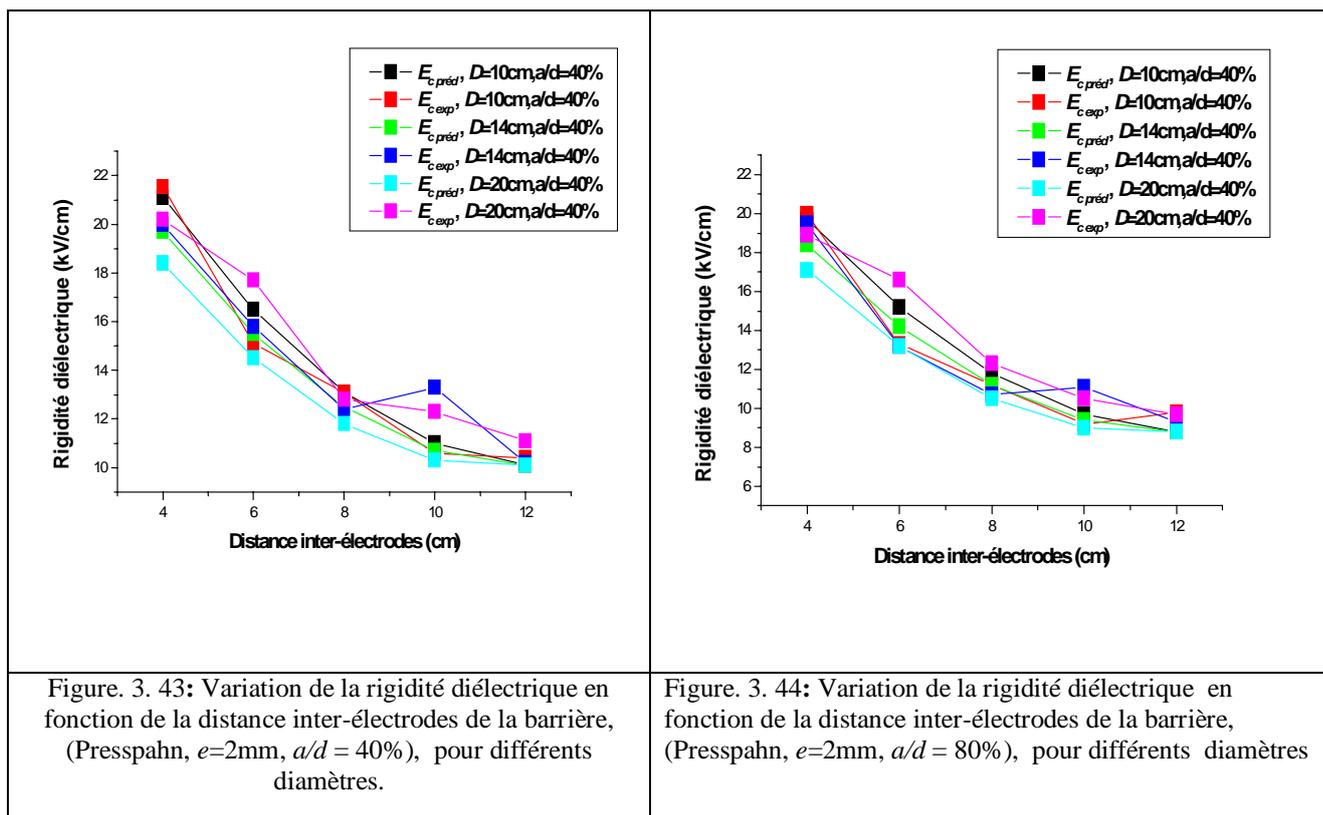
D'après les résultats regroupés dans les Tableaux (3.43 et 3.44), nous constatons une petite déviation des résultats pour les caractéristiques ($d=6\text{cm}$ et $D=14\text{cm}$) et ($d=10\text{cm}$ et $D=10\text{cm}$) à $a/d=40\%$. Dès que la position relative augmente à 80%, seule les caractéristiques ($d=10\text{cm}$ et $D=10\text{cm}$) donnent une petite valeur de l'erreur $K\%=5.9$.

Tableau. 3. 43: Comparaison des résultats expérimentaux et prédits pour (*Presspahn*, $e=2\text{mm}$, $a/d=40\%$).

Nature	Presspahn, $e=2\text{mm}$, $a/d=40\%$								
$D(\text{cm})$	10			14			20		
$d(\text{cm})$	$E_{\text{préd}}$	E_{exp}	$K\%$	$E_{\text{préd}}$	E_{exp}	$K\%$	$E_{\text{préd}}$	E_{exp}	$K\%$
4	21.1	21.54	1.9	19.7	20	1.2	18.4	20.2	8.5
6	16.5	15.11	9.5	15.5	15.8	1.9	14.5	17.7	17.9
8	13.1	13.0825	0.8	12.5	12.4	0.7	11.8	12.8	7.6
10	11	10.6	4.4	10.7	13.3	19.3	10.3	12.3	15.7
12	10.1	10.4	2.3	10.1	10.2	0.5	10.1	11.1	9.2

Tableau. 3. 44: Comparaison des résultats expérimentaux et prédits pour (*Presspahn*, $e=2\text{mm}$, $a/d=80\%$).

Nature	Presspahn, $e=2\text{mm}$, $a/d=80\%$								
$D(\text{cm})$	10			14			20		
$d(\text{cm})$	$E_{\text{préd}}$	E_{exp}	$K\%$	$E_{\text{préd}}$	E_{exp}	$K\%$	$E_{\text{préd}}$	E_{exp}	$K\%$
4	19.7	20	1	18.4	19.5	5.2	17.1	18.9	9.4
6	15.2	13.3	14.4	14.2	13.2	7.6	13.2	16.6	20.2
8	11.8	11.2	5.9	11.2	10.7	4.7	10.5	12.3	14.8
10	9.7	9.2	5.9	9.4	11.1	15.2	9	10.5	14
12	8.8	9.8	9.8	8.8	9.3	5.3	8.8	9.7	9.3



3.7.2.2 Barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm

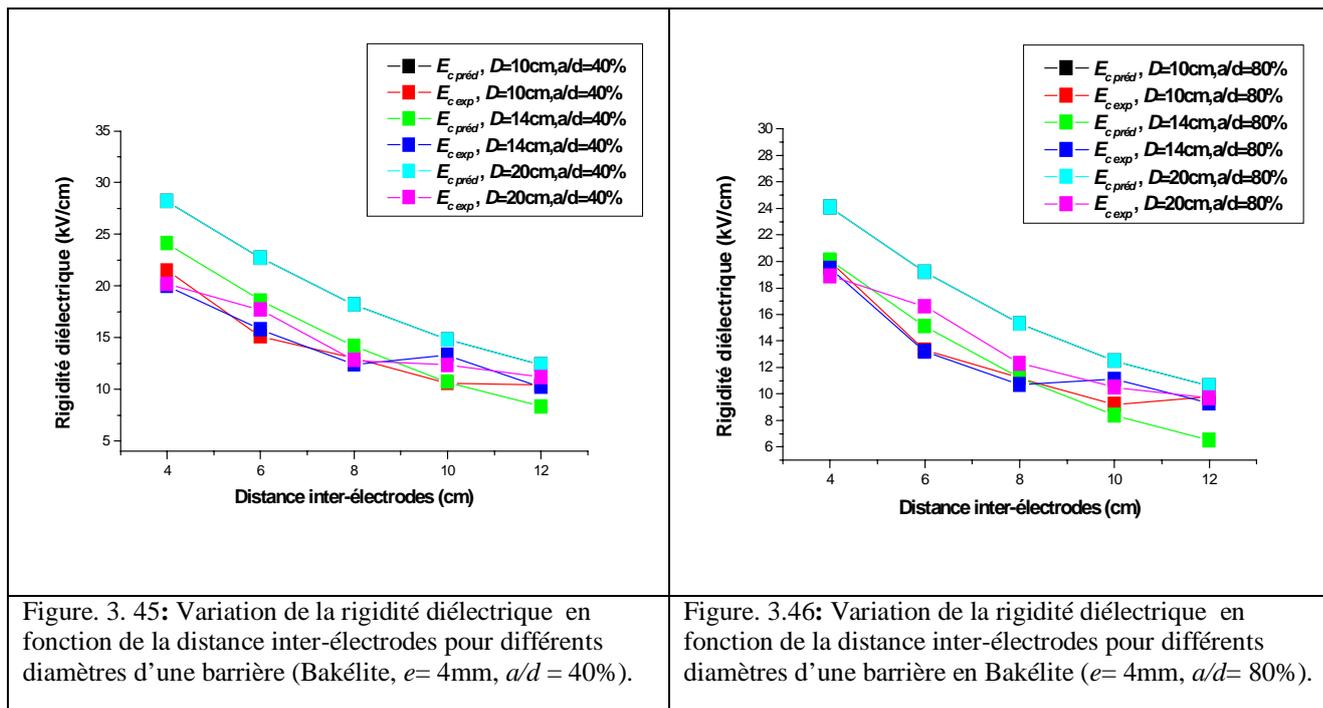
Dans ce cas de la barrière en bakélite est aux positions 40 et 80%, pour les distances considérées (6 et 10cm), nous rencontrons un problème de convergence. La divergence constatée est traduite par les erreurs relatives très élevées, dépassant les 5%.

Tableau. 3. 45: Comparaison des résultats expérimentaux et prédits pour (Bakélite, $e = 4\text{mm}$, $a/d = 40\%$).

Nature	Bakélite, $e=4\text{mm}$, $a/d=40\%$								
D(cm)	10			14			20		
d(cm)	$E_{préd}$	E_{exp}	K%	$E_{préd}$	E_{exp}	K%	$E_{préd}$	E_{exp}	K%
4	28,2	21,5	31,1	24,1	20	20,6	28,2	20,2	19,7
6	22,7	15,1	50,6	18,6	15,8	17,7	22,7	17,7	14,7
8	18,2	13	39,7	14,2	12,4	14,2	18,2	12,8	32,4
10	14,8	10,6	39,9	10,7	13,3	19,1	14,8	12,35	14,8
12	12,4	10,4	19,3	8,33	10,2	18,3	12,4	11,18	5,8

Tableau. 3.46: Comparaison des résultats expérimentaux et prédits pour (Bakélite, $e = 4\text{mm}$, $a/d = 80\%$).

Nature	Bakélite, $e=4\text{mm}$, $a/d=80\%$								
D(cm)	10			14			20		
d(cm)	$E_{préd}$	E_{exp}	K%	$E_{préd}$	E_{exp}	K%	$E_{préd}$	E_{exp}	K%
4	24,1	20	20,9	20,1	19,5	3	24,1	18,9	27,5
6	19,2	13,3	44,8	15,1	13,2	14,8	19,2	16,6	15,9
8	15,3	11,2	37,1	11,2	10,7	5,4	15,3	12,3	24
10	12,5	9,2	35,9	8,4	11,1	24,1	12,5	10,5	18,3
12	10,6	9,8	8,7	6,5	9,3	29,5	10,6	9,7	9,4



3.8 Conclusion

La méthode du plan d'expérience permet d'avoir des modèles mathématiques pour une base de données très large. Elle permet de réduire le temps des essais et le coût de l'expérience. D'après les résultats obtenus, nous pouvons affirmer la qualité acceptable de l'approche adoptée quoiqu'elle présente dans certains cas des anomalies tel que le problème de convergence. Ceci nous a incités à penser à intervenir sur les modèles élaborés pour ajuster les coefficients des modèles mathématiques de manière à réduire les erreurs relatives en dessous de l'erreur retenue comme critère de choix optimal par notre méthode DOE, et qui est de l'ordre de 5%. Les remarques suivantes mettent en lumière les résultats obtenus:

- La modélisation par la méthode du plan d'expérience (DEO de type plan composite centré double (CCF)).
- Les résultats prédits obtenus par les modèles sont influencés par la variation des variables d'entrée.
- La validation est faite pour deux configurations ($d=6$ et 10cm , $a/d=40$ et 80%) dans le domaine codé par -1 et $+1$.
- L'ensemble des résultats de la modélisation donnent de bons résultats. DOE est un outil performant permettant de réduire le nombre d'essais et par conséquent le coup et le temps des essais.

Pour améliorer les modèles établis, nous avons pensé à l'introduction des techniques des essais. Parmi ces techniques, nous avons choisi l'algorithme des chauves-souris qui sera le prochain chapitre dans cette thèse.

CHAPITRE 4

OPTIMISATION PAR CHAUVESOURIS DES COEFFICIENTS DES MODELES MATHEMATiques

4.1 Introduction

Dans cette partie, nous introduisons une définition de la méthode d'optimisation par l'algorithme des chauves-souris dit (BAT algorithme). Le but est d'optimiser les coefficients des modèles élaborés via l'utilisation de la méthode du plan d'expérience. Cette opération vise la minimisation de l'erreur relative entre nos résultats calculés et ceux issus de l'expérience. Nous rappelons que nous faisons varier les distances inter-électrodes pour les positions 40 et 80% utilisées pour la validation. Par ailleurs, les résultats d'optimisation trouvés par l'algorithme de chauve-souris sont exécutés plusieurs fois et les coefficients donnant l'erreur moyenne minimale sont sélectionnés.

4.2 Optimisation des coefficients des modèles

4.2.1 Tension de claquage

4.2.1.1 Coefficients du modèle de la barrière en Presspahn d'épaisseur 4mm

Le point de départ étant le modèle empirique de la barrière en Presspahn d'épaisseur 4mm présenté par l'équation (3.22). A l'aide d'un tableur Excel, on remplace les coefficients du DOE par ceux trouvés par BAT. On visera alors les erreurs relatives minimales qui doivent être inférieure ou égale 5%. Elles sont représentées par le terme $K_{Bat}\%$ entre les sorties expérimentales et optimisées (S_{cexp} et S_{copt}).

4.2.2 Discussions des résultats

Les Figures (4.1 à 4.3) illustrent la variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes. Elles concernent la barrière de nature Presspahn d'épaisseur 4mm et de différents diamètres. D'après les résultats obtenus regroupés dans les Tableaux (4.1 et 4.2), nous constatons la grande influence des nouveaux coefficients trouvés par BAT sur la qualité de modélisation. La bonne qualité est traduite par la reproduction de la courbe expérimentale avec un minimum d'erreur. Les erreurs avant et après optimisation sont comparées entre elles. Et à titre d'illustration nous donnons les erreurs relatives pour les valeurs de validation citées auparavant. Pour $a/d=40\%$, les erreurs moyennes avant optimisation qui étaient de **6,8%**, **6,78%** et **8,27%** deviennent **3,68%**, **2,94%** et **2,67%** après optimisation.

Tableau. 4.1: Comparaison entre les coefficients du modèle avant et après optimisation (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $a/d=40\%$).

b_i	Coefficients du modèle polynomial				Erreur relative moyenne et Ecart type (%)					
	Avant optimisation	Après optimisation			Avant optimisation			Après optimisation		
		D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm
b_0	100,22	96,51	96	90,5	6,8	6,78	8,27	3,68	2,94	2,67
b_1	18,017	14,62	24,73	29,95						
b_2	-10,817	-7,13	-9	-9	4,42	3,89	5,43	6,13	3,78	2,86
b_3	-5,05	-1,36	-1,53	-1,53						
b_{11}	-9,885	3,68	3	3,6						
b_{22}	-10,11	7,4	7,4	7,4						

Tableau. 4. 2: Comparaison entre les erreurs moyennes des résultats prédits et optimisés pour (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $a/d=40\%$).

Nature	Presspahn, $e=4\text{mm}$, $a/d=40\%$														
D(cm)	10					14					20				
d(cm)	U_{cpred}	U_{cexp}	U_{copt}	$K_{plan}\%$	$K_{Bat}\%$	U_{cpred}	U_{cexp}	U_{copt}	$K_{plan}\%$	$K_{Bat}\%$	U_{cpred}	U_{cexp}	U_{copt}	$K_{plan}\%$	$K_{Bat}\%$
4	80,22	91,16	92,35	11,99	1,29	75,17	78,5	78,77	4,23	0,34	70,12	74,83	74,52	6,28	0,41
6	96,65	92,16	96,9	4,87	5,13	91,6	89,33	88,88	2,54	0,49	86,55	91,83	86,79	5,74	5,48
8	108,12	97,33	103,29	11,09	6,11	103,07	110,83	100,5	6,99	9,32	98,02	100,1	100,87	2,12	0,7
10	114,66	117,5	111,53	2,41	5,09	109,61	118,33	113,61	7,36	3,98	104,56	117,5	116,74	11	0,64
12	116,26	120,66	121,61	3,64	0,76	111,21	127,5	128,23	12,77	0,57	106,16	126,67	134,42	16,19	6,11
$K_{moy}\%$				6,8	3,68				6,78	2,94				8,27	2,67
E.type				4,42	6,13				3,89	3,78				5,43	2,86

Chapitre 4 Optimisation par chauve-souris des coefficients mathématiques des modèles mathématiques

