

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

PAR
Boujemâa DANOUI

CARACTÉRISATION DES SIGNATURES DE DÉCHARGES PARTIELLES EN
UTILISANT UNE NOUVELLE GÉNÉRATION DE COUPLEURS PIÉZOÉLECTRIQUES

MONTREAL, LE 14 SEPTEMBRE 2012



Boujemaa Danouj, 2012



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Souheil-Antoine TAHAN, directeur de thèse
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Eric David, codirecteur de thèse
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Christine Tremblay, présidente du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Martin Viens, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Issouf Fofana, membre du jury, examinateur externe
Département des sciences appliquées à l'Université du Québec à Chicoutimi

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 6 SEPTEMBRE 2012

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été effectuée sous la direction des professeurs Souheil-Antoine Tahan et Eric David, tous les deux du Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure. Qu'il me soit permis de leur exprimer mes sincères sentiments de gratitude pour avoir encadré ce travail avec beaucoup de compétences et de sympathies, pour leur rigueur scientifique et leur disponibilité tout au long de ce travail. Je tiens à souligner aussi la patience dont ils ont fait preuve et leurs contributions dans ce document.

De plus, j'aimerais exprimer mes remerciements à Mme Christine Tremblay, professeure au Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure, pour l'honneur qu'elle me fait en acceptant de présider le jury d'examen de cette thèse.

Aussi, je remercie profondément M. Martin Viens, professeur au Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure ainsi que M. Issouf Fofana, professeur au Département des sciences appliquées à l'Université du Québec à Chicoutimi, pour avoir accepté d'examiner ce travail et faire partie du jury.

Je voudrais également remercier M. Drouin Michel et M. Patrick Sheridan, techniciens de l'application technologique et informatique au Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure, pour leur précieuse collaboration dans la réalisation du banc d'essai.

Je désire aussi remercier vivement l'Institut de Matériaux Industriels IMI en particulier le professeur C. K. Jen qui nous ont fourni les capteurs piézoélectriques.

Du côté personnel, je souhaite exprimer mes sentiments de gratitude à tous les membres de ma famille pour leur soutien constant et leurs encouragements depuis le début de ce travail jusqu'à son aboutissement.

CARACTÉRISATION DES SIGNATURES DE DÉCHARGES PARTIELLES EN UTILISANT UNE NOUVELLE GÉNÉRATION DE COUPLEURS PIÉZOÉLECTRIQUES

Boujemaa DANOUJ

RÉSUMÉ

Une problématique importante qui affecte la pérennité des transformateurs de puissance est la détérioration progressive et systématique du système d'isolation par l'action des décharges partielles (DP).

Idéalement, il est opportun d'employer en service des techniques non destructives pour la détection et le diagnostic des défaillances liées aux systèmes d'isolation, dans le but de déterminer si une intervention de maintenance préventive est requise. Ainsi, d'énormes pertes matérielles peuvent être épargnées, tout en améliorant la fiabilité et la disponibilité du système.

En s'appuyant sur une nouvelle génération de capteurs piézoélectriques (High Temperature Ultrasonic Transducers HTUTs), mise récemment au point à l'Institut de Matériaux Industriel (IMI) de Boucherville (Qc., Canada) et qui offre de très bonnes caractéristiques (large bande de réponses fréquentielles, flexible, miniature, économiques, etc.), nous proposons dans cette thèse une investigation sur l'applicabilité de cette technologie à la problématique des décharges partielles.

Ce travail présente une analyse des performances métrologiques de ces capteurs et démontre la cohérence de leurs mesures. De plus, il expose les résultats de validation issus d'une étude comparative avec les mesures d'un système conventionnel et reconnu dans l'industrie. En outre, il présente aussi le potentiel de ces capteurs à localiser le foyer des décharges partielles par émission acoustique.

Mots-clés : Décharges partielles, diélectriques, ondelettes, capteurs piézoélectriques, haute tension.

USING A NEW GENERATION OF PIEZOELECTRIC SENSORS FOR PARTIAL DISCHARGE CHARACTERIZATION

Boujemaa DANOUJ

ABSTRACT

An important issue affecting the sustainability of power transformers is systematic and progressive deterioration of the insulation system by the action of partial discharge.

Ideally, it is appropriate to use on line, non-destructive techniques for detection and diagnosis of failures related to insulation systems, in order to determine whether preventive maintenance action is required. Thus, huge material losses can be saved (spared), while improving reliability and system availability.