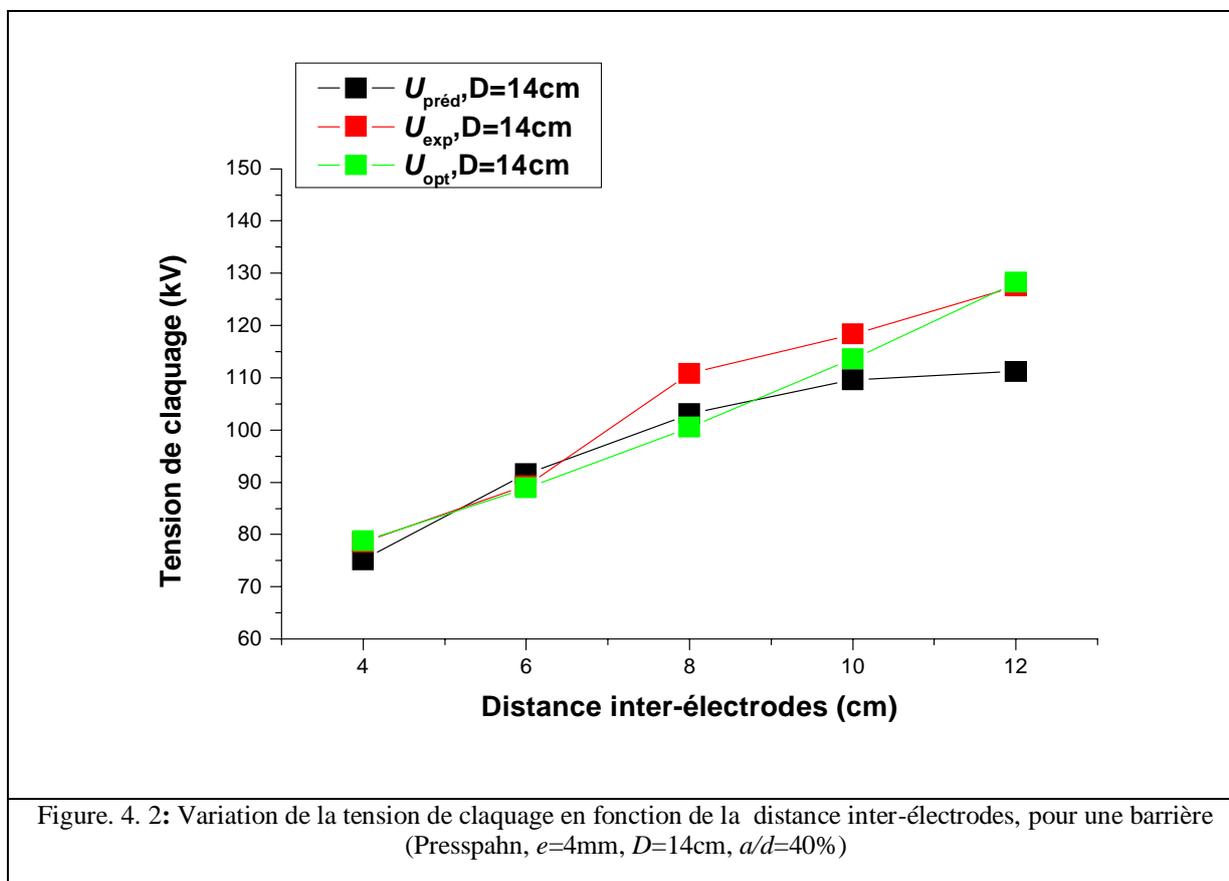
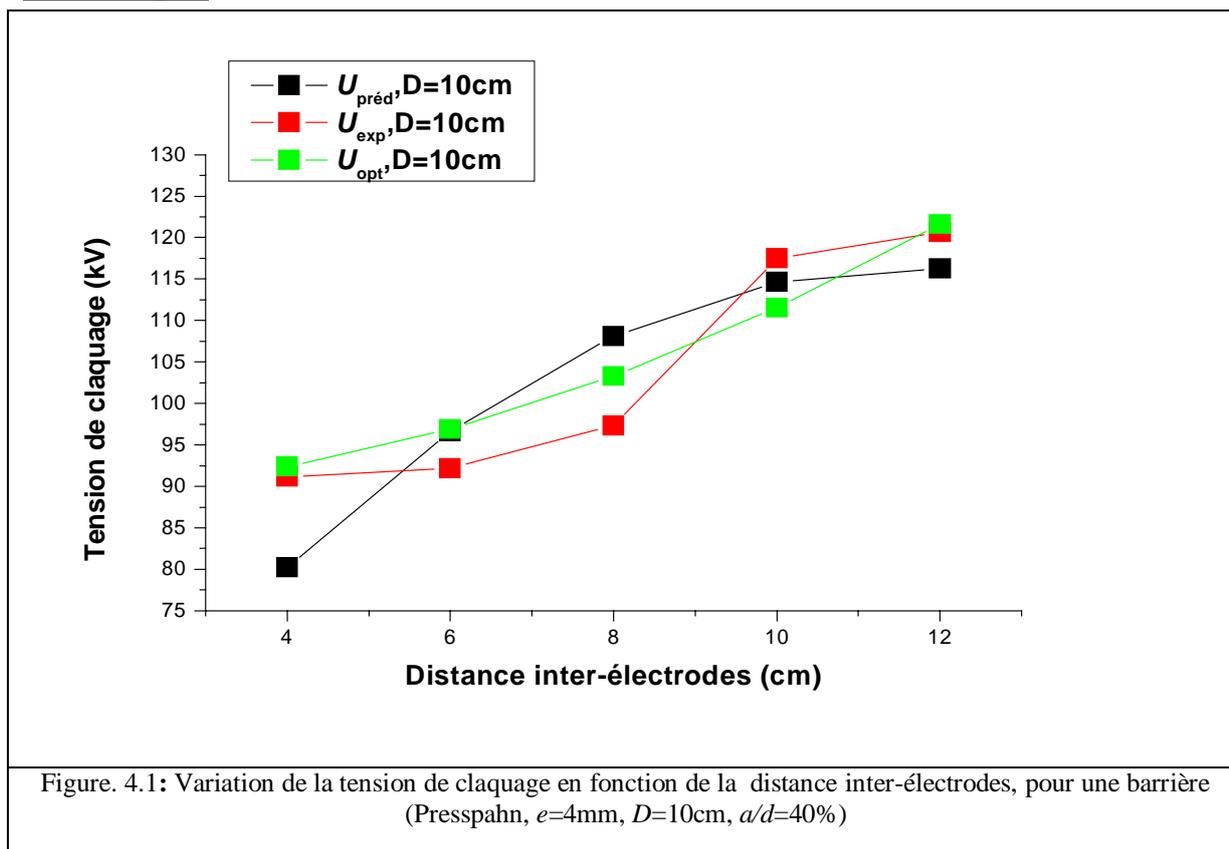
Tableau. 4. 3: Comparaison entre les coefficients du modèle avant et après optimisation (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $a/d=80\%$).

Coefficients du modèle polynomial					Erreur relative moyenne et Ecart type (%)					
b_i	Avant optimisation	Après optimisation			Avant optimisation			Après optimisation		
		D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm
b_0	100,22	96,51	96	89,51	8,94	7,58	7,45	5,42	4,64	9,52
b_1	18,01	14,62	24,73	3,9						
b_2	-10,81	-7,13	-9	-6,57	7,62	5	2,38	4,57	2,86	8,47
b_3	-5,05	-1,36	-1,53	-1,36						
b_{11}	-9,88	3,68	3	0,01						
b_{22}	-10,11	7,4	7,4	9,4						

Tableau. 4. 4: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites pour une barrière en Presspahn d'épaisseur 4mm à la position $a/d=80\%$.

Nature	Presspahn, $e=4\text{mm}$, $a/d=80\%$														
D(cm)	10					14					20				
d(cm)	U_{cpred}	U_{cexp}	U_{copt}	$K_{plan}\%$	$K_{Bat}\%$	U_{cpred}	U_{cexp}	U_{copt}	$K_{plan}\%$	$K_{Bat}\%$	U_{cpred}	U_{cexp}	U_{copt}	$K_{plan}\%$	$K_{Bat}\%$
4	69,41	88,66	90,76	21,71	2,37	64,36	71,66	69,77	10,18	2,63	59,31	64,33	90,3	7,8	10,21
6	85,83	87,16	95,31	1,52	9,35	80,78	83,83	79,88	3,63	4,7	75,73	82	92,31	7,64	0,01
8	97,31	91,5	101,7	6,35	11,15	92,26	101	91,5	8,65	9,4	87,21	92,33	94,26	5,54	10,64
10	103,85	110,66	109,93	6,15	0,65	98,8	100,33	104,61	1,52	4,27	93,75	105,5	96,21	11,13	4,26
12	105,44	115,83	120	8,96	3,6	100,39	116,66	119,23	13,94	2,2	95,34	100,5	98,17	5,12	22,47
$K_{moy}\%$				8,94	5,42				7,58	4,64				7,45	9,52
E.type				7,62	4,57				5	2,86				2,38	8,47

Il en découle des Figures (4.4 à 4.6) et du Tableau 4.4, pour la position 80% l'erreur relative moyenne est passée de **8,94%** à **5,42%** pour le diamètre 10cm et de **7,58%** à **4,64%** pour le diamètre 14cm. Une diminution significative de l'erreur a été remarquée. Pour la barrière de diamètre 20cm l'erreur est strictement supérieure à 5%. C'est le seul cas où on a un problème de convergence et l'erreur reste supérieure au seuil fixé.



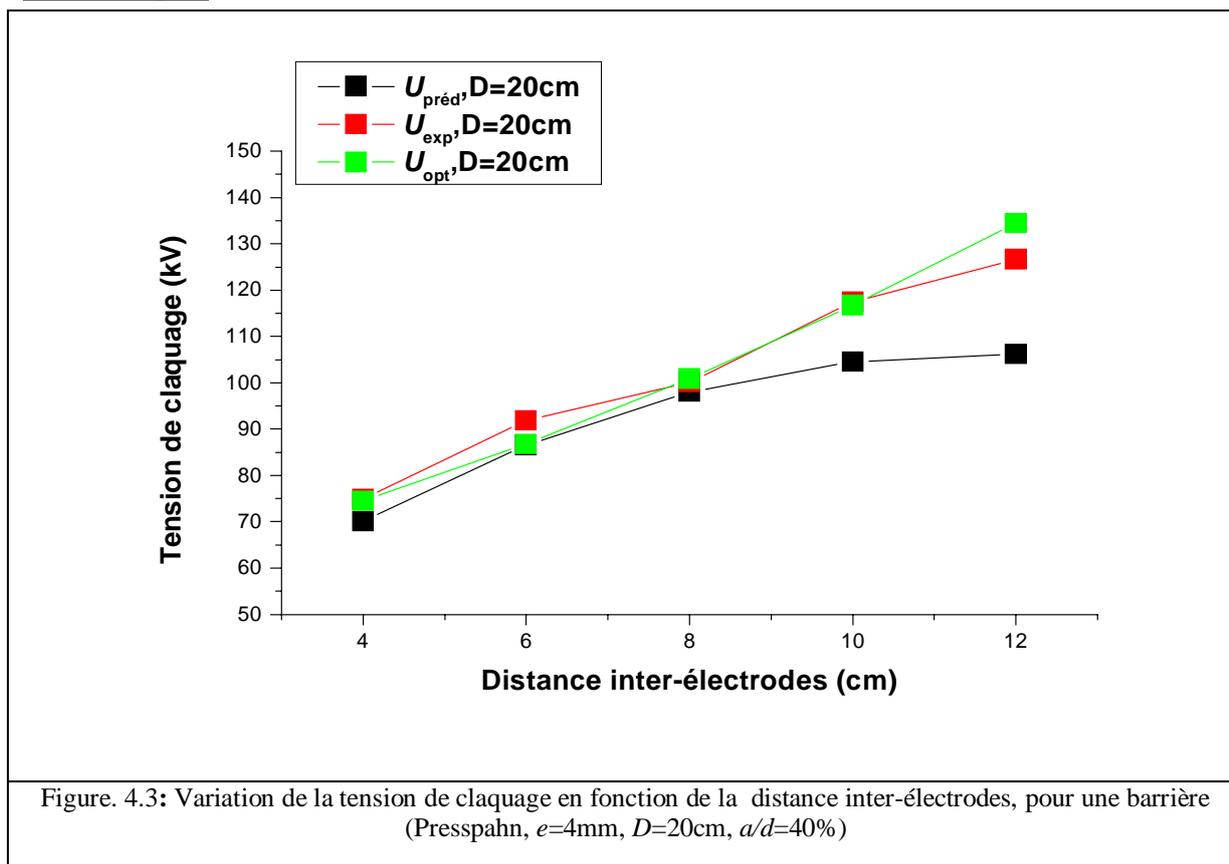


Figure. 4.3: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=40\%$)

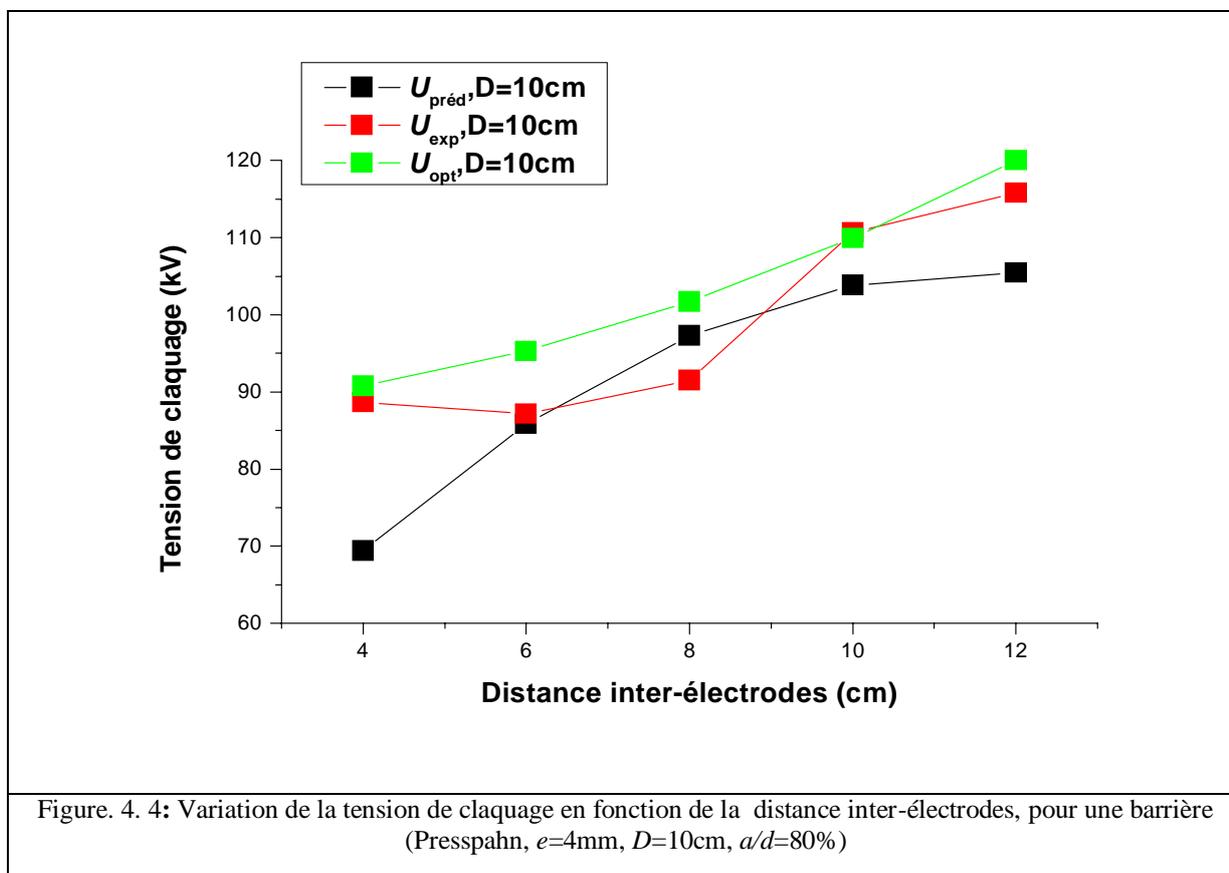
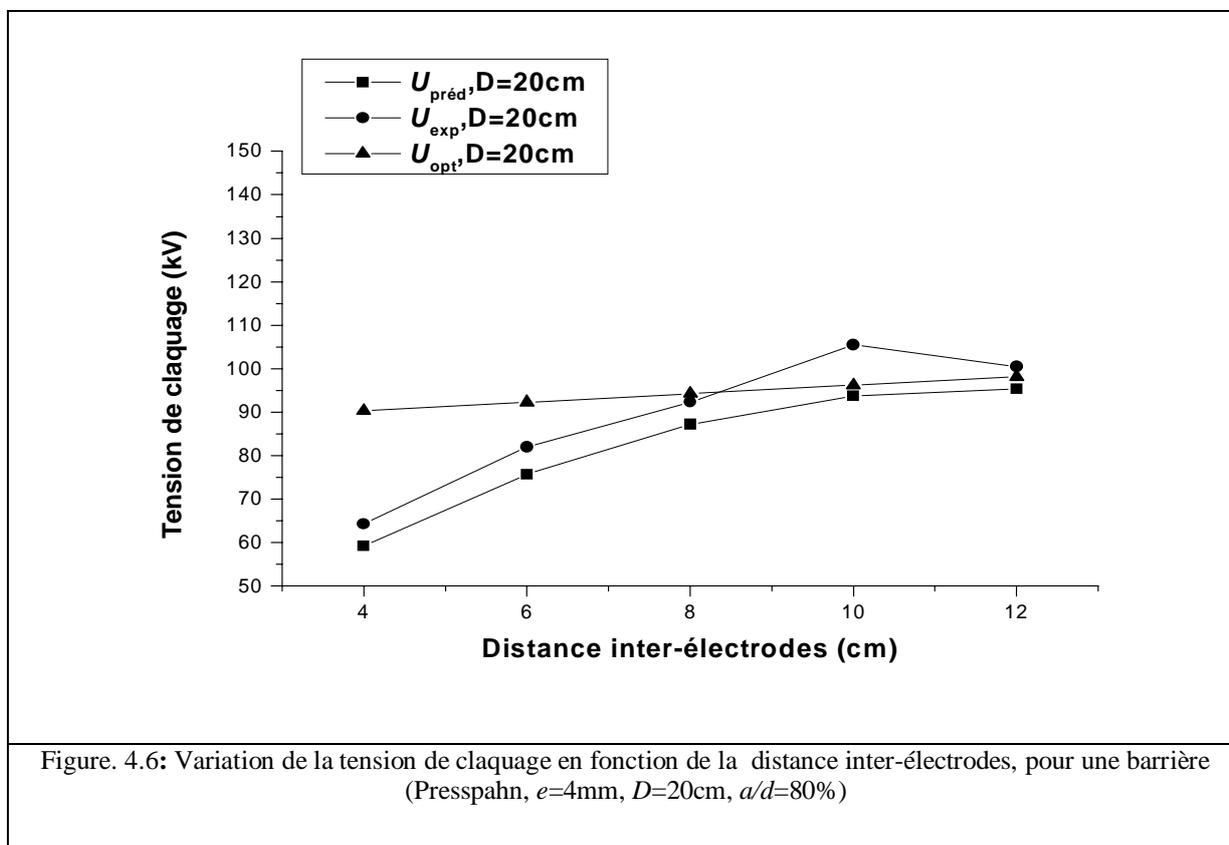
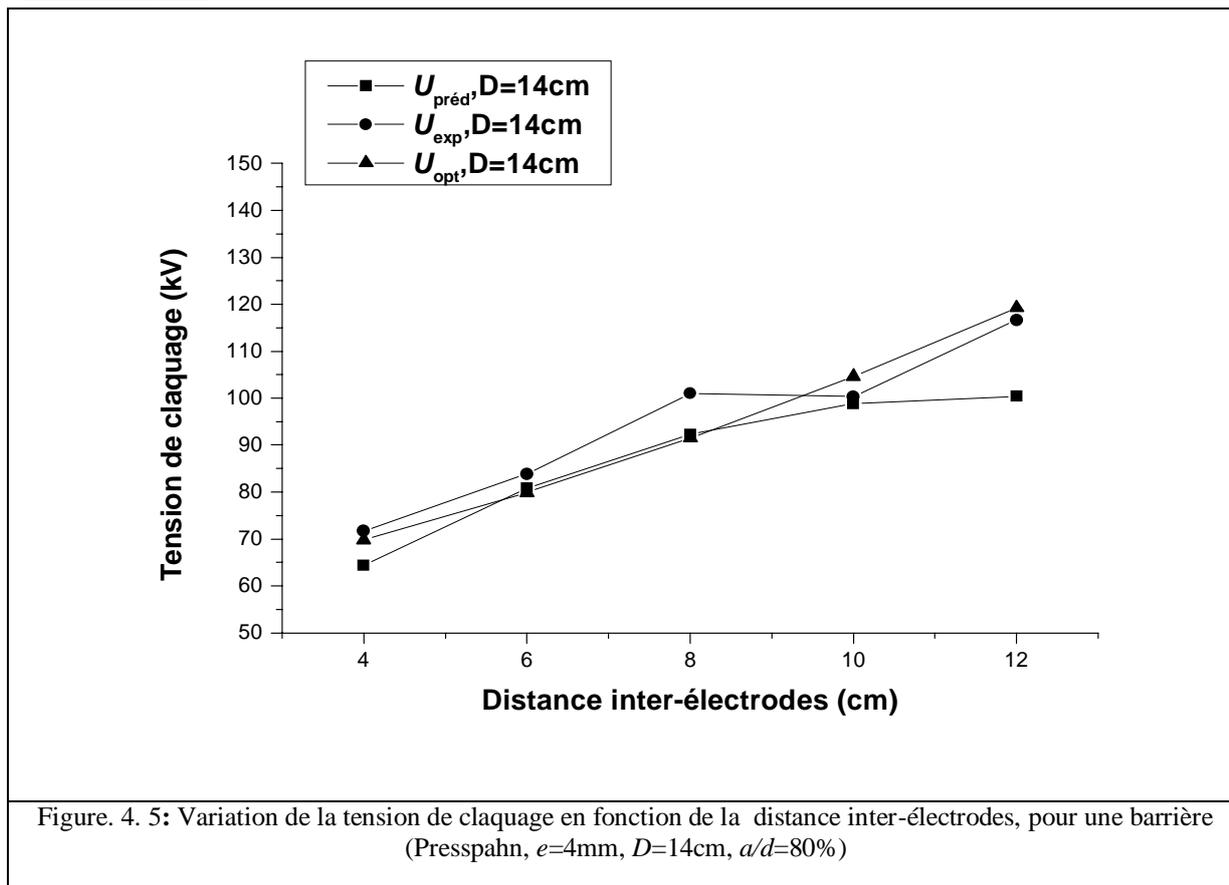


Figure. 4. 4: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière (Presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=80\%$)



Chapitre 4 Optimisation par chauve-souris des coefficients mathématiques des modèles mathématiques

4.2.1.2 Coefficients du modèle de la barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm

4.2.3 Discussions des résultats

Pour une barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm, et après l'utilisation des coefficients mentionnés dans le Tableau (4.5), on remplace ces derniers dans l'équation (3.23), on trouve les résultats illustré dans le Tableau (4.6). Nous remarquons des bons résultats concernant la barrière de diamètre 20cm, cette erreur relative est passée de **5,91** à **3,87%** qui est inférieure à l'erreur considéré (5%) par la méthode du plan d'expérience, sachant que les résultats d'optimisation trouvés par l'algorithme de chauve-souris sont exécutés par les mêmes paramètres du programmes, sous l'environnement Matlab.

Tableau. 4. 5: Optimisation des coefficients du modèle empirique de la tension de claquage d'une barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm à la position 40%.

Coefficients du modèle polynomial					Erreur relative moyenne et Ecart type (%)					
b_i	Avant optimisation	Après optimisation			Avant optimisation			Après optimisation		
		D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm
b_0	94,49	90,46	110,1	102,1	3,8	5,6	5,91	3,5	6,19	3,87
b_1	21,03	18	29,93	25,99						
b_2	-9,78	-8,06	-0,01	-0,07	4,89	3,65	2,84	1,56	6,36	4,22
b_3	6,37	6,02	6,02	6,01						

Tableau. 4.6: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits pour une barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm à la position $a/d=40\%$.

Nature	Presspahn, $e=2\text{mm}$, $a/d=40\%$														
	D(cm)	10					14					20			
d(cm)	U_{cpred}	U_{cexp}	U_{copt}	$K_{plan}\%$	$K_{Bat}\%$	U_{cpred}	U_{cexp}	U_{copt}	$K_{plan}\%$	$K_{Bat}\%$	U_{cpred}	U_{cexp}	U_{copt}	$K_{plan}\%$	$K_{Bat}\%$
4	84,74	86,16	82,51	1,64	9,82	78,36	80,16	80,17	2,24	0,01	84,74	80,83	82,15	4,83	1,63
6	95,25	90,66	91,51	5,06	3,67	88,87	95,16	95,14	6,6	0,02	95,25	106,5	95,15	10,56	10,65
8	105,76	104,66	100,51	1,05	8,51	99,38	99,5	110,1	0,11	10,65	105,76	102,83	108,14	2,85	5,16
10	116,27	106	109,51	9,69	0,52	109,89	133	125,07	17,36	5,96	116,27	123,5	121,14	5,84	1,91
12	126,78	124,83	118,51	1,56	9,06	120,4	122,5	140,03	1,71	14,31	126,78	134,16	134,13	5,49	0,01
$K_{mov}\%$				3,8	3,5				5,6	6,19				5,91	3,87
E.type				4,89	1,56				3,65	6,36				2,84	4,22

Tableau. 4. 7: Optimisation des coefficients du modèle empirique de la tension de claquage d'une barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm à la position 80%.

Coefficients du modèle polynomial					Erreur relative moyenne et Ecart type (%)					
b_i	Avant optimisation	Après optimisation			Avant optimisation			Après optimisation		
		D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm
b_0	94,49	89,1	95	98	7,34	5,6	3,9	4,91	5,34	3,77
b_1	21,03	9,69	17	18						
b_2	9,78	-0,89	-0,01	-0,3	4,91	5,19	5,88	6,47	5,08	4,29
b_3	6,37	1,01	1,01	1,01						

Dans le Tableau (4.7), et après l'utilisation des coefficients optimisés trouvés dans le Tableau (4.6), nous présentons les résultats de même choix de la barrière (Presspahn), mais à la position relative 80%. Dans ce cas, le meilleur résultat de l'optimisation est obtenu avec les nouveaux coefficients du modèle de différents diamètres. Toutefois, pour $D=10\text{cm}$ l'erreur relative est passée de **7,34** à **4,91%**. Pour $D=14$ l'erreur relative est passée de **5,6** à **5,34%**. Enfin pour $D=20\text{cm}$, l'erreur relative est passée de **3,9** à **3,77%**. Pour conclure, ces deux dernier cas la tache de l'optimisation n'est pas évidente puisque sont inférieure à 5%, et d'après les Figures (4.7-4.12), l'allure de U_{copt} suit l'allure U_{cexp} . Les résultats obtenus sont ainsi considérés comme suffisamment satisfaisants.

Chapitre 4 Optimisation par chauve-souris des coefficients mathématiques des modèles mathématiques

Tableau. 4. 8: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites pour une barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm à la position a/d=80%.

Nature	Presspahn, e=2mm, a/d=80%														
D(cm)	10					14					20				
d(cm)	U_{cpred}	U_{cexp}	U_{copt}	$K_{plan}\%$	$K_{Bat}\%$	U_{cpred}	U_{cexp}	U_{copt}	$K_{plan}\%$	$K_{Bat}\%$	U_{cpred}	U_{cexp}	U_{copt}	$K_{plan}\%$	$K_{Bat}\%$
4	74,95	86,16	79,97	6,3	0,03	68,58	78	77,99	12,07	0	74,95	75,83	80,86	1,148	6,63
6	85,47	90,66	84,82	7,06	6,25	79,09	79,33	86,49	0,29	9,03	85,47	99,66	89,86	14,23	9,83
8	95,98	104,66	89,66	7,05	0	89,6	85,66	94,99	4,6	10,89	95,98	99,16	98,86	3,2	0,3
10	106,49	106	94,51	15,75	2,72	100,11	111	103,49	9,8	6,76	106,49	105,66	107,86	0,78	2,08
12	117	124,83	99,35	0,55	15,55	110,62	112	111,99	1,22	0	117	116,83	116,86	0,14	0,025
$K_{moy}\%$				7,34	4,91					5,6	5,34			3,90	3,77
E.type				5,43	6,47				4,98	4,57				5,88	4,29

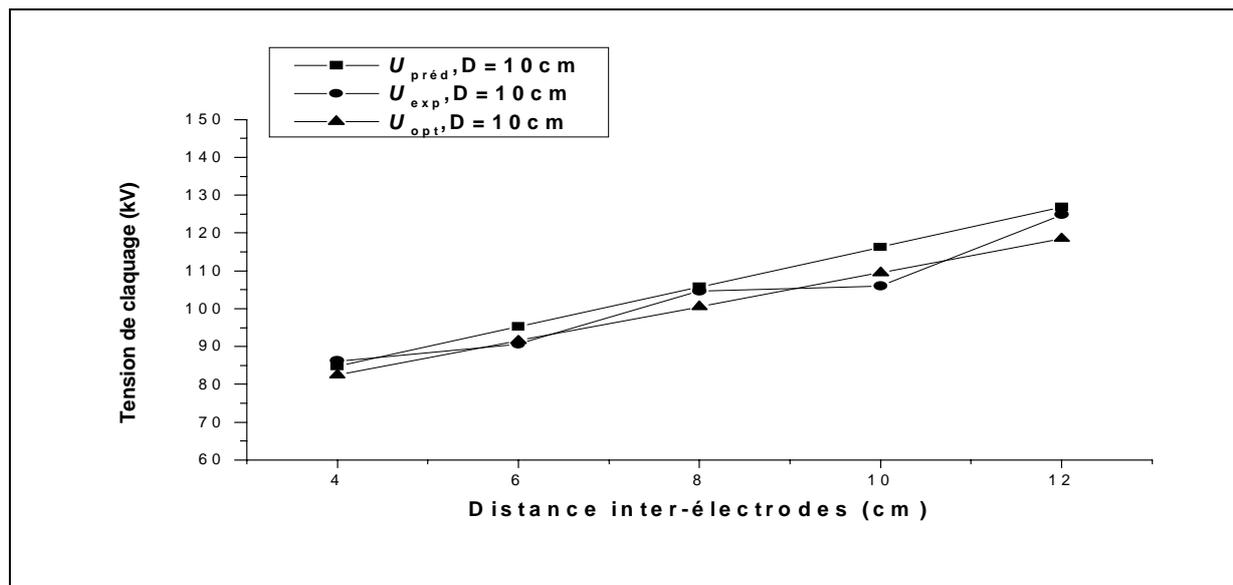


Figure. 4. 7: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière (Presspahn, e=2mm, D=10cm, a/d=40%)

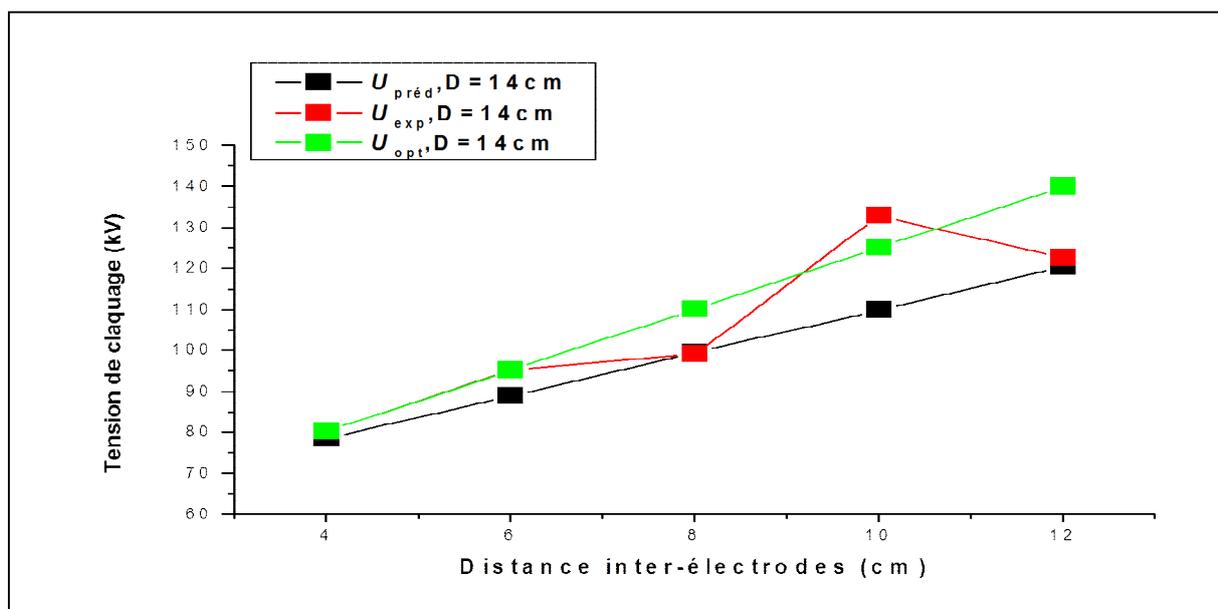


Figure.4. 8: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière (Presspahn, e=2mm, D=14cm, a/d=40%)

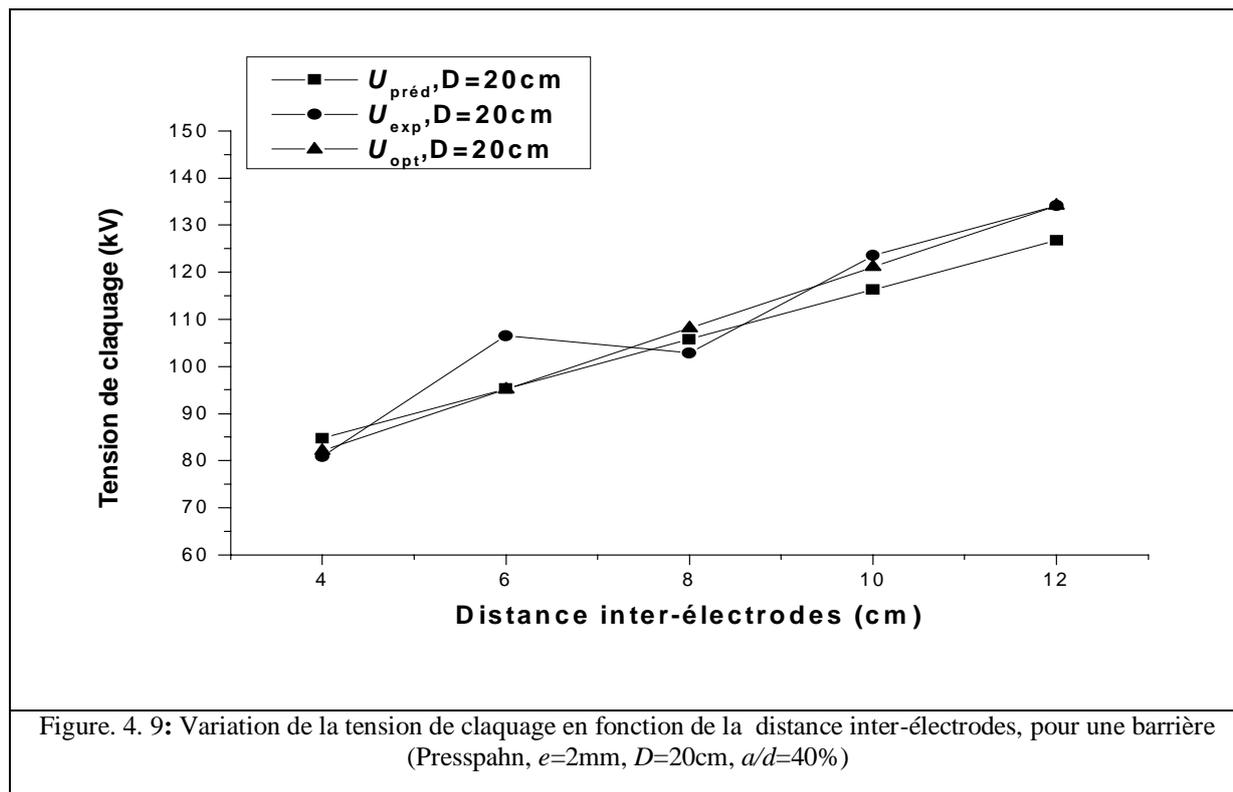


Figure. 4. 9: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=40\%$)

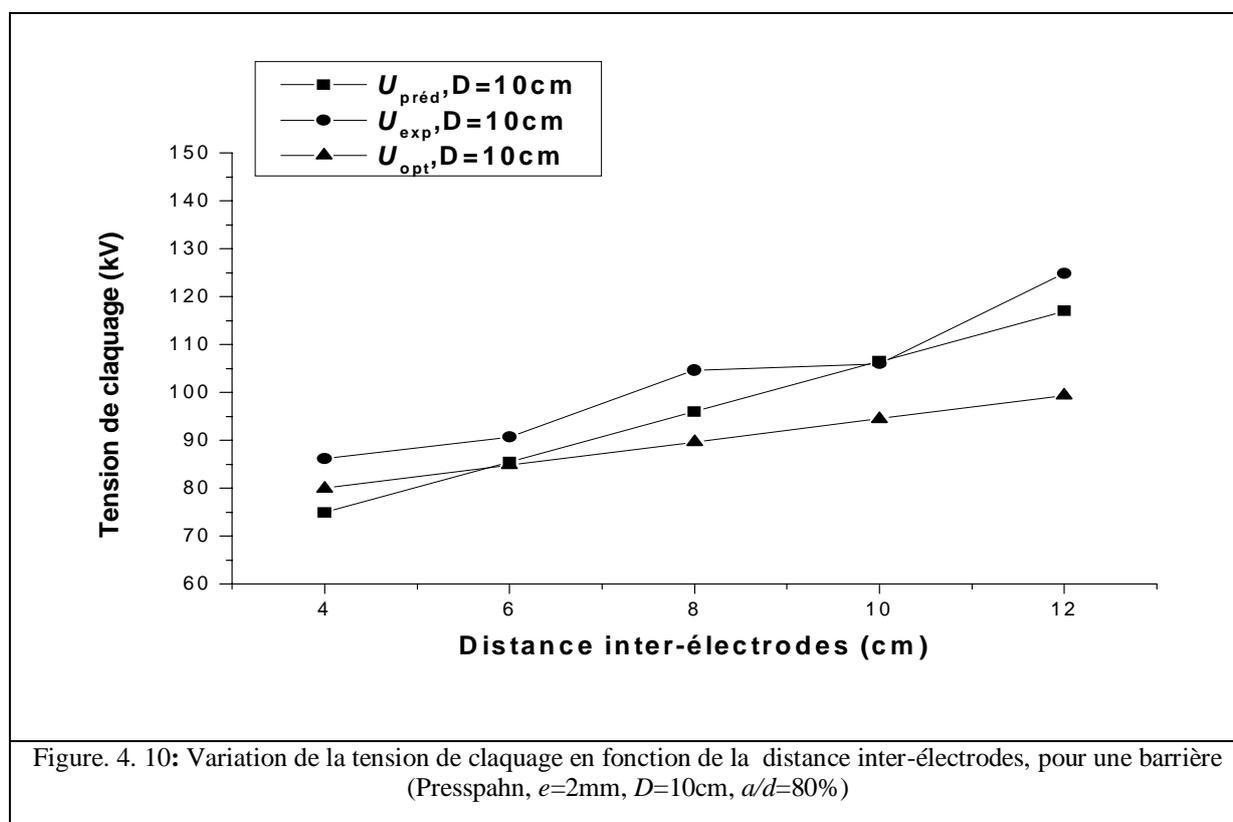


Figure. 4. 10: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière (Presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=80\%$)