Based on a new generation of piezoelectric sensors (High Temperature Ultrasonic Transducers HTUTs), recently developed by the Industrial Materials Institute (IMI) in Boucherville (Qc, Canada) and offers very interesting features (broad band frequency response, flexible, miniature, economic, etc..), we propose in this thesis an investigation on the applicability of this technology to the problematic of partial discharges.

This work presents an analysis of the metrological performance of these sensors and demonstrated empirically the consistency of their measures. It outlines the results of validation from a comparative study with the measures of a standard detection circuit. In addition, it also presents the potential of these sensors to locate partial discharge source position by acoustic emission.

Keywords: Partial Discharges, Insulation, Wavelet, High voltage, Piezoelectric Sensors

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE AUX DÉCHARGES PARTIELLES	5
1.1 Système d'isolation : Diélectrique	5
1.1.1 Permittivité.....	6
1.1.2 Facteur de dissipation	9
1.1.3 Rupture diélectrique.....	10
1.1.3.1 Rupture dans les gaz	13
1.1.3.2 Rupture dans les liquides	14
1.1.3.3 Rupture dans les solides.....	15
1.2 Théories des décharges partielles.....	16
1.2.1 Généralités	16
1.2.2 Mécanisme de Townsend.....	17
1.2.2.1 Ionisation.....	18
1.2.2.2 Premier Coefficient d'ionisation de Townsend	19
1.2.2.3 Coefficient d'attachement.....	22
1.2.2.4 Deuxième coefficient d'ionisation de Townsend	22
1.2.3 Mécanisme de Streamer.....	25
1.2.4 Décharges négatives.....	27
1.2.5 Décharges couronne (<i>Corona Discharge</i>)	27
1.2.6 Champ non-uniforme	28
1.2.6.1 Cavité gazeuse dans un diélectrique solide ou liquide.....	29
1.2.6.2 Effet de pointe.....	33
1.3 Conclusion	34
CHAPITRE 2 PROBLÉMATIQUE INDUSTRIELLE ET ÉTAT DE L'ART POUR LA MESURE DES DÉCHARGES PARTIELLES.....	35
2.1 Problématique industrielle	35
2.1.1 Les transformateurs de puissance	36
2.1.2 Système d'isolation des transformateurs	37
2.1.3 Le besoin de la supervision en ligne	38
2.2 Revue de littérature – État de l'art du domaine	40
2.2.1 Méthodes de détection et de mesure des DP.....	41
2.2.1.1 Techniques électriques.....	41
2.2.1.2 Techniques chimiques.....	49
2.2.1.3 Techniques mécaniques (émission acoustique)	50
2.2.2 Portrait de la recherche dans le domaine	53
2.3 Objectifs du projet de recherche	55
2.4 Conclusion	57
CHAPITRE 3 MONTAGE EXPÉRIMENTAL	59

3.1	Description du système	59
3.1.1	Présentation des sondes piézocéramiques	59
3.1.2	Préparation du capteur	62
3.1.3	Protocole expérimental	63
3.1.4	Banc d'essai	64
3.1.5	Plan d'expériences	68
3.2	Analyse des performances métrologiques du système de mesure	70
3.2.1	Gammes fréquentielles	70
3.2.2	Étalonnage (Calibration)	70
3.2.2.1	Test de normalité des résidus	71
3.2.2.2	Test de stabilité / Ergodicité	73
3.2.2.3	Régression et analyse de linéarité	75
3.2.2.4	Étude de l'erreur de linéarité et du biais	77
3.3	Conclusion	80
CHAPITRE 4 MODÉLISATION ET POST-TRAITEMENT		81
4.1	Modélisation par la MEF de la configuration pointe plan du banc d'essai	81
4.1.1	Description physique du problème à résoudre	82
4.1.2	Formulation mathématique	84
4.1.2.1	Conditions aux limites	85
4.1.2.2	Résultats	87
4.2	Traitement du signal brut issu des piézoélectriques	92
4.2.1	La transformée en ' <i>Wavelets</i> '	93
4.2.1.1	Transformé en ondelette discrète (<i>Discret Wavelet Transform - DWT</i>)	97
4.2.1.2	Transformée inverse	99
4.2.1.3	Relation entre fréquence et échelle	100
4.2.2	Acquisition des signaux	100
4.2.2.1	Cas des capteurs piézoélectriques	101
4.2.2.2	Signal du coupleur capacitif	103
4.2.3	Processus retenu pour le traitement	105
4.2.4	Construction du diagramme de résolution dans la phase DRPDP	106
4.2.5	Construction du diagramme d'analyse d'amplitude des impulsions AAI	108
4.3	Conclusion	109
CHAPITRE 5 ANALYSE MÉTROLOGIQUE DES NOUVEAUX CAPTEURS		111
5.1	Paramètres d'expérimentation	111
5.1.1	Mode d'acquisition et base de temps	111
5.1.2	Essai à vide	112
5.2	Validation descriptive	113
5.2.1	Diagrammes temporels	114
5.2.2	Diagramme de parité	118
5.2.3	Diagramme de résolution dans la phase DRPDP	119
5.2.4	Diagramme d'analyse d'amplitude des impulsions AAI	122