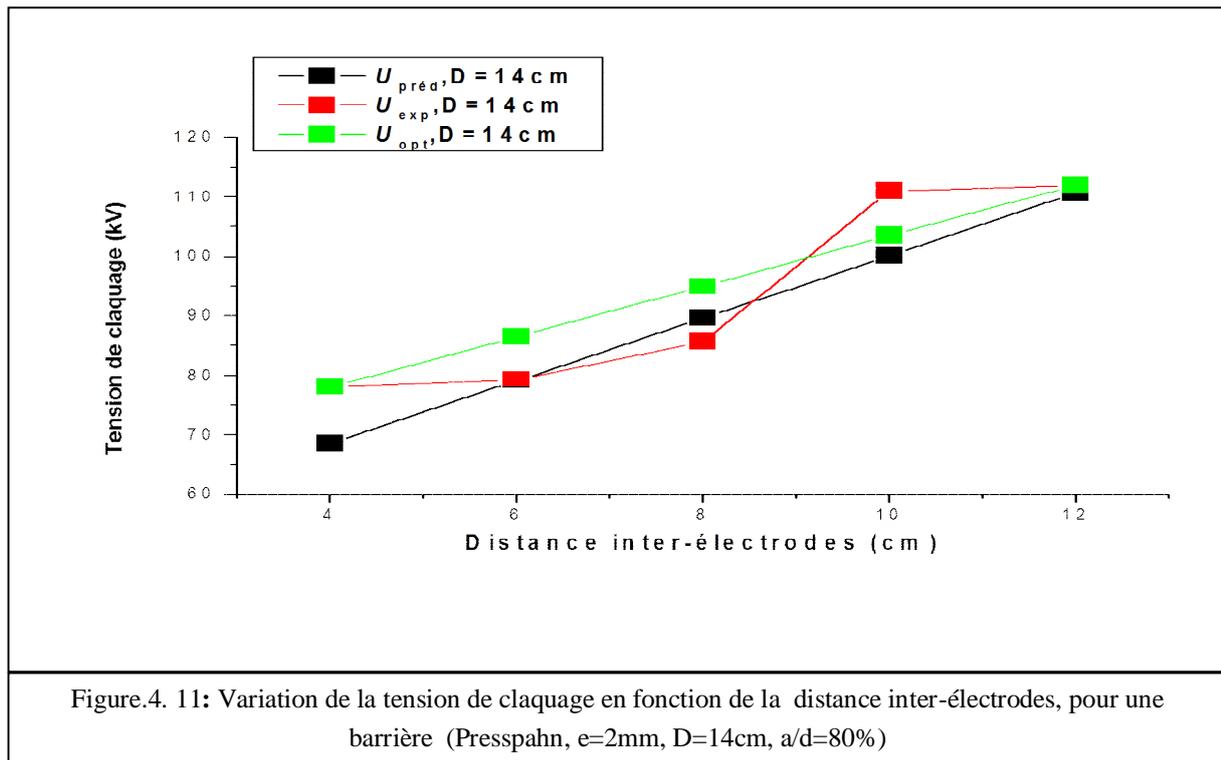


Figure.4. 11: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière (Presspahn, e=2mm, D=14cm, a/d=80%)

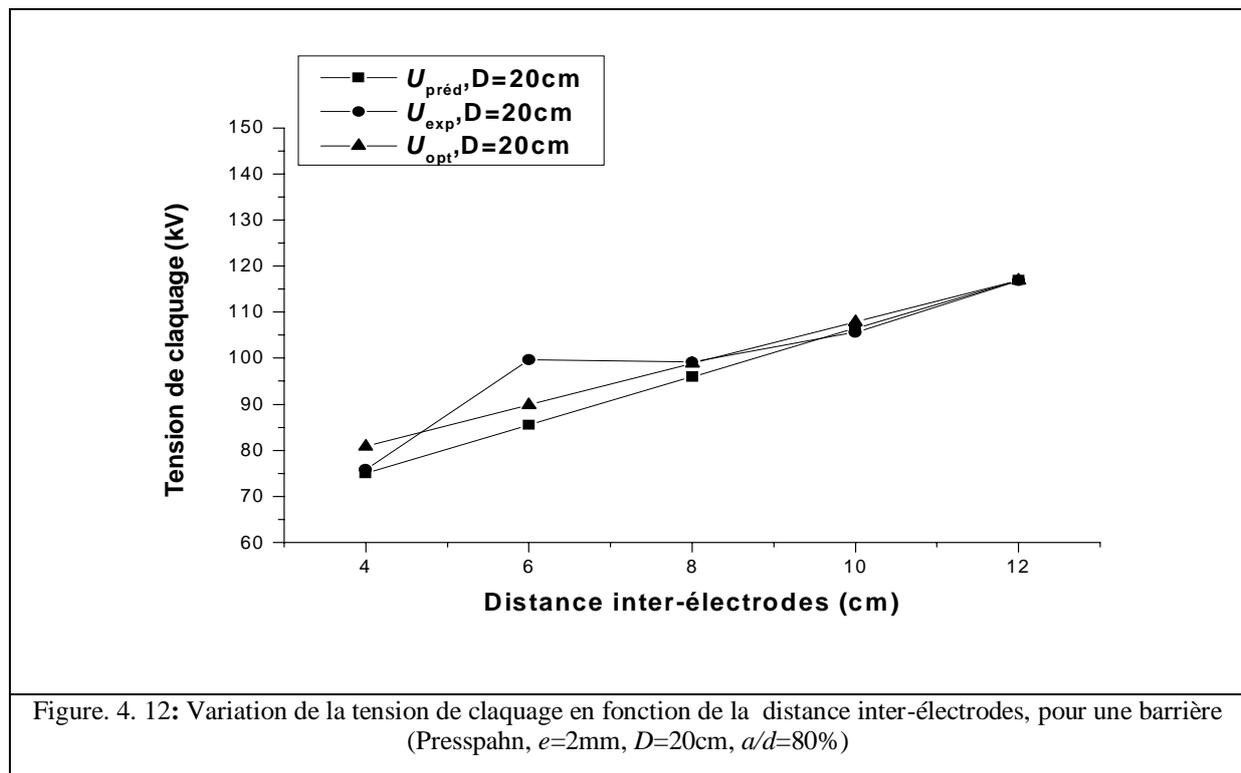


Figure. 4. 12: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière (Presspahn, e=2mm, D=20cm, a/d=80%)

4.2.2.3 Coefficients du modèle de la barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm

4.2.4 Discussions des résultats

Le Tableau (4.9) regroupe les résultats des différents diamètres d'une barrière en bakélite avec une épaisseur 4mm à la position relative 40%. Sachant qu'après le remplacement des nouveaux coefficients trouvés par BAT dans l'équation (3.24) (voir

Chapitre 4 Optimisation par chauve-souris des coefficients mathématiques des modèles mathématiques

Tableau 4.8), on trouve les résultats du Tableau (4.9), de modélisation de la tension de claquage de 10cm, 14cm et 20cm sont entachés d'erreurs relatives moyennes **7,36%**, **11,28%** et **15,41%** respectivement qui ne sont pas acceptables par rapport à notre choix optimal fixé par notre méthode DOE, qui égale à 5%. La tâche d'optimisation par BAT algorithme permet de réduire cette erreur vers des valeurs minimales, Ces dernières sont: **3,87%**, **2,69%** et **3,16%**. A partir des figures (4.13-4.18), on remarque que les résultats expérimentaux et optimisés présentent une bonne corrélation surtout pour les deux distances inter-électrodes 6 et 10cm.

Tableau.4. 9: Optimisation des coefficients du modèle empirique de la tension de claquage d'une barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm, à la position 40%.

Coefficients du modèle polynomial					Erreur relative moyenne et Ecart type (%)					
b_i	Avant optimisation	Après optimisation			Avant optimisation			Après optimisation		
		D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm
b_0	116,62	99,3	101,3	113,3	7,36	11,28	15,41	3,87	2,69	3,16
b_1	20,56	21,32	31,38	31,38						
b_2	-16,1	-4,06	-4,06	-4,06	6,33	7,64	6,88	3,03	1,34	2
b_3	21,56	0,01	26,01	24,01						
b_{11}	14,9	39,06	39,06	37,06						

Tableau.4. 10: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites pour une barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm à la position a/d=40%.

Nature	Bakélite, e=4mm, a/d=40%														
	D(cm)	10					14					20			
d(cm)	U_{cpred}	U_{cexp}	U_{copt}	$K_{plan}\%$	$K_{Bat}\%$	U_{cpred}	U_{cexp}	U_{copt}	$K_{plan}\%$	$K_{Bat}\%$	U_{cpred}	U_{cexp}	U_{copt}	$K_{plan}\%$	$K_{Bat}\%$
4	100,25	122	112,99	17,82	7,38	85,34	73,66	72,36	15,86	1,75	100,25	124	120,93	19,15	2,47
6	122,61	128	126,69	4,2	1,01	107,7	88	91,1	22,39	3,52	122,61	134	139,66	8,49	4,23
8	136,92	132	138,37	3,72	4,82	122,01	113	107,8	7,98	4,59	136,92	156	156,37	12,23	0,23
10	143,17	140	148,02	2,27	5,72	128,27	121	122,48	6,01	1,22	143,17	162	171,04	11,61	5,58
12	141,38	155	155,63	8,78	0,41	126,48	132	135,12	4,17	2,36	141,38	190	183,69	25,58	7,8
$K_{moy}\%$				7,36	3,87				11,28	2,69				15,41	3,16
E.type				6,33	3,03				7,64	1,36				6,88	2

Tableau. 4. 11: Optimisation des coefficients du modèle empirique de la tension de claquage d'une barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm, à la position 80%.

Coefficients du modèle polynomial					Erreur relative moyenne et Ecart type (%)					
b_i	Avant optimisation	Après optimisation			Avant optimisation			Après optimisation		
		D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm
b_0	100,22	79,2	95,2	95,2	10,69	21,49	4,35	3,89	4,47	2,25
b_1	18,017	18,4	32,4	22,9						
b_2	-10,817	-0,01	-5,01	-1,9	5,62	10,66	3,66	5,38	2,95	3,4
b_3	-5,05	18	18,01	18,01						
b_{11}	-9,885	37,1	37,1	37,1						

Tableau. 4. 12: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites pour une barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm à la position a/d=80%.

Nature	Bakélite, e=4mm, a/d=80%														
	D(cm)	10					14					20			
d(cm)	U_{cpred}	U_{cexp}	U_{copt}	$K_{plan}\%$	$K_{Bat}\%$	U_{cpred}	U_{cexp}	U_{copt}	$K_{plan}\%$	$K_{Bat}\%$	U_{cpred}	U_{cexp}	U_{copt}	$K_{plan}\%$	$K_{Bat}\%$
4	100,25	118	102,39	15,04	13,22	85,34	65	62,29	31,3	4,16	100,25	112	112	10,49	0
6	122,61	111	111,6	10,46	0,54	107,7	82	82,25	31,35	0,3	122,61	128	124,87	4,2	2,43
8	136,92	118	120,8	16,03	2,37	122,01	103,33	99,7	18,08	3,51	136,92	136	136,8	0,67	0,59
10	143,17	130	130	10,13	0	128,27	106	114,65	21,01	8,16	143,17	148	147,77	3,25	0,15
12	141,38	144	139,19	1,81	3,33	126,48	119,66	127,09	5,7	6,21	141,38	146	157,8	3,16	8,08
$K_{moy}\%$				10,69	3,89				21,49	4,47				4,35	2,25
E.type				5,62	5,38				10,66	2,95				3,66	3,4

Chapitre 4 *Optimisation par chauve-souris des coefficients mathématiques des modèles mathématiques*

La prédiction est faite pour les paramètres de validation qui sont respectivement, la distance inter-électrodes et la position relative de la barrière, mentionnés en gras dans tous les tableaux, ($d=6$ et 10cm , $a/d=40$ et 80%). Il est conclu de ce qui précède que à $a/d=80\%$:

- la meilleure performance de modélisation est obtenue pour la barrière de diamètre 20cm pour laquelle l'erreur moyenne est strictement inférieure à 5% qui égale $4,35\%$.
- Pour la barrière de diamètre 10 et 14cm , nous remarquons des valeurs des erreurs moyennes très importantes égalant $10,69\%$ et $21,49\%$. L'introduction de l'algorithme BAT a permis de réduire les erreurs moyennes aux valeurs $3,89\%$ et $4,47\%$.

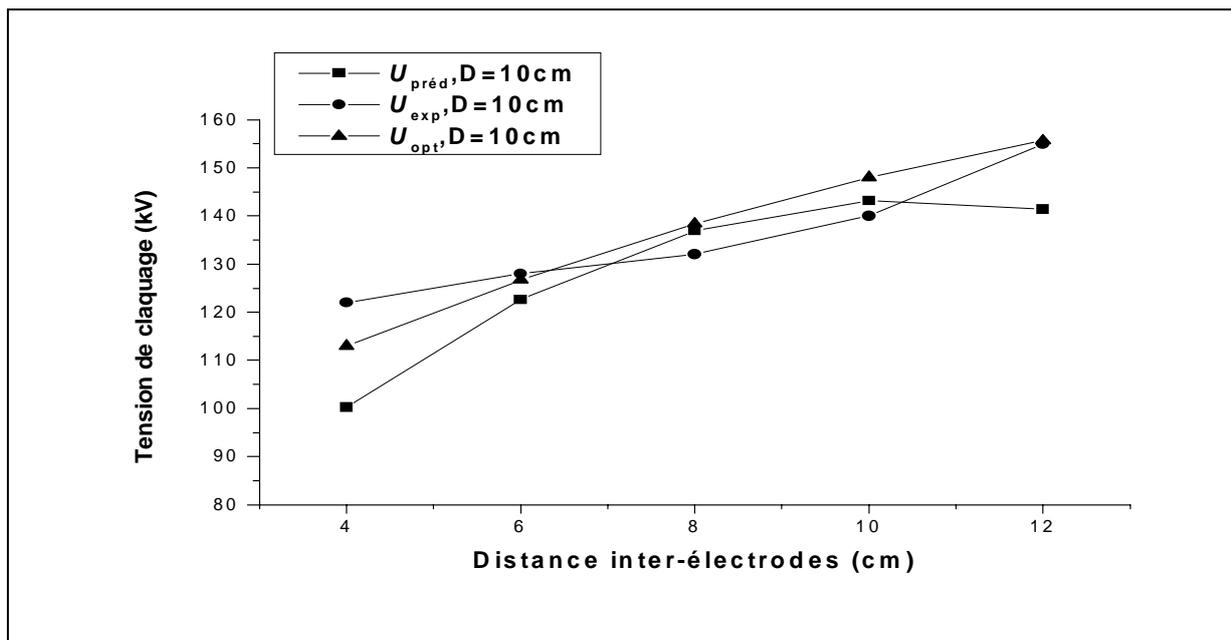


Figure. 4. 13: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes (Bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d= 40\%$)

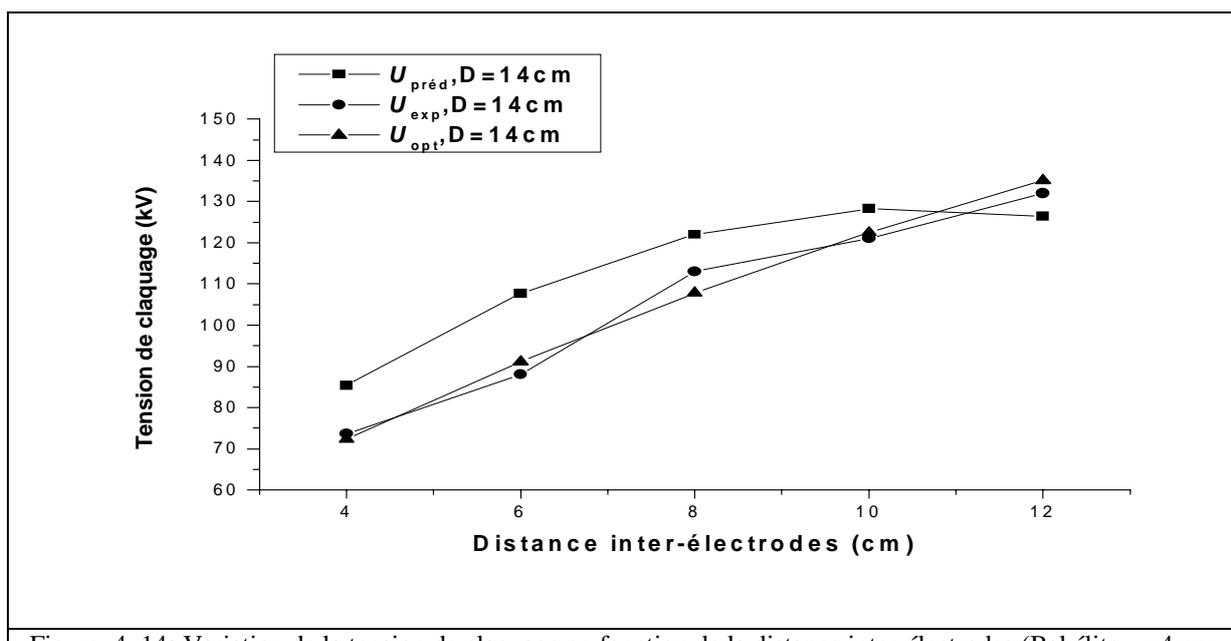
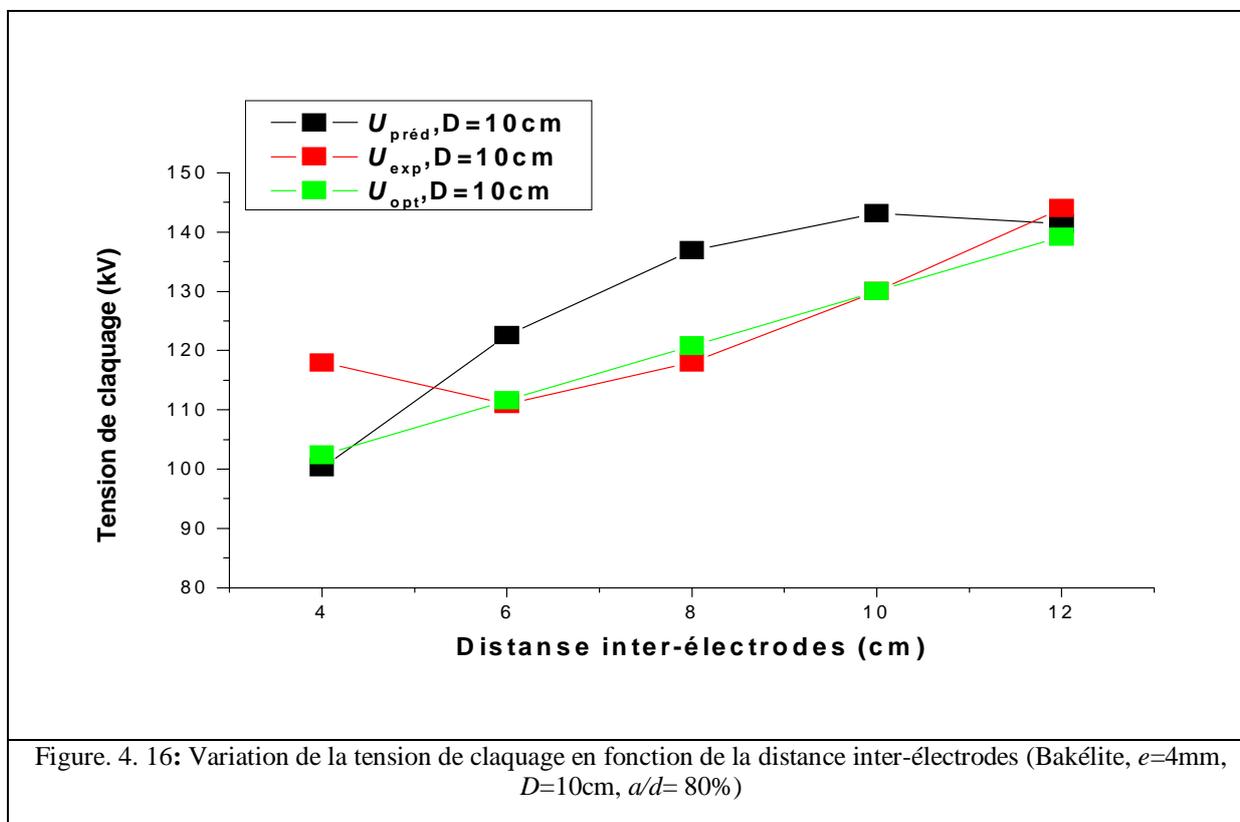
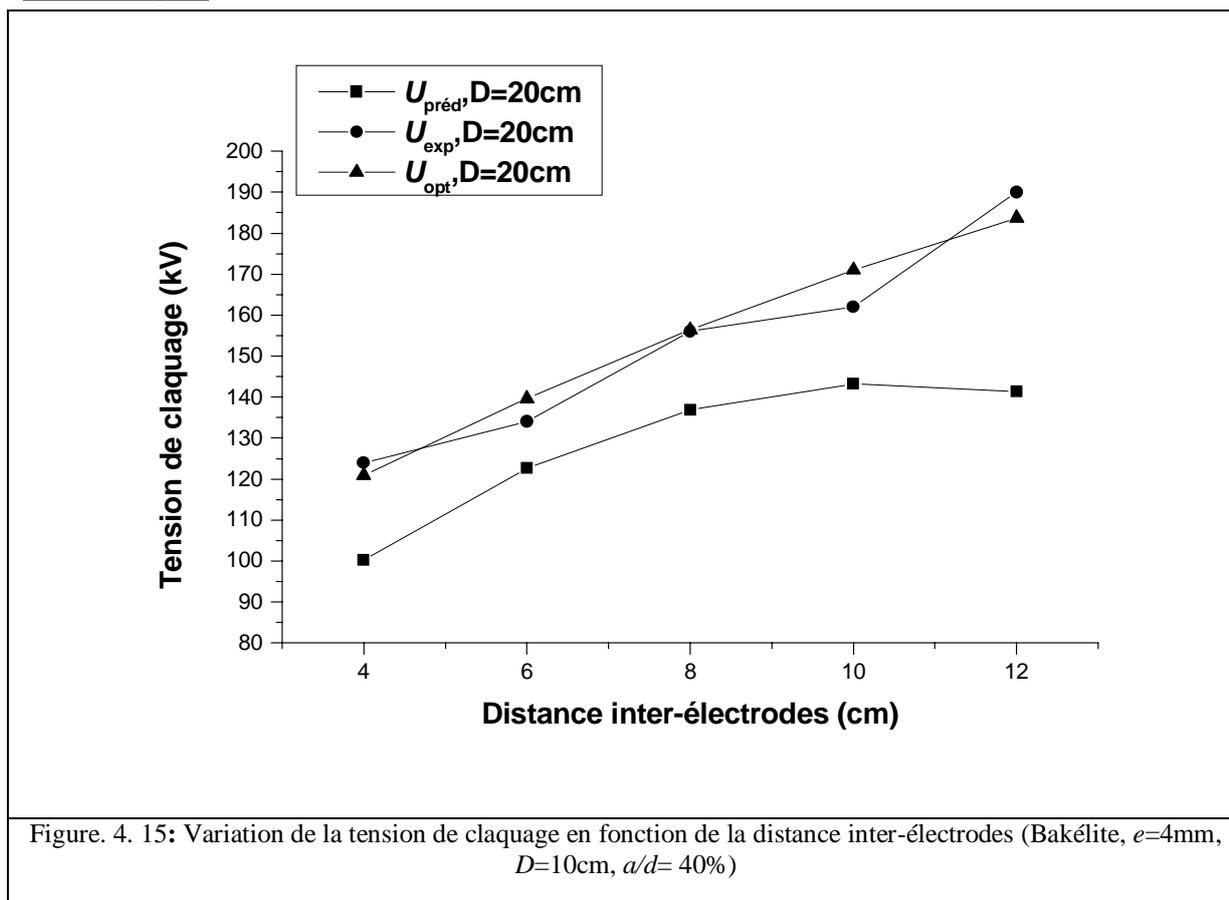
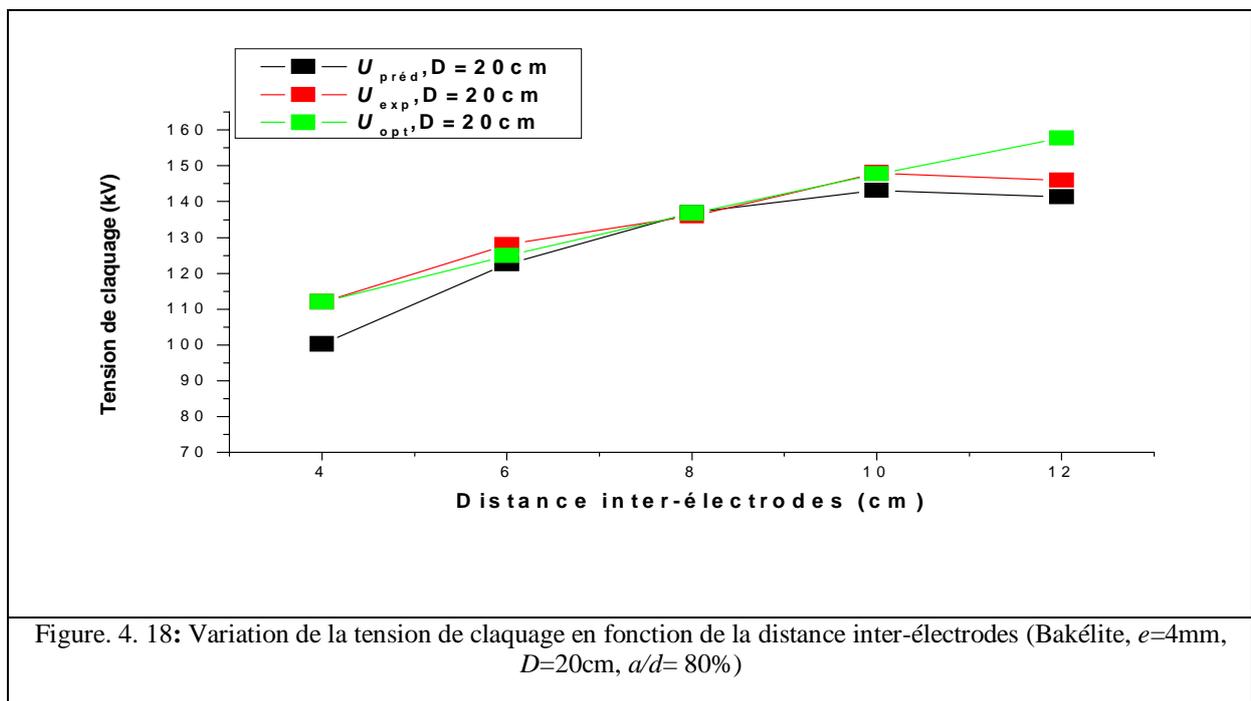
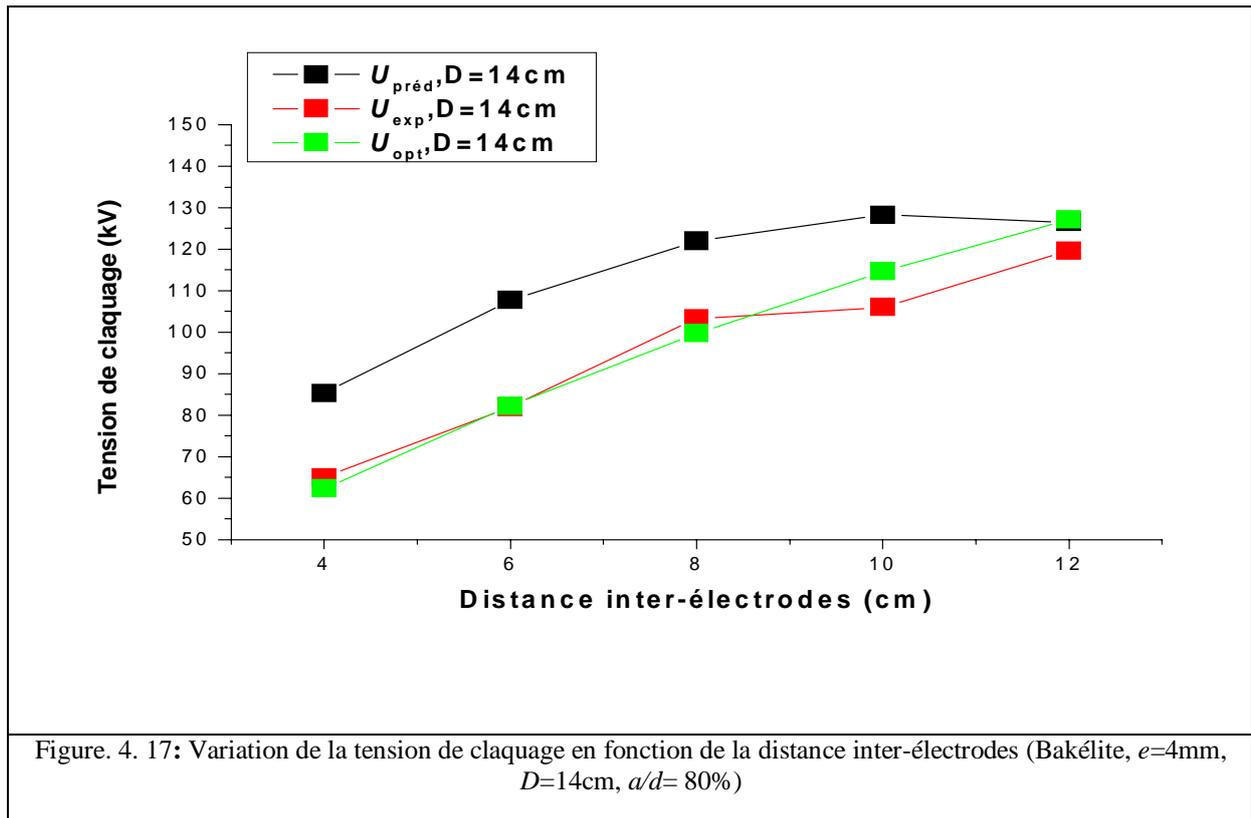


Figure. 4. 14: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes (Bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d= 40\%$)





4.3 Rigidité diélectrique

4.3.1 Coefficients du modèle de la barrière en Presspahn d'épaisseur 2mm

4.3.1.1 Discussions des résultats

Le Tableau (4.13) donne les coefficients et les erreurs du modèle avant et après optimisation.

Chapitre 4 Optimisation par chauve-souris des coefficients mathématiques des modèles mathématiques

Tableau. 4. 13: Optimisation des coefficients du modèle empirique de la rigidité diélectrique d'une barrière en Presspahn d'épaisseurs 2mm à la position 40%.

Coefficients du modèle polynomial					Erreur relative moyenne et Ecart type (%)					
b_i	Avant optimisation	Après optimisation			Avant optimisation			Après optimisation		
		D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm
b_0	11,57	11,46	15	11,7	3,8	4,74	11,83			7,71
b_1	-4,82	-3,9	-3,9	-4,7						
b_2	-1,32	-0,7	-0,06	-3,7	3,43	8,15	4,69			4,14
b_{11}	-0,66	-0,7	-0,8	-0,7						
b_{22}	2,44	1,1	1,5	3,15						
b_{33}	1,18	1,01	1,09	1,01						
b_{12}	0,65	0,99	0,99	0,99						

Il découle de ce qui précède que l'erreur relative moyenne pour la barrière de diamètre 20cm en Presspahn à la position 40%, passe de **11,83** à **7,71%**, La diminution de l'erreur est non significative et dépasse les 5% (voir Tableau 4.13). En augmentant la position relative $a/d = 80%$, de la même barrière et d'après le Tableau (4.15). Une diminution significative bien remarquée de l'erreur moyenne de **13,61** à **5,93%** pour la barrière de diamètre 20cm, tandis qu'aux deux barrières des diamètres 10 et 14cm, l'algorithme BAT a convergé de **7,43** à **10,51%** pour $D=10$ cm et de **7,62** à **8,4%** pour $D=14$ cm.

Tableau. 4. 14: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites pour une barrière en Presspahn d'épaisseurs 2mm à la position $a/d=40%$.

Nature	Presspahn, e=2mm, a/d=40%														
	10					14					20				
D(cm)	E_{pred}	E_{exp}	E_{opt}	K_{plan}	$K_{Bat}\%$	E_{pred}	E_{exp}	E_{opt}	K_{plan}	$K_{Bat}\%$	E_{pred}	E_{exp}	E_{opt}	K_{plan}	$K_{Bat}\%$
4	21,11	21,54		1,95		19,79	20,04		1,2		18,47	20,2	20,97	8,55	3,81
6	16,54	15,11		9,5		15,55	15,86		1,92		14,56	17,75	17,18	17,95	3,18
8	13,19	13,08		0,85		12,53	12,43		0,76		11,86	12,85	14,33	7,65	11,55
10	11,06	10,6		4,4		10,73	13,3		19,3		10,39	12,35	12,44	15,79	0,76
12	10,16	10,4		2,31		10,15	10,2		0,5		10,15	11,18	11,49	9,2	2,85
$K_{mov}\%$				3,8					4,74					11,83	7,71
E.type				3,43					8,15					4,69	4,14

Tableau. 4. 15: Optimisation des coefficients du modèle empirique de la rigidité diélectrique d'une barrière en Presspahn d'épaisseurs 2mm à la position 80%.

Coefficients du modèle polynomial					Erreur relative moyenne et Ecart type (%)					
b_i	Avant optimisation	Après optimisation			Avant optimisation			Après optimisation		
		D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm
b_0	11,57	11,75	12,99	14,45	7,43	7,62	13,61	10,51	8,4	5,93
b_1	-4,82	-3,96	-2,95	-5,2						
b_2	-1,32	-3,62	-3,22	-3,62	5	4,38	4,52	10,43	10,31	7,34
b_{11}	-0,66	-0,01	-0,01	-0,01						
b_{22}	2,44	2,45	2,42	2,45						
b_{33}	1,18	1	1	1,01						
b_{12}	0,65	1	0,55	1						

Tableau. 4. 16: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites pour une barrière en Presspahn d'épaisseurs 2mm à la position $a/d=80%$.

Nature	Presspahn, e= 2mm, a/d=80%														
	10					14					20				
D(cm)	E_{pred}	E_{exp}	E_{opt}	K_{plan}	$K_{Bat}\%$	E_{pred}	E_{exp}	E_{opt}	K_{plan}	$K_{Bat}\%$	E_{pred}	E_{exp}	E_{opt}	K_{plan}	$K_{Bat}\%$
4	19,79	20	14,65	1	24,87	18,47	19,5	16,25	5,24	16,65	17,15	18,95	18,95	9,49	0,02
6	15,22	13,3	13,32	14,42	0,74	14,23	13,22	14,53	7,64	9,89	13,24	16,61	16,61	20,28	2,13
8	11,87	11,2	11,98	5,94	11,93	11,21	10,7	12,8	4,7	19,56	10,54	12,39	14,26	14,89	15,06
10	9,74	9,2	10,64	5,93	4	9,41	11,1	11,07	15,2	0,27	9	10,56	11,91	14	12,72
12	8,84	9,8	9,3	9,83	0,35	8,83	9,33	9,33	5,33	0	8,83	9,73	9,55	9,3	1,88
$K_{mov}\%$				7,43	10,51				7,62	8,4				13,61	5,93
E.type				5	10,43				4,38	10,31				4,52	7,34

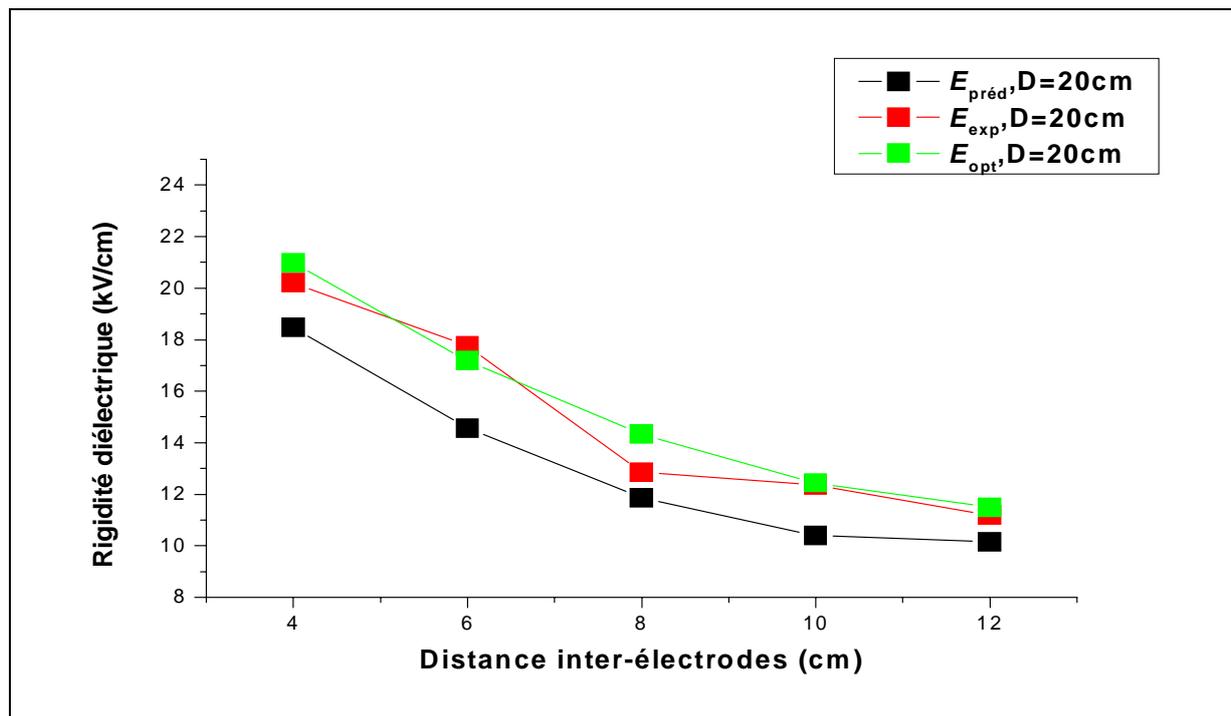


Figure. 4.19: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Presspahn $e=2$ mm, $D=20$ cm, $a/d=40\%$)