5.2.5	Analyse du biais.....	124
5.2.6	Analyse du niveau de corrélation.....	125
5.3	Conclusion	126
CHAPITRE 6 ÉTUDES DE LOCALISATION DES DÉCHARGES		127
6.1	Localisation par émission acoustique	127
6.1.1	Équations physiques d'une source monopole	127
6.2	Méthodes de localisation des foyers des décharges partielles	130
6.3	Expérimentation.....	133
6.3.1	Calcul des coordonnées de la source	135
6.3.2	Détermination des instants d'arrivées des signaux	136
6.4	Conclusion	138
CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS.....		139
ANNEXE I MESURES DE CALIBRATION		143
ANNEXE II LOCALISATION DE LA SOURCE DES DÉCHARGES PARTIELLES PAR LE MOYEN DU CALCUL DE L'ÉNERGIE ACOUSTIQUE.....		147
ANNEXE III EXEMPLE DE MESURE DE DP DANS LA GAMME DES UHF		149
BIBLIOGRAPHIE.....		152

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Permittivité relative de différents matériaux.....7
Tableau 1.2	Rigidité diélectrique de différents matériaux.....12
Tableau 2.1	Vitesse de son dans différents matériaux.....52
Tableau 3.1	Récapitulatif des statistiques des résidus (étalonnage)73
Tableau 5.1	Analyse du biais.....125
Tableau 5.2	Coefficient de corrélation126
Tableau 6.1	Positions des capteurs et de la source136
Tableau 6.2	Mesures des temps $t_{i,1}$ et estimation de la vitesse du son137
Tableau 6.3	Résultats du calcul de la position de la source.....138

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 a) Circuit équivalent b) Son diagramme de Fresnel.....	9
Figure 1.2 Processus de rupture électrique dans un diélectrique	12
Figure 1.3 Allure de courbe de PASCHEN.....	14
Figure 1.4 Propagation d'un arbre électrique dans le polyéthylène	16
Figure 1.5 Avalanche électronique.....	19
Figure 1.6 Allure de la courbe de la fonction $I = f(V)$	20
Figure 1.7 Schéma descriptif des différents paramètres utilisés	21
Figure 1.8 Graphe de l'écart en fonction du courant.....	23
Figure 1.9 Schématisation de la charge d'espace, du.....	26
Figure 1.10 Processus de développement de Streamer	27
Figure 1.11 Décharge couronne	28
Figure 1.12 Cavité idéale en forme de disque	30
Figure 1.13 Schéma électrique équivalent	31
Figure 2.1 Transformateurs à haute tension	37
Figure 2.2 Transformateur de puissance	38
Figure 2.3 Plan de la revue de littérature.....	40
Figure 2.4 Diagramme conventionnel de mesure de DP.....	42
Figure 2.5 Exemple de diagramme de résolution dans la phase	44
Figure 2.6 Exemple de diagramme de résolution dans la phase en 2D.....	45
Figure 2.7 Exemple de fenêtre diélectrique.....	47
Figure 2.8 Diagramme de base d'un système de mesure UHF	47