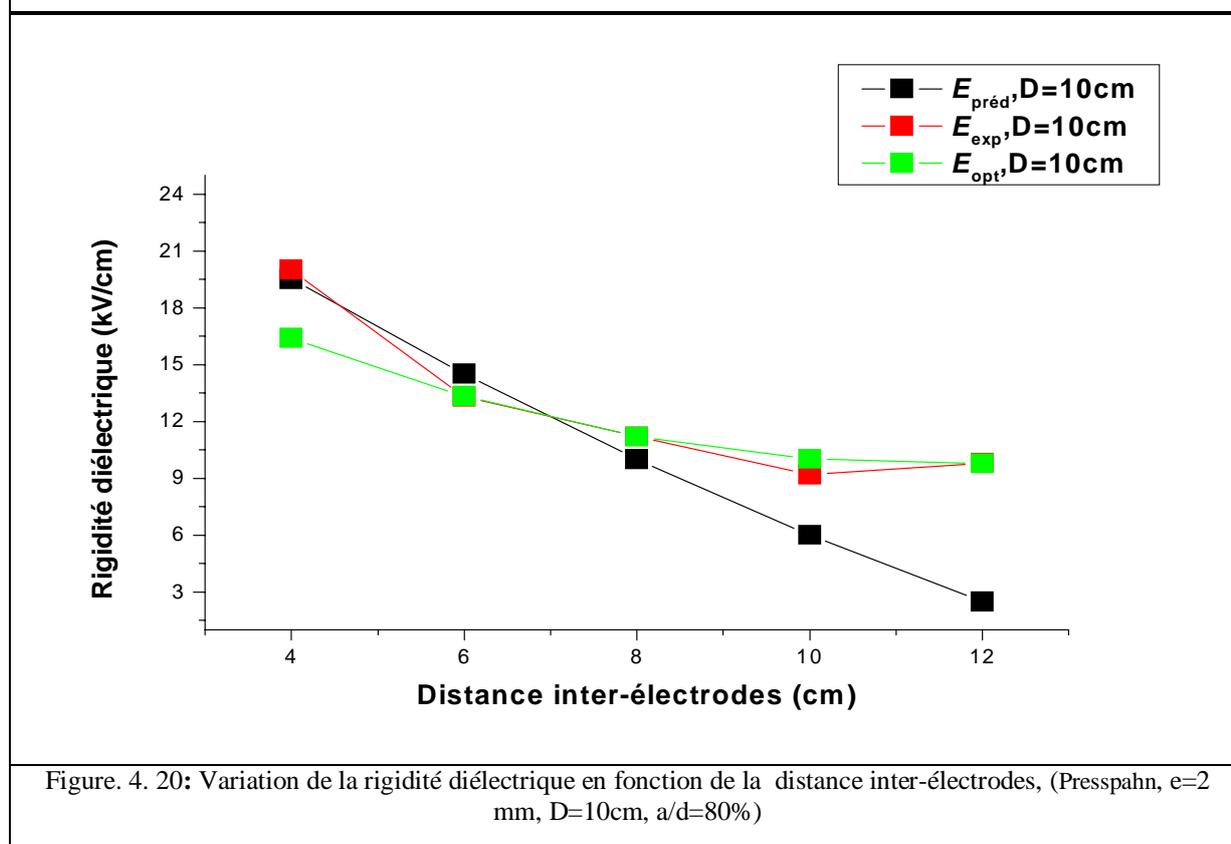
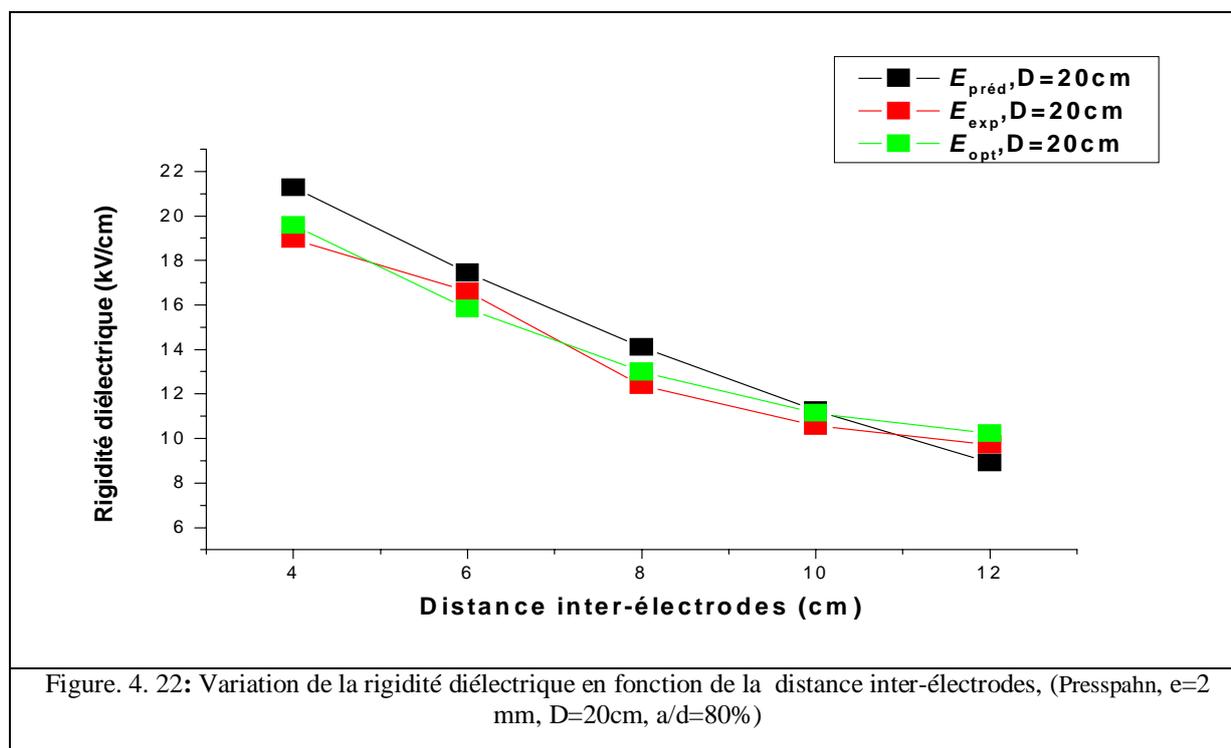
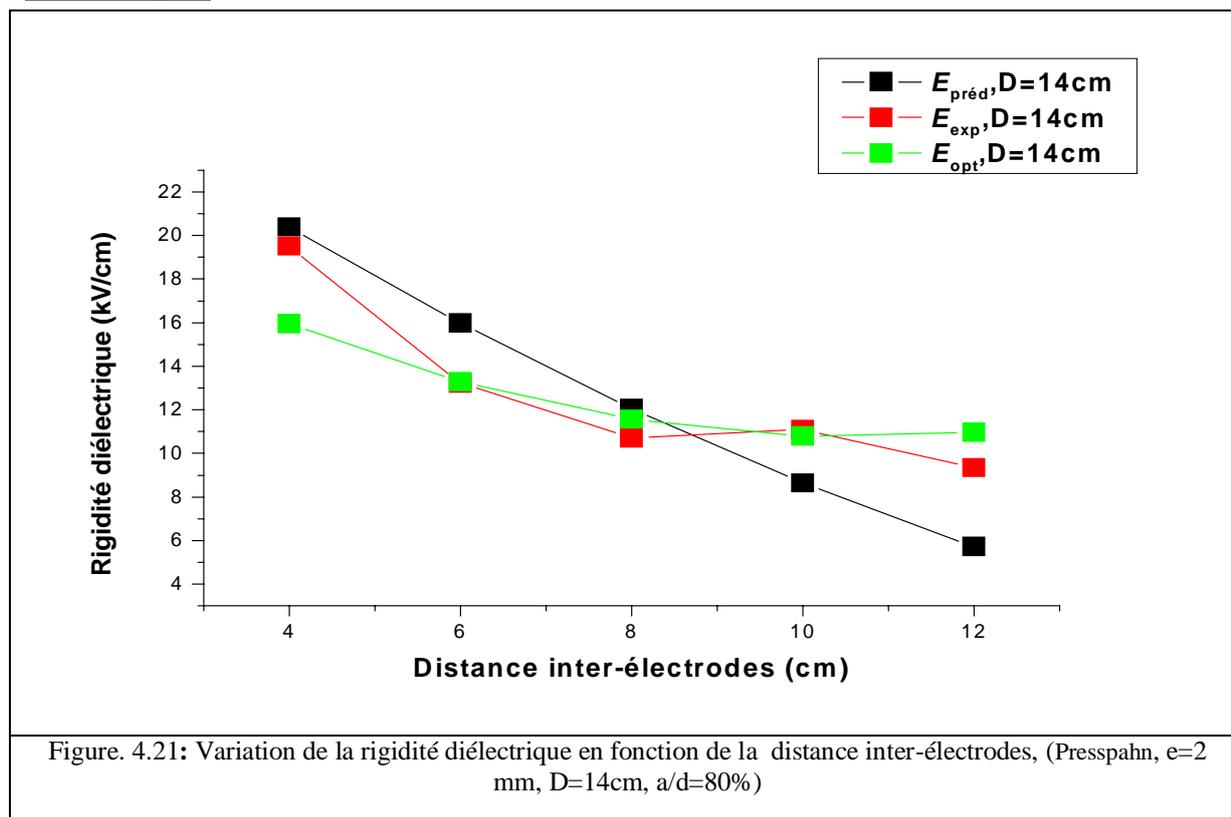


Figure. 4. 20: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Presspahn, $e=2$ mm, $D=10$ cm, $a/d=80\%$)



4.3.2 Coefficients du modèle de la barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm

4.3.2.1 Discussions des résultats

Nous constatons la grande influence des coefficients de BAT sur le modèle de la rigidité diélectrique (Equation 3.8). La tâche de l'optimisation est faite pour les barrières de diamètres

Chapitre 4 Optimisation par chauve-souris des coefficients mathématiques des modèles mathématiques

10,14 et 20cm respectivement. A la position 40% l'erreur est passé de **36.18** à **5.56%**, de **18.02** à **6%** et de **28.3** vers **4.5%**, trois valeurs comprises dans la limite de l'erreur considérée par DOE (5%).

Tableau. 4. 17: Optimisation des coefficients du modèle empirique de la rigidité diélectrique d'une barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm à la position **40%**.

Coefficients du modèle polynomial					Erreur relative moyenne et Ecart type (%)					
b_i	Avant optimisation	Après optimisation			Avant optimisation			Après optimisation		
		D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm
b_0	12,5006	10,89	11,89	12,7	36,18	18,02	28,3	5,56	6	4,5
b_1	-7,3422	-3,08	-4	-4						
b_2	-2,9128	-2,68	-2,68	-2,68	11,67	2,38	13,16	7,94	5,11	6,16
b_{11}	2,0474	0,99	0,79	0,79						
b_{22}	0,9924	2,99	2,72	2,72						
b_{33}	4,0824	0,01	0,1	0,1						
b_{12}	1,1606	0,99	11,89	11,89						

Tableau.4. 18: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites pour une barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm à la position **a/d=40%**.

Nature	Bakélite, e= 4mm, a/d=40%														
D(cm)	10					14					20				
d(cm)	E_{pred}	E_{exp}	E_{opt}	K_{plan}	$K_{Bat}\%$	E_{pred}	E_{exp}	E_{opt}	K_{plan}	$K_{Bat}\%$	E_{pred}	E_{exp}	E_{opt}	K_{plan}	$K_{Bat}\%$
4	28,25	21,54	17,55	31,18	18,51	24,17	20,04	19,19	20,63	19,19	28,25	20,2	20,1	39,83	0,5
6	22,76	15,11	15,02	50,63	0,57	18,67	15,86	16,35	17,76	16,35	22,76	17,75	17,26	28,22	2,73
8	18,28	13,08	12,98	39,78	0,72	14,2	12,43	13,91	14,21	13,91	18,28	12,85	14,82	42,27	15,29
10	14,83	10,6	11,44	39,98	7,99	10,75	13,3	11,86	19,13	11,86	14,83	12,35	12,77	20,14	3,4
12	12,41	10,4	10,4	19,32	1,7	8,33	10,2	10,2	18,39	10,2	12,41	11,18	11,11	11,02	0,58
$K_{mov}\%$				36,18	5,56				18,02	6				28,3	4,5
E.type				11,67	7,94				2,38	5,11				13,16	6,16

Tableau. 4.19: Optimisation des coefficients du modèle empirique de la rigidité diélectrique d'une barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm à la position **80%**.

Coefficients du modèle polynomial					Erreur relative moyenne et Ecart type (%)					
b_i	Avant optimisation	Après optimisation			Avant optimisation			Après optimisation		
		D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm	D=10cm	D=14cm	D=20cm
b_0	12,5006	12	12,49	13,46	29,51	15,4	19,09	7,77	7,69	5,16
b_1	-7,3422	-3,95	-4	-6,06						
b_2	-2,9128	-2,84	-2,8	-2,8812	14,49	11,46	7,04	8,47	6,09	3,78
b_{11}	2,0474	0,99	0,99	0,99						
b_{22}	0,9924	2,95	2,99	4,99						
b_{33}	4,0824	0,01	0,07	0,01						
b_{12}	1,1606	0,99	0,99	0,99						

Tableau.4. 20: Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites pour une barrière en Bakélite d'épaisseur 4mm à la position **a/d=80%**.

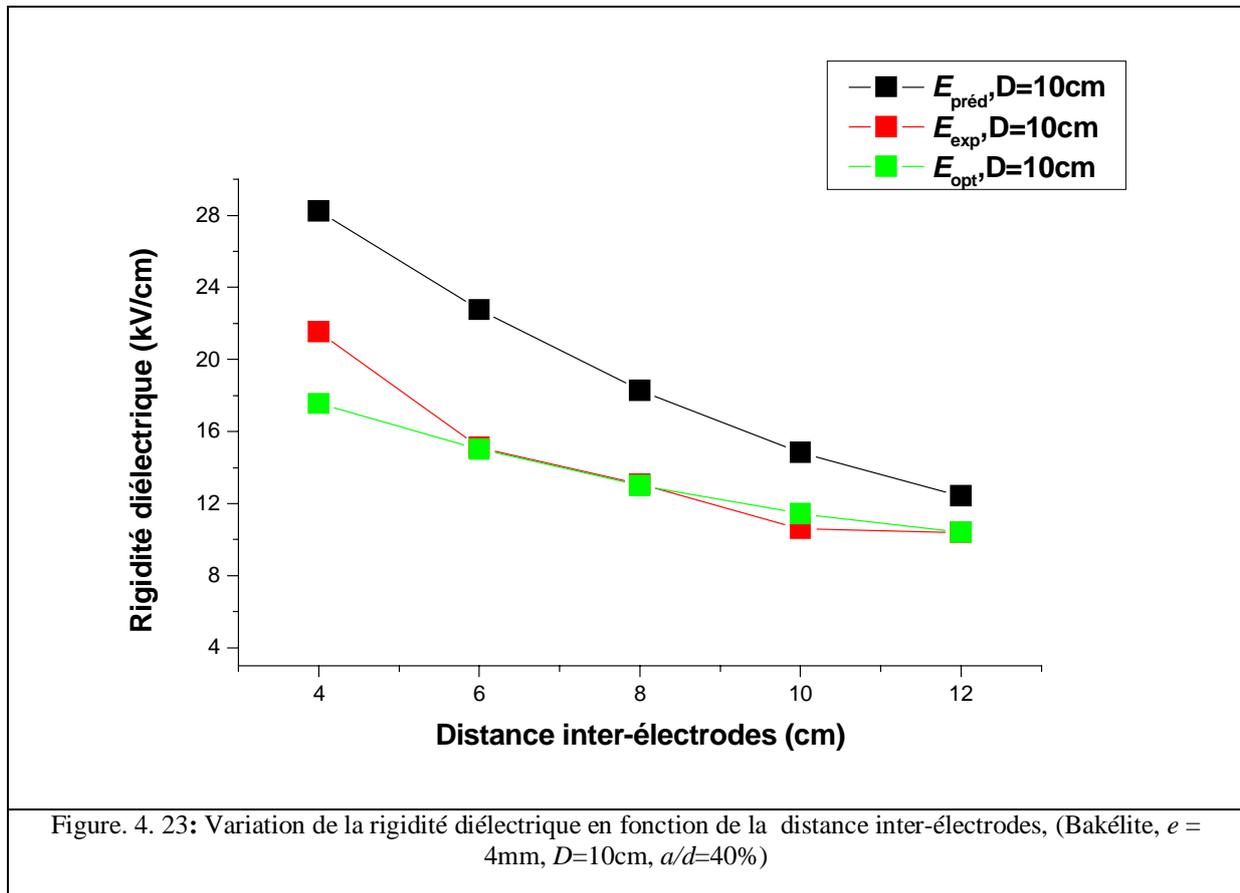
Nature	Bakélite, e=4mm, a/d=80%														
D(cm)	10					14					20				
d(cm)	E_{pred}	E_{exp}	E_{opt}	K_{plan}	$K_{Bat}\%$	E_{pred}	E_{exp}	E_{opt}	K_{plan}	$K_{Bat}\%$	E_{pred}	E_{exp}	E_{opt}	K_{plan}	$K_{Bat}\%$
4	24,18	20	15,77	20,92	21,13	20,1	19,5	16,32	3,08	16,24	24,18	18,95	19,83	27,56	4,61
6	19,26	13,3	13,3	44,81	0,01	15,18	13,22	13,83	14,85	4,65	19,26	16,61	16,3	15,99	1,82
8	15,37	11,2	11,32	37,18	1,07	11,29	10,7	11,83	5,46	10,55	15,37	12,39	13,27	24,03	7,11
10	12,5	9,2	9,84	35,93	7,03	8,42	11,1	10,33	24,11	6,91	12,5	10,56	10,74	18,35	1,66
12	10,66	9,8	8,86	8,72	9,61	6,57	9,33	9,32	29,52	0,11	10,66	9,73	8,7	9,49	10,61
$K_{mov}\%$				29,51	7,77				15,4	7,69				19,09	5,16
E.type				14,49	8,47				11,46	6,09				7,04	3,78

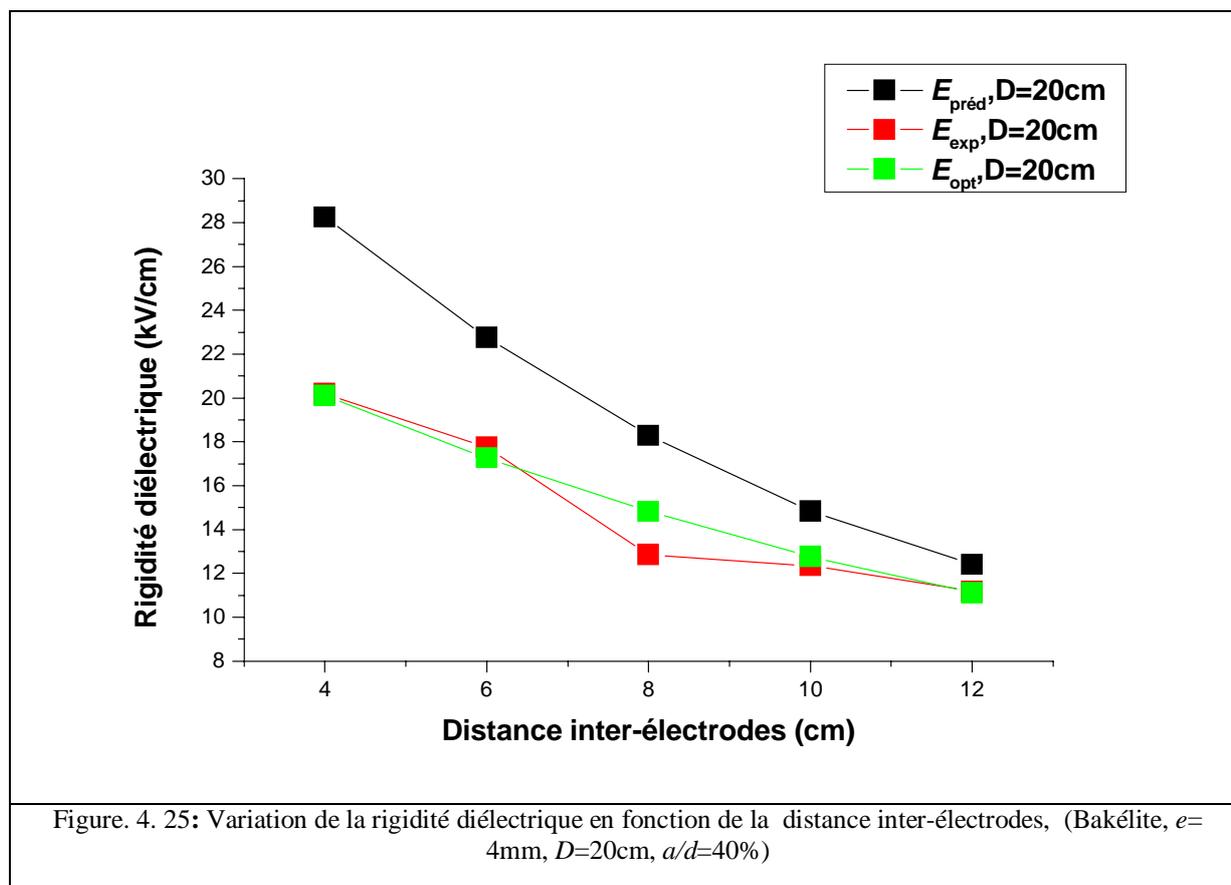
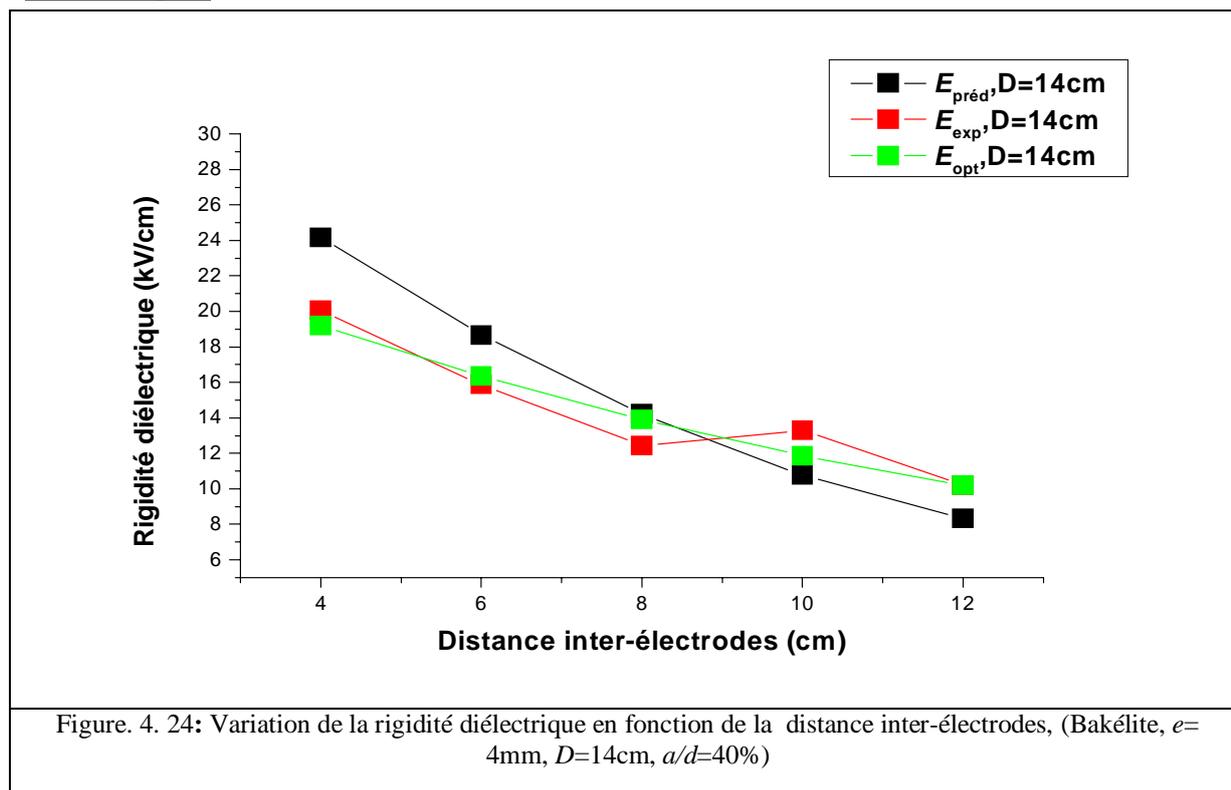
En augmentant la position relative de la barrière à 80%, nous constatons que l'erreur minimale passe de **29,51** à **7,77%** pour le diamètre 10cm et de **15,4** à **7,77%** pour la barrière de diamètre 14cm, ces dernières valeurs montrent que l'amélioration attendue de

Chapitre 4 Optimisation par chauve-souris des coefficients mathématiques des modèles mathématiques

l'optimisation est relativement assez bonne. Pour le diamètre de 20cm, l'erreur passe de **19,09** à **5,16%**. Cette diminution de l'erreur moyenne, montre l'efficacité de l'algorithme de chauve-souris.

Les Figures (4.23-4.28), montrent la diminution de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes. On note la même tendance des courbes expérimentales et optimisées. Les erreurs relatives trouvées sont minimales pour les différents diamètres et ce pour les deux distances 6 et 10cm retenues pour la validation.





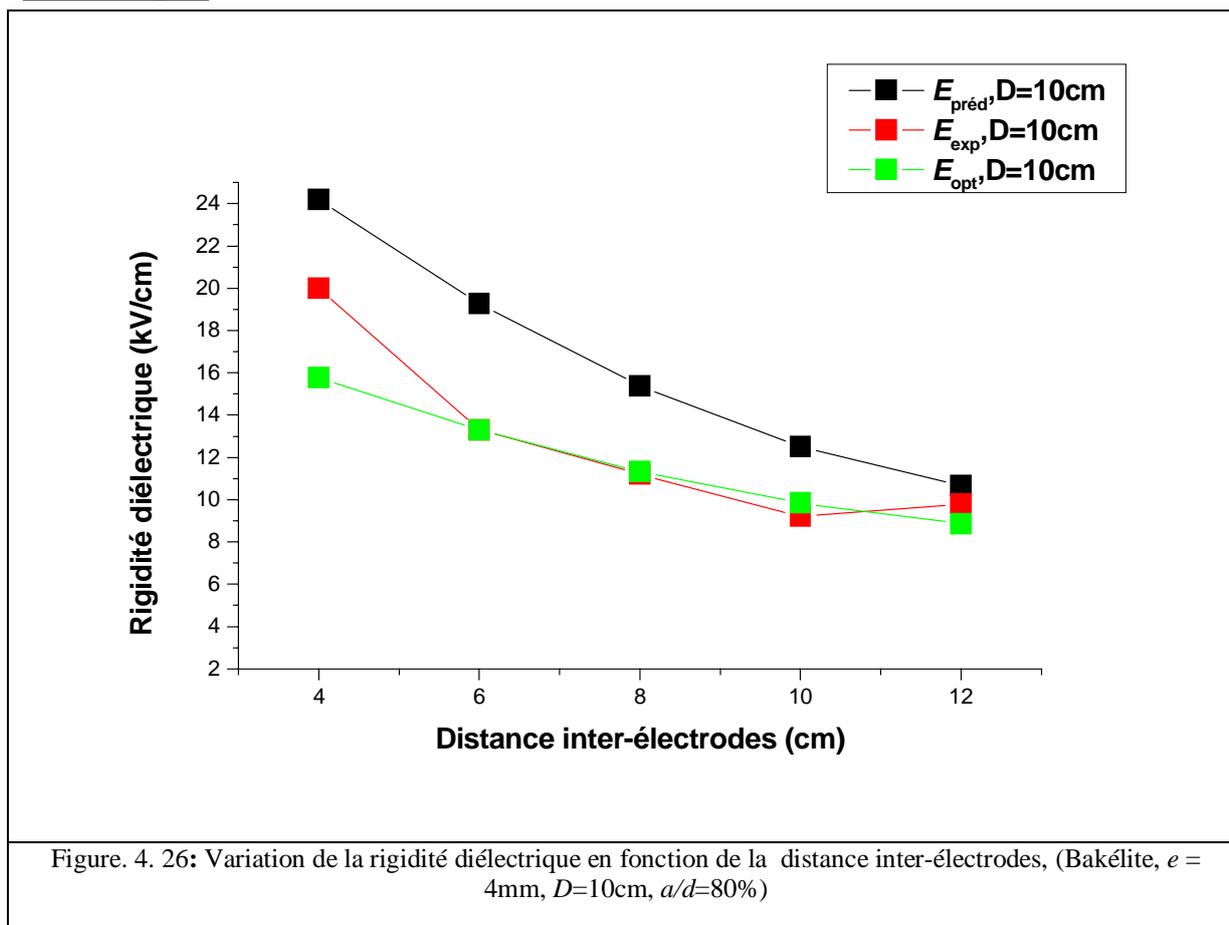


Figure. 4. 26: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, (Bakélite, $e = 4\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a/d=80\%$)

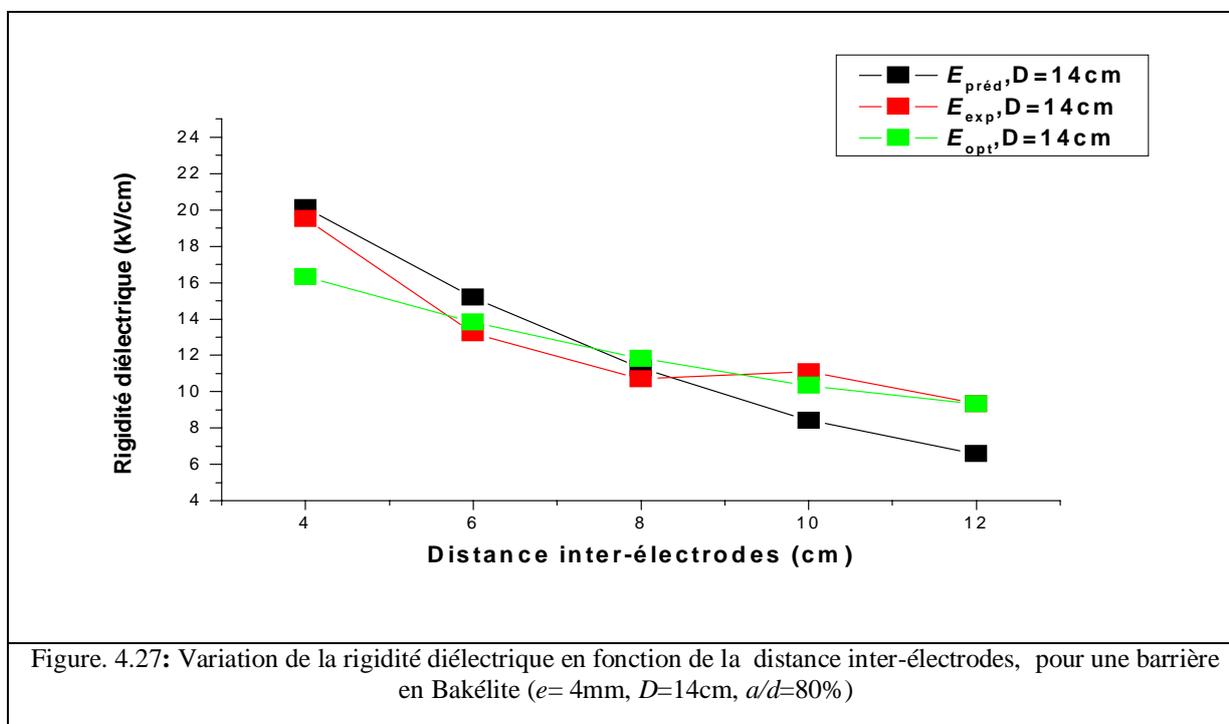


Figure. 4.27: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière en Bakélite ($e = 4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a/d=80\%$)

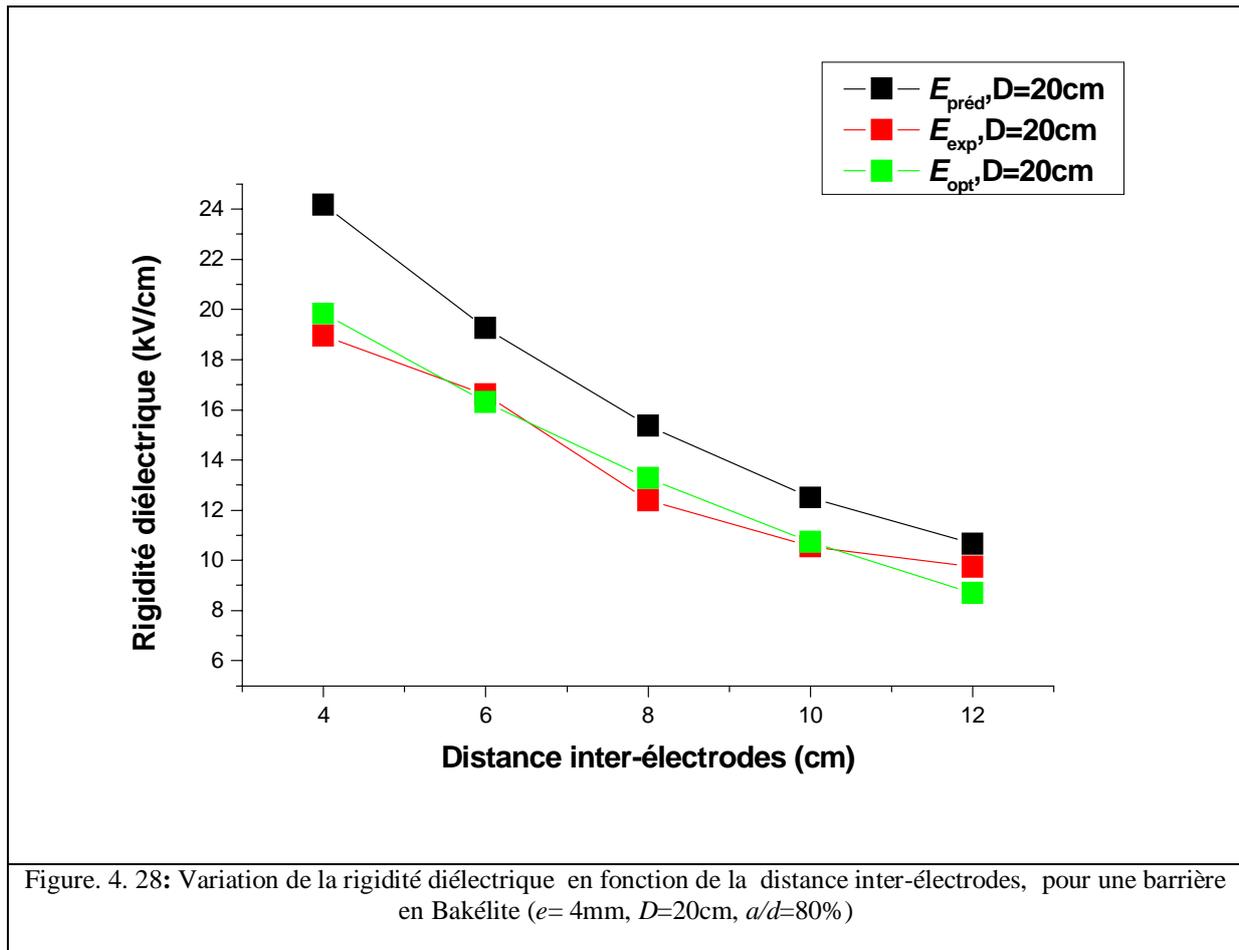


Figure. 4. 28: Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, pour une barrière en Bakélite ($e=4\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $a/d=80\%$)

4.4 Conclusion

Les résultats obtenus montrent que la méthode des plans d'expériences est un outil performant pour la modélisation. Les résultats qu'elle génère sont généralement satisfaisants. Néanmoins, cette approche s'éloigne parfois relativement de l'expérience. C'est pourquoi, nous avons introduit l'algorithme de chauve-souris pour l'optimisation des coefficients des modèles obtenus par la méthode du plan d'expérience « DOE ». Cette dernière utilise une base de données construite pendant une longue période d'essais expérimentaux. On a réussi à développer des modèles mathématiques pour un certain nombre de valeurs des paramètres considérés. Le choix optimal de l'erreur moyenne par DOE qui est 5%, nous oblige à faire la comparaison entre les valeurs prédites et celles trouvées par les essais expérimentaux. Si les résultats obtenus sont généralement bons, il n'en demeure que certains ne le sont pas à cause du problème de convergence. Pour améliorer la qualité de notre modélisation, l'introduction de l'algorithme BAT s'avère d'une très grande utilité. Les résultats obtenus grâce à cet algorithme sont très satisfaisants et les erreurs relatives moyennes trouvées sont réduites. Notons enfin, que le choix des plages de variation des coefficients à optimiser (les limites inférieure et supérieure) reste compliqué à réaliser.