Figure 2.9	L'énergie radiofréquence émise par les bruits de fond	48
Figure 2.10	Décharges partielles et technologie acoustique	51
Figure 2.11	Capteur ultrasonique	52
Figure 2.12	Capteurs piézoélectriques	56
Figure 3.1	Capteurs piézoélectriques HTUTs a) photo b) schéma de principe.....	60
Figure 3.2	Processus d'élaboration d'une sonde piézoélectrique BIT/PZT	61
Figure 3.3	Signaux captés par un capteur BIT/PZT après deux types d'excitation	62
Figure 3.4	Protocole expérimental	63
Figure 3.5	a) Banc d'essai, b) Boitier en PMMA.....	65
Figure 3.6	Schéma (a) du montage expérimental et (b) du circuit équivalent	66
Figure 3.7	Réponse fréquentielle du système.....	67
Figure 3.8	Plan d'expériences proposé.....	69
Figure 3.9	Gammes de fréquences des DP	70
Figure 3.10	Décharges enregistrées pour 10 cycles	71
Figure 3.11	Test de normalité des résidus effectué sur chaque groupe de mesure	72
Figure 3.12	Cartes de contrôles enregistrées pour chaque charge de calibration.....	74
Figure 3.13	Carte I-EM pour $(-20pC)$ sans le point aberrant.....	75
Figure 3.14	Diagrammes de l'analyse de régression.....	76
Figure 3.15	Diagrammes de valeurs résiduelles.....	78
Figure 3.16	Droite d'ajustement linéaire.....	78
Figure 3.17	Diagramme de linéarité et du biais	79
Figure 3.18	Diagramme de linéarité et du biais pour la 2 ^{ème} étude.....	80
Figure 4.1	Boucle de modélisation par la MEF.....	82
Figure 4.2	Schéma du modèle à résoudre.....	83

Figure 4.3	Photo de la pointe prise par un microscope	84
Figure 4.4	Modèle adopté pour le calcul numérique.....	86
Figure 4.5	Profil du potentiel (a) et du champ électrique (b) dans l'air pour $V_a = 3kV$	87
Figure 4.6	Profil du potentiel (a) et du champ électrique (b) dans l'air à l'intérieure de la boîte en plexiglas pour $V_a = 3 kV$	88
Figure 4.7	Champ maximal versus distance inter-électrode	89
Figure 4.8	Champ maximal versus rayon de courbure.....	90
Figure 4.9	Variation du champ maximal versus la charge d'espace	91
Figure 4.10	Distribution du champ électrique en fonction de la densité de charge d'espace.....	92
Figure 4.11	Exemple d'un signal brut à 2,45 kV	93
Figure 4.12	Exemple d'ondelette Db20	94
Figure 4.13	Quelques ondelettes mères (Fugal, 2009).....	95
Figure 4.14	Schéma du processus d'analyse par ondelette	95
Figure 4.15	Un niveau d'analyse par DWT	97
Figure 4.16	Fractionnement itératif du spectre d'un signal avec une banque de filtre	98
Figure 4.17	Espace temps-échelle sur une grille dyadique	99
Figure 4.18	Diagramme d'acquisition du signal issu des capteurs	102
Figure 4.19	Diagramme d'acquisition du signal issu du coupleur capacitif	104
Figure 4.20	Diagramme du processus de traitement	105
Figure 4.21	a) Avant traitement b) Après traitement	105
Figure 4.22	Algorithme du processus d'obtention des DRPDP	107
Figure 4.23	Les différents diagrammes de résolution dans la phase.....	108
Figure 4.24	Diagramme d'analyse d'amplitude AAI (a) DP négatives (b) DP positives.....	109

Figure 5.1	Principe du mode détection de crête (Tektronix®).....	112
Figure 5.2	Signaux enregistrés à vide	113
Figure 5.3	Signal brut de DP mesuré par un capteur piézoélectrique à 2.45 kV	114
Figure 5.4	Signal brut de DP mesuré par le coupleur capacitif à 2.45 kV	114
Figure 5.5	Des DP détectées simultanément par le capteur piézoélectrique (colonne gauche) et le coupleur capacitif (colonne droite) aux tensions : a) 3,0 kV b) 3,6 kV c) 4,4 kV	116
Figure 5.6	Signaux filtrés des DP détectés par le capteur piézoélectrique (colonne gauche) et le coupleur capacitif (colonne droite) aux tensions : a) 3,0 kV b) 3,6 kV c) 4,43 kV	117
Figure 5.7	Mesures issues du capteur BIT/PZT en fonction de celles du coupleur capacitif pour les tensions de 2.45 kV, 3 kV, 3,6 kV et 4,43 kV respectivement	118
Figure 5.8	DRPDP 3D (a) Piézoélectrique BIT/PZT (b) Coupleur capacitif.....	120
Figure 5.9	DRPDP 2D½ (a) Piézoélectrique BIT/PZT (b) Coupleur capacitif.....	121
Figure 5.10	Diagrammes AAI des deux méthodes, pour les impulsions positives (gauche) et les impulsions négatives (droite).....	123
Figure 6.1	Champ sphérique d'un monopole	128
Figure 6.2	Schéma de principe	131
Figure 6.3	Disposition géométrique des capteurs et de la source	133
Figure 6.4	Réponse fréquentielle des quatre capteurs dans l'intervalle de [20 kHz 200 kHz].....	134
Figure 6.5	Spectre fréquentiel du détail niveau 7	135
Figure 6.6	Exemple de signaux des quatre capteurs avec les instants d'arrivée	137

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ÉTS	École de Technologie Supérieure
IEEE	École de Technologie Supérieure
CTT	Centre de technologie Thermique
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
IMI	Institut de Matériaux Industriel
BIT/PZT	Titanate de bismuth/ Titano-Zirconate de Plomb
HTUTs	<i>High Temperature Ultrasonic Transducers</i>
DP	Décharges Partielles
PE	Polyéthylène
THT	Transformateurs à Haute Tension
UHF	Ultra Haute Fréquence
DRPDP	Diagramme de Résolution dans la Phase de Décharges Partielles
AAI	Diagrammes d'Analyse d'Amplitude des Impulsions
GIS	<i>Gas Insulated Substations</i>
DGA	Analyse des Gaz Dissous
MEF	Méthode des Éléments Finis
EA	Émission Acoustique
I-MR	Individu-Étendue Mobile / <i>Indivudial Moving Range</i>
Db	Ondelettes Daubechies
FIR	Filtres à Réponse Impulsionnelle finie
DWT	<i>Discret Wavelet Transform</i>
LP/HP	Filtre passe-bas/Filtre passe-haut

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

D	Densité de charge totale [Cm^{-2}]
E	Champ électrique [kVmm^{-1}]
V	Tension électrique [V]
p	Pression [Pa]
\vec{P}	Polarisation
\vec{n}	Normale de surface
σ	Conductivité du diélectrique [$(\Omega \text{ m})^{-1}$]
ω	Pulsation de la tension appliquée [rad.s^{-1}]
ε'	La partie réelle de la permittivité complexe [Fm^{-1}]
ε''	La partie imaginaire de la permittivité complexe [Fm^{-1}]
ε_r	Permittivité relative du diélectrique
ε	Permittivité du milieu [Fm^{-1}]
ε_0	Permittivité du vide [$8.8510^{-12} \text{Fm}^{-1}$]
ρ	Densité de charge d'espace [Cm^{-2}]
r	Rayon de courbure de la pointe [m]
V_a	Tension appliquée [V]
V_c	Tension d'amorçage de décharge [V]
c	Vitesse du son dans le milieu considéré [ms^{-1}]
ν	Coefficient de viscosité cinématique [m^2s^{-1}]
d	Distance inter-électrode [m]
α	Premier coefficient d'ionisation de <i>Townsend</i> [m^{-1}]
η	Coefficient d'attachement des électrons libres [m^{-1}]

γ	Deuxième coefficient d'ionisation
C_k	Capacité de couplage [F]
q_i	Charge apparente [pC]
ϕ_i	Position dans la phase de q_i [degré]
t_i	Instant de l'occurrence de q_i [s]
Z	fonction de transfert du circuit équivalent
R	Impédance de mesure [Ω]
Q	Quantités de charges [pC]
F	Facteur d'échelle [pCV ⁻¹]
T	Période d'échantillonnage [s]
f_c	Fréquence centrale [Hz]
f_a	Pseudo fréquence [Hz]

INTRODUCTION

Les transformateurs de puissance sont des éléments essentiels à la transmission d'énergie électrique et des systèmes de production. Ils sont parmi les appareils les plus coûteux et par conséquent, ils prennent une grande part dans l'investissement des circuits de puissance. Leur fiabilité est donc cruciale pour le bon fonctionnement et la pérennité du réseau.

Au Québec, de nombreux transformateurs de puissance ont atteint l'âge de 30 ans ou même plus. C'est donc, un vieillissement de l'âge moyen du parc électrique qui est attendu dans les années à venir. Cependant, pour des raisons purement économiques, le maintien en service de ce parc aussi longtemps que possible sans prendre le risque d'une panne inattendue, est d'une grande importance.

De tous les composants constituant un transformateur, son système d'isolation demeure le maillon le plus sensible aux défaillances. Sa fiabilité dépend principalement de la qualité de ce système. À partir du moment où un transformateur est mis en service, son système d'isolation, que cela soit à l'état solide, liquide ou une combinaison des deux, subit un processus lent et irréversible de dégradation. La cause la plus fréquente de cette dégradation est l'activation des décharges partielles (DP). Ces décharges peuvent être expliquées par une rupture diélectrique localisée qui se produit, soit dans des cavités gazeuses, ou à la surface du système isolant, sous l'effet d'une concentration intense de champ électrique.

La mise hors service inattendue d'un transformateur de puissance pourrait engendrer de graves répercussions économiques, sociales et environnementales. Par conséquent, une confirmation des performances du système d'isolation est indispensable pour limiter le risque de défaillance et elle est la base logique d'un programme efficient de maintenance prédictive. D'où le besoin et le souhait d'implanter pour chaque transformateur, un système de surveillance, en temps réel si c'est possible, non destructif et fiable, qui aura pour objectif l'évaluation continue de sa fiabilité et sa disponibilité tout au long de sa vie utile. Dans cette optique, la localisation et la reconnaissance du développement des défauts à un stade précoce

deviennent des atouts majeurs pour la détermination et l'orientation des plans de maintenances.

Les décharges partielles ont la propriété d'être à la fois un indicateur et la principale cause de dégradation du système d'isolation. Ceci explique pourquoi la mesure et le diagnostic des décharges partielles sont devenus un moyen très attractif pour superviser l'état de l'appareillage à haute tension. L'évaluation de l'ampleur et de la nature des décharges partielles ont été considérées par plusieurs études comme un moyen de diagnostic fiable et précieux pour se renseigner sur l'état opérationnel d'un système d'isolation.

C'est spécifiquement dans cet angle que vient s'intégrer la contribution de notre projet de recherche. Le projet consiste à investiguer le potentiel d'une nouvelle génération de capteurs piézoélectriques pour la détection et la localisation de décharges partielles.

Cette nouvelle technologie de capteurs piézoélectriques a été récemment mise au point à l'Institut de Matériaux Industriel (IMI) de Boucherville (Qc., Canada). Elle offre de très bonnes caractéristiques (large bande de réponses fréquentielles, flexible, miniature, économique, etc.) qui peuvent être adaptées à la problématique des décharges partielles.

Nous conjecturons que des systèmes d'assistance en maintenance préventive basés sur cette nouvelle technologie auront leur place dans le milieu industriel. Nous présentons leurs caractéristiques et nous démontrons, expérimentalement, leur applicabilité.

Le contenu de cette thèse est constitué de six chapitres :

- Le premier présente la théorie de la rupture électrique dans les isolants ainsi que les mécanismes physiques d'activation des décharges partielles.
- Le deuxième chapitre expose la problématique de recherche liée au phénomène de DP pour les transformateurs de puissance, l'état de l'art des différentes méthodes de

détection et d'analyse des DP et aussi les objectifs spécifiques de ce projet de recherche y sont introduits.

- Le troisième chapitre détaille le montage expérimental adapté, donne une description des caractéristiques électriques et morphologiques de la nouvelle génération de capteurs piézoélectriques employés. Ce chapitre présente une analyse des performances métrologiques du système de mesure : son étalonnage et ses analyses de biais et de linéarité. Le but est de démontrer empiriquement la cohérence des mesures obtenues et de les comparer à des étalons traçables.
- Le quatrième chapitre est divisé en deux grandes sections : la première présente une modélisation par éléments finis du profil du potentiel et du champ électrique créés par une configuration d'électrodes pointe-plan pour simuler les contraintes électriques du banc d'essai. Aussi, l'effet de la charge d'espace sur la distribution du champ électrique est discuté. La deuxième section expose les algorithmes de post-traitements que nous avons développés pour extraire toutes informations utiles des signaux bruts issus du système de mesure.
- Le cinquième chapitre expose les résultats de validation des mesures des nouveaux capteurs en les comparant à des mesures issues d'un système conventionnel et reconnu dans l'industrie.
- Le dernier chapitre étudie le potentiel des capteurs à localiser le foyer des DP par émission acoustique. Un algorithme de triangulation sera aussi présenté.

Finalement, nous clôturons notre travail par une conclusion générale et des recommandations pour de futures pistes de recherche.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE AUX DÉCHARGES PARTIELLES

Les décharges partielles (DP) dans les équipements électriques de puissance sont souvent considérées à la fois comme des facteurs et des symptômes de dégradations des systèmes d'isolation. Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu théorique sur la rupture diélectrique et les mécanismes d'activation des DP.

1.1 Système d'isolation : diélectrique

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

Une isolation en service est généralement exposée à une haute température, à une haute tension, à des vibrations et à d'autres actions d'ordre mécanique, ainsi que certaines conditions environnementales nocives. Ces contraintes peuvent agir ensemble ou individuellement pour dégrader les matériaux d'isolation. Par ailleurs, une isolation soumise à de hautes tensions peut se dégrader en raison de l'activité des décharges partielles. Dans ce qui suit, nous survolons quelques propriétés qui caractérisent les diélectriques et qui sont essentielles pour exposer nos travaux de recherche.

1.1.1 Permittivité

Un matériau isolant est un matériau diélectrique, c'est-à-dire, qui ne conduit pas ou très peu de courant électrique. D'un point de vue électrique, il est caractérisé par sa permittivité. Cette dernière caractéristique reflète l'intensité des mécanismes de polarisation dans le matériau.

Le phénomène de polarisation provient en général de l'orientation d'un dipôle électrique, induit ou permanent, en présence d'un champ appliqué.

Pour un diélectrique soumis à une tension continue, la densité de charge totale (\vec{D}), qui correspond normalement à la somme vectorielle de la densité sous vide (\vec{D}_0) et de la densité surfacique ($\vec{P} = \sigma_p \cdot \vec{n}$) reliée à la polarisation due aux dipôles est exprimée par :

$$\vec{D} = \vec{D}_0 + \vec{P} \quad (1.1)$$

Si on tient compte du fait que les matériaux utilisés en électrotechnique sont généralement des diélectriques linéaires, la polarisation (\vec{P}) peut s'écrire donc comme :

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (1.2)$$

Où (χ) est la susceptibilité électrique du diélectrique et (\vec{E}) est le champ électrique.

La densité de charge totale (\vec{D}) devient alors :

$$\vec{D} = \vec{D}_0 + \vec{P} = \epsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (1.3)$$

ϵ_r : est appelée permittivité relative ou constante diélectrique du matériau. Ce paramètre quantifie l'importance des mécanismes de polarisation. Pour minimiser les pertes diélectriques dans les systèmes d'isolation, on cherche habituellement des matériaux de

faible permittivité relative. Le Tableau 1.1 donne à titre indicatif la permittivité relative de certains matériaux.

Tableau 1.1 Permittivité relative de différents matériaux

Matériau	Permittivité relative
Vide	1
Air	1,0006
PTFE (Téflon)	2
Huile minérale	2,2
PE	2,3
PMMA	3,4
Quartz	5
Mica	6
Eau distillée	81

L'origine physique de la polarisation et conséquemment celle de la permittivité provient de plusieurs mécanismes nous citons : La polarisation électronique et ionique ou moléculaire, la polarisation d'orientation et la polarisation interfaciale.

La première, dites aussi polarisation rapide, est due à la création de dipôles par le déplacement du centre géométrique des charges positives par rapport aux charges négatives en présence d'un champ électrique. Cette polarisation est définie par :

$$\vec{P}_r = N_i \alpha_r \vec{E} \quad (1.4)$$

N_i : Nombre de dipôles induits par unité de volume [m^{-3}],

α_r : Polarisabilité du matériau [Fm^2].

La polarisation d'orientation est liée aux matériaux présentant des dipôles permanents même en l'absence de champ électrique. Ces matériaux sont appelés matériaux polaires.

La polarisation nette en l'absence de champ électrique est nulle du fait de l'orientation aléatoire des dipôles. En présence de champ électrique, les dipôles s'orientent dans la même

direction du champ et la polarisation résultante est non nulle. En 1945, Paul Debye a proposé une relation définissant cette polarisation :

$$\vec{P}_d = \frac{N_d \mu^2}{3kT} \vec{E} \quad (1.5)$$

N_d : Le nombre de dipôles permanent par unité de volume [m^{-3}],

μ : Le moment dipolaire du dipôle permanent,

T : Température [Kelvin],

k : Constante de Boltzmann [$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{JK}^{-1}$].

L'interaction entre ces deux premiers types de polarisation est donnée par l'équation de *Clausius-Mossotti* (Gorur, 2003b) :

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{N_d \mu^2}{9\epsilon_0 kT} + \frac{N_i \alpha_r}{3\epsilon_0} \quad (1.6)$$

Dans le cas de champ électrique variable dans le temps, la polarisation est définie par la convolution suivante :

$$P(t) = \epsilon_0 \int_0^\infty f(\tau) E(t - \tau) d\tau \quad (1.7)$$

La fonction $f(t)$ est une fonction de réponse qui caractérise la réponse d'un milieu diélectrique à une excitation électrique spécifique.

En pratique, on se renseigne sur l'effet de la polarisation dans un matériau par la mesure du courant qui le traverse. La loi d'Ampère définit la relation entre la polarisation et la densité de ce courant (David, 2009).

$$J(t) = \sigma E(t) + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1.8)$$

Où $J(t)$ est la densité de courant total [Am^{-2}] et σ est la conductivité [$(\Omega\text{m})^{-1}$].

La polarisation interfaciale appelée aussi polarisation de charges d'espace se manifeste généralement dans le cas de matériaux hétérogènes, présentant des interfaces internes et aussi dans le cas des polymères ayant des frontières créées par des phases cristallines et amorphes. Cette polarisation est le résultat d'accumulation locale de charge dans le matériau à cause du changement de conductivité aux différentes frontières.

1.1.2 Facteur de dissipation

Le facteur de dissipation aussi appelé $\tan(\delta)$ quantifie les pertes diélectriques qui sont généralement fonction de la présence de contaminants susceptibles d'être ionisés. La mesure de ce facteur constitue un outil commode pour l'évaluation de la qualité de l'isolation à haute tension (Wang *et al.*, 2002).

Une isolation est souvent représentée par le circuit équivalent de la Figure 1.1. Ce dernier est constitué d'une résistance modélisant les pertes dans le diélectrique, en parallèle avec une capacité.

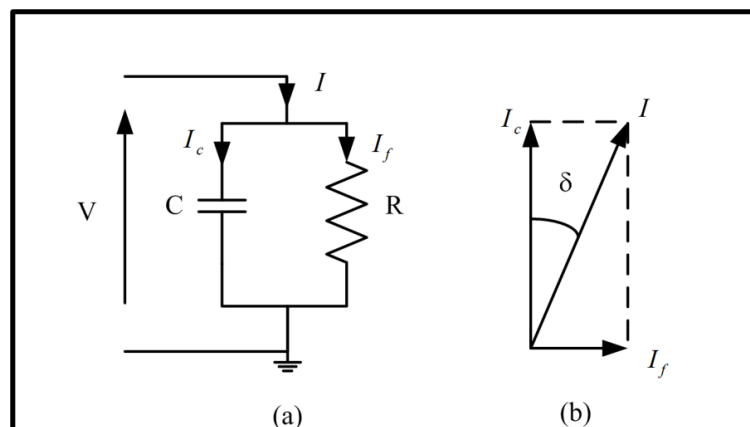


Figure 1.1 a) Circuit équivalent b) Diagramme de Fresnel

Le facteur de dissipation $\tan(\delta)$ est défini comme le rapport du courant de fuite (I_f) sur le courant de charge (I_c).

$$\tan(\delta) = \frac{I_f}{I_c} = \frac{1}{\omega RC} \quad (1.9)$$

En termes de propriétés du diélectrique, dans le cas simple où une isolation peut être représentée par un circuit tel que celui illustré à la Figure 1.1a, le facteur de dissipation peut être écrit sous la forme (Bartnikas et Srivastava, 2003) :

$$\tan(\delta) = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon'} \quad (1.10)$$

Où :

- σ : La conductivité du diélectrique $[(\Omega.m)^{-1}]$,
- ω : La pulsation de la tension appliquée $[\text{rad.s}^{-1}]$,
- ε' : La partie réelle de la permittivité complexe $[\text{Fm}^{-1}]$,
- ε'' : La partie imaginaire de la permittivité complexe $[\text{Fm}^{-1}]$.

La puissance des pertes dissipées dans le diélectrique est proportionnelle au $\tan(\delta)$, c'est pourquoi il est important de choisir pour une isolation, un matériau à faible facteur de dissipation.

1.1.3 Rupture diélectrique

La rigidité diélectrique est une propriété d'un matériau isolant qui caractérise sa qualité à s'opposer à la décharge disruptive. Elle peut être définie comme la contrainte électrique maximale que peut supporter une isolation. Elle est analogue à la résistance à la rupture d'un

matériau en mécanique. La rupture ou le claquage électrique n'est pas régi par la tension seule. Elle dépend du champ électrique, tout comme la contrainte normale dans une poutre en traction