Conclusion générale

L'idée de base de ce travail est la modélisation de la tension de claquage et la rigidité diélectrique par la méthode des plans d'expériences, c'est un outil performant pour réduire le nombre d'essai. A la base des résultats expérimentaux réalisés pendant une longue période, nous avons pensé à transformer cette grande base de données à des modèles mathématiques, donnant une fonction sous forme $y=f(x)$, pour déterminer les deux sorties citées avant en fonction de paramètres physiques et géométriques, afin de comparer nos résultats prédits à ceux déjà réalisés expérimentalement. Le domaine de variation de chaque paramètre (d , a/d , D et e) est limité par trois niveaux codés (niveau bas, niveau moyen et niveau haut). Le nombre d'essai est en fonction du nombre des paramètres étudiés, la modélisation des réponses s'est portée sur le plan composite centré (CCF). Pour ce faire, on a développé un code Matlab pour définir le vecteur coefficient de ce dernier, en se basant sur la formulation de moindres carrés. Une étude statistique fait appel à calculer les coefficients de détermination pour affirmer que les modèles élaborés permettent de calculer les sorties prédites s'ils sont proches de l'unité. Une étude graphique consolide bien l'étude statistique, si le nuage de points des résultats expérimentaux et prédites est bien aligné sur la droite d'adéquation ($y=x$). L'erreur relative calculée entre les réponses prédites et expérimentales doit être inférieure ou égale à 5%, une valeur référence par DOE.

Les résultats obtenus montrent que la méthode des plans d'expériences est un outil performant pour la modélisation. Les résultats qu'elle génère sont généralement satisfaisants. Néanmoins, cette approche s'éloigne parfois relativement de l'expérience. C'est pourquoi, nous avons introduit l'algorithme de chauves-souris pour l'optimisation des coefficients des modèles obtenus par la méthode du plan d'expérience, dans le but de minimiser toutes les erreurs qui sont supérieures à 5%.

Les résultats obtenus sont très satisfaisants, et donnent une idée sur la planification des expériences par DOE, pour faire le minimum d'essai, en limitant le coût et le temps.

Enfin, nous espérons que ce travail sera d'une aide appréciable à ceux qui veulent poursuivre cette étude, avec d'autres méthodes d'optimisation, telles que, l'algorithme de luciole (FF), colonie des abeilles (BCO), l'algorithme de fourmis (ACO), Particle Swarm Optimization (PSO), Harmony Search (HS), Cuckoo Search (CS)...., et de faire une étude comparative par ces algorithmes.

Les perspectives dégagées de cette étude sont diverses. Nous pensons qu'il serait très intéressant de poursuivre cette étude afin de modéliser le courant de pré-claquage, l'impédance de système, la quantité de charge et l'énergie du système.

BIBLIOGRAPHIES

- [1] **A. Bourgeois**, "Etude du phénomène d'électrisation par écoulement sur les cartons des transformateurs de puissance," Thèse de doctorat, INPG. Grenoble, février 2007.
- [2] **F.Guerbas**, "Etude de la génération des bulles gazeuses dans les diélectriques liquides et leur transition en streamer," Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Mai 1994.
- [3] **M.Zitouni**, "Influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique de l'huile de transformateur dans l'intervalle pointe-plan sous tension alternative," Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, juin2010.
- [4] **J. Perret and M.Paris**, "Les huiles Silicones pour transformateurs". E.D.F. Bulletin des études et recherche Série B, Réseaux électriques, Matériels électriques, n°2, pp.5-13,1987.
- [5] **F.M. Cluskey, A. Denat. and O.Lesaint.**, "Breakdown and pre breakdown phenomena in liquids dielectrics under positive impulse voltage," *Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 1, no. 3, pp. 377–382, 1984.
- [6] **R. Fournié**, "Les isolants en électrotechnique, concepts et théories". Editions Eyrolles, Paris 1986.
- [7] **R. Kattan, A. Denat and N. Bonifaci**. "Formation of bubbles in non polar liquids initiated by current pulses," IEEE transaction on Electr. Insul., Vol.26,N.4, pp. 656–662, August1991.
- [8] **S. Abdi**, "Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile de transformateur,"Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2002.
- [9] **I. Fofana, H. Borsi. and E.Gockenbach**. "Fundamental Investigations on Some Transformer Liquids under Various Outdoor Conditions," IEEE Transactions on *Dielectr.Insul.*, vol. 8, pp. 1040–1047, Dec 2001.
- [10] **A. Zouaghi**, "Etude de l'influence des barrières isolantes sur la tenue diélectriques d'intervalle d'huile en chocs de foudre et en continu," Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, décembre 1997.
- [11] **N. Berger**, "liquides isolants en électrotechnique-présentation générale: Caractéristiques des produits Technique de l'ingénieur, D2471, 2002.20p
- [12] **B. Moula**, "Comportement de l'huile de transformateur « Borak 22," Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2007.
- [13] **E. Marx**, "Air dielectric strength in non uniform fields," E.T.Z, H33, pp. 1161, 1930.
- [14] **F. Guerbas, A. Boubakeur, and A. Beroual**, "Influence d' une barrière isolante sur la Charge de préclaquage de l'huile de transformateur sous tension alternative," *8ème Conférence Nationale sur la Haute Tension, numéro spécial de l'Algerian Journal Of Technology, AJOT*, 2011, pp. 165–169.
- [15] **F.Guerbas**, "Influence des Barrières sur la Rigidité Diélectrique de l'huileMinirale," Thèse de Doctorat, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin2011.
- [16] **S.A. Studniarz**, "The Effect of barriers in the low field region of non uniform fields on oil breakdown",*IEEE,IEEE*, Power apparatus and systems, vol. PAS-100, N°5, pp. 1568–1573, 1981.
- [17] **A. Beroual, A.Boubakeur**, "Influence of barriers on the lightning and switching impulse strength of mean air gaps in pointe-plane arrangements," *Electr.Insul*, vol. 26 N°6, pp. 1131-1139,Dec 1991.
- [17] **F.V. Topalis, I.A, Stathopoulos**, "Barrier effect on Electrical braekdown air gaps: a theoretical approach," International Symposium on high voltage Engineering 9thISH, session 2147, pp.1-4, Graz 1995.
- [18] **L.Ming, M. Leijon and T. Bengtsson**. "Foctors influenceing barrier effecta in air-gaps," 9th ISH, International Symposium on High Voltage Engineering, session 2168, pp.1-4, , Graz, Austria 1995
- [19] **E. Marx**, "Air dielectric strength in non uniform fields," E.T.Z, H33, pp. 1161, 1930.
- [20] **N.N. Tikhodeev**, "Effect of an incomplete barrier in electrical discharge; new experiments and advances in theory," *Sov. Phys. Tech*, Vol 2,pp. 385.1957.
- [21] **M.P.Verma**, "Electric field lines of rod-barrier-plane in positive impulse voltage," *Wiss.Zeit*, H1,pp. 111, 1962.
- [22] **J.Pilling**, "Dielectric barrier in uniform field," *Elektrie*, 23, H11,pp. 463, 1969.
- [23] **M.Awad**, "Disruption d'un intervalle d'air pointe-plan avec barrière polluée," *Elektrie*, H10,vol. 29, pp. 559, 1975.
- [24] **A. Boubakeur**, "Influence des barrières sur la tension de décharge disruptive des moyens intervalles d'air pointe-plan," Thèse de Doctorat, E.P. Varsovie, Pologne 1979.
- [25] **S. Mouhoubi**, "Etude de l'influence d'une barrière dans un intervalle pointe – plan, par la mesure de la tension disruptive, du champ électrique et des décharges partielles,"Thèse de Doctorat, Département d'électrotechnique, ENP, Alger, 2008.
- [26] **A. Boubakeur**, "Influence des barrieres sur l'amorçage des moyens intervalles d'air pointe-plan', *Rozpr. Elektrotechniczne*, vol. 27, no. 3, pp. 729–744, 1981.

- [27] **A.Boubakeur, L. Mokhnache** "Potentiel d'une barrière conductrice flottante dans un intervalle d'air pointe-plan," *CNHT*, 1995.
- [28] **L. Ming, T. Bengtsson**. "Barrier effects air insulates systems under DC voltage," *ISH*, session 4303, 8thpp. 1–4, Japan1993.
- [29] **Z. You. BIN**, "The influence of the electrode material of rod-rod gap with tip on its DC breakdown voltage", International Symposium on High Voltage Engineering (9th ISH), session 2135, pp.1-2, Graz 1995.
- [30] **N.Sokolova, A. N. Zhukov**, "Influence of barrier surface proprieties on the discharge in a narrow gaz gap," in *9 ISH*, pp. 1–4.
- [31] **S. Chakravorti, M.C. Siddagangapa**, "Effect of charge accumulation on the electric field distribution along spacersurfaces", International Symposium on High Voltage Engineering (9th ISH), session 8352, PP.1-4, Graz.1995.
- [32] **F. V Topalis, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos**, "Insulation properties of composite dielectric arrangements," *Int. J. Power Energy Syst.*, vol. 22, no. 3, pp. 146–149, 2002.
- [33] **A. Beroual and A. Zouaghi**, "Barrier effect on the prebreakdown and breakdown phenomena in long oil gaps," in *Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, 1996, ICDL'96., 12th International Conference on*, pp. 300–303, 1996.
- [34] **A. Zouaghi and A. Beroual**, "Discharge structure and dielectric strength of long oil gaps in the presence of an insulating barrier," in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1997. IEEE 1997 Annual Report., Conference on*, vol. 2, pp. 660–663, 1997.
- [35] **F. Gillon**, "Modélisation et optimisation par plan d'expériences d'un moteur à commutation électrique," Thèse de doctorat, Université de Lille, 1997.
- [36] "Plan d'expériences." [.Http://www.educnet.education.fr/rnchimie/math/benichou/cours/plan/plan.htm](http://www.educnet.education.fr/rnchimie/math/benichou/cours/plan/plan.htm).
- [37] **B. Wahdame**, "Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combistible par la méthode des plans d'expériences." Thèse de Doctorat, Université de Belfort Montbéliard, 2006
- [38] **Z.Boudaoud**, "*Les plans d'expériences*". Séminaire Université de M'sila, 1997.
- [39] **J.Alexis**, "Pratique industrielle de la méthode TAGHUCHI, les plans d'expériences." AFNOR, 1995
- [40] **Sier**, "Informations et techniques." N° 6, 1993
- [41] **A.Kaoua**, "Détermination de modèles prédictifs des caractéristiques essentielles du béton de la région de M'sila."Mémoire de magister, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2008
- [42] **M. C. Sado, G. Sado**, "Les plans d'expériences de l'expérimentation à l'assurance." AFNOR, 1991
- [43] **J.Goupy**, "*La méthode des plans d'experiences*". DUNOD 2001.
- [44] **A. Tilmatine, M.Mailescu, M.Luga. et al**, "A linear interaction optimization model using taguchi's experimental desing technique," *IEEE. Ind.APPL.Mag*, vol. 10, no. 10, pp. 19–25, 2004.
- [45] **J. Foucher**, "Les plans d'expériences Pratique de la régression Linéaire pour le réglage de commandes à base de logique floue," PhD thesis, Institut National Polytechnique, Toulouse, France, 2006.
- [46] **M.Mailescu, A.Samuila et al**, "Computer- assisted experimental design for the optimization of electrostatic separation processes," *IEEE. Tans.ind.APPL*, vol. 38, no. 5, pp. 1174–1181, 2002.
- [47] **P.Saugmin**, "Staistical Design of experiments and Analysis on Gate Poly-Silicon Critical Dimension," *IEEE.Trans.Secand.Manufact*, vol. 17, no. 3, pp. 362–374, 2004.
- [48] **Li. Wang , K. M. X**. "Research on SID-IIs Rib Characteristic Based on DOE," in *EMEIT, Harbin, China*, 2011, pp. 12–14.
- [49] **L. Dascalescu, K.Medles S. Das. et al**, "Using Desing of experiments and Virtual Instrumentation to Evaluate the Tribo charging of Pulvelurent Materials in Compressed-Air Devices," *IEEE. Trans. Ind. APPL*, vol. 44, no. 1, pp. 3–8, 2008.
- [50] **K. Sandrine**, "Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt." PhD thesis, Limoges, France, 2004
- [51] **S.Vivier, F.Giillon, S. Briset, et al**, "Optimization with Experimental design: An approech Using Taguchi's Methodology and Finite Eliment Simulations," *IEEE. Trans on Magnitics*, vol. 37, no. 5, pp. 3530–3535, 2001.
- [52] **F.Gillon, P. B. S.Vivier**, "Optimization techniques Derived from Experimental desing method and their Application to desing of Brushless Direct Motor," *IEEE. Trans on Magnitics*, vol. 37, no. 5, pp. 3622–3626, 2001.
- [53] **L .Erikson., E. Johansson,E.Kettanah et al** "Desing of Experiments, principles and application" *Umitrics Academy,2000*.
- [54] **M. Zitouni, F. Guerbas, L. Boukezzi, and A. Boubakeur**, "Modelling by design of experiments method of the AC breakdown voltage of transformer oil point–plane gaps with insulating barrier," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 1, pp. 232–239, 2016.
- [55] **G.H.Liu, H. Y. Huang, S. M. Wang and Z. X. Chen**. "AN Improved Bat Algorithm with Doppler Effect for Stochastic Optimization," *INJ dijtal content Tech .APPL*, vol. 6, no. 21, pp. 326–336, 2012.

- [56] **E.Cuevas, M. cienfuego.** “A swarm Optimization algorithm inspired in the behavior of the social-spider,” *Appl. Expert Syst. with*, vol. 41, pp. 412–425, 2014.
- [57] **X.S.Yang,** “A new metaheuristic bat- inspired algorithm,” *MISCO*, vol. 284, pp. 65–74, 2010.
- [58] **X.S.Yang,** “Bat algorithm: Literature review and application,” *I.N.J.of Bio-Inspired Comput.*, vol. 5, no. 3, pp. 141–149, 2013.
- [59] **X.S.yang,** “Nature Inspired optimization algorithm,” *Elsevier*, 2014.
- [60] **A. H. Gandomi and X. S. Yang**“Chaotic bat algorithm,” *J.Comp.S*, vol. 5, pp. 224–232, 2014.
- [61] **J.W.Zhang and G. C. W.** “Image matching using a bat algorithm with mutation,” *APP.Mechanics Mater.*, vol. 203, pp. 141–149, 2012.
- [62] **G. H. Liu, H. Y. Huang, S. M. Wang and Z. X. Chen**“An improved bat algorithm and it’s application in multiple UCAV’s,” *APP.Mechanics Mater.*, vol. 203, pp. 88–93, 2012.
- [63] **T.C. Bora, L.S. Coelho, L. Lebensztajn,** “Anew Meta-heuristic Bat Inspired Classification Approach for Microarray Data,” *Procesia Tech*, vol. 4, pp. 802–806, 2012.
- [64] **X. W. Wang, W. Wang and Y. Wang.** “An adaptative Bat algorithm,” in *PRO of 9th INT.Conf.Inte.C.T.T*, pp. 216–223, 2013.
- [65] **L. L. Li and Y. Q. Zhou,** “A Novel complex- valued bat algorithm,” *N.C..APPL*, 2014.
- [66] **T.C. Bora, L.S. Coelho, L. Lebensztajn**“Bat- Inspired Optimization Approach for the Brushless DC Weel Motor Problem,” *IEEE Tans*, vol. 48, no. 2, pp. 947–950, 2012.
- [67] **A. Beroual and A. Boubakeur,** “Influence of barriers on the lightning and switching impulse strength of mean air gaps in pointe-plane arrangements”, *IEEE Trans. Electr. Insul*, Vol. 20. N°6, pp.1131,1991.
- [68] CEI, “Méthode de détermination de la tension de claquage à fréquence industrielle - Méthode d’essais, Deuxième édition, Novembre 1995 ”
- [69] **R. Myers, D. Montgomery,**“ Response Surface Methodology, Process and product Optimization Using designed Experiments,Wiley,1995.
- [70] **L.Kebbabi,** “Caractérisation des décharges glissantes se propageant aux interfaces liquide/solide sous différentes formes de tension- relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale.”thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, Mars 2006.
- [71] **A.Boubakeur,** “Influence des barrières sur l’amorçage des des moyens intervalles d’air pointe-plan,” *Rozpr. Elektrotechniczne*, vol. 27,z.3, pp. 729–744, 1981.
- [72] **F. Guerbas, M. Zitouni, A. Boubakeur, and A. Beroual,** “Barrier effect on breakdown of point–plane oil gaps under alternating current voltage,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 4, no. 11, pp. 1245–1250, 2010.
- [73] **A.Boubakeur, L.Mokhnache, S.Boukhtache, A.Felliachi,** « Theoretical investigation onbarrier effect on point-plane air gap breakdown voltage based on streamers criterion », *IEE. Science, Measurement and Technology*. Vol.151 , pp.167-174, 2004.
- [74] **A. Rahmani, A. Khechekhouche, A. Mekhaldi, and A. Boubakeur,** “Electrical strength of rod-discontinuous plane air gap under lightning impulse applied voltage using a distributed capacity probe,” *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenemena*, pp. 379–382 , Oct2012.

Travaux scientifiques de l'auteur

- F. Guerbas, A. Boubakeur, **M.Zitouni** et A. Beroul «Effet d'une barrière isolante sur la tension de claquage de l'huile de transformateur dans un système pointe- plan sous tension », 7eme CNHT, Numéro Spécial, Algerian Journal of Technology (AJOT), ISSN 1111-357X, pp. 80-83, Sidi Bel-Abbes, 19-21Avril2009.
- F.Guerbas, **M.Zitouni**, A.Boubakeur and A.Beroul, « Barrier effect on breakdown of point-plane oil gaps alternating current voltage », IET Generation, Transmission & Distribution, Vol.4, Iss. 11, pp. 1245-1250, September 2010.
- F. Guerbas, **M.Zitouni**, A. Boubakeur et al.: 'Barrier diameter effect on the behavior of transformer oil submitted to AC voltage'. Int. Conf. High Voltage Engineering Applications (ICHVE), Shanghai, China, 17–20 September 2012, pp. 570–574.
- **M.Zitouni**, F.Guerbas, A.Boubkeur “Barriers Effect on the Pre-Disruptive Current of Point-Plane Oil Gaps under AC Applied Voltage ” , 7eme CNHT, , Algerian Journal of Technology (AJOT), ISSN 1111-357X, pp. 80-83, Lagaouat, 19-21Avril2014.
- **M.Zitouni**, F.Guerbas, L.Boukezzi et A.Boubkeur “Modelling by design of experiments method of the AC breakdown voltage of transformer oil point-plan gaps with insulating barrier” ,IET Generation, Transmission & Distribution, Vol.735, ISSN. 1751-8678, pp. 1-8, September 2015.

ANNEXE 1:

$\nu\alpha$	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
1	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657
2	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055
13	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947
16	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921
17	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898
18	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878
19	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861
20	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845
21	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831
22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819
23	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807
24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797
25	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787
26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779
27	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771
28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763
29	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756
30	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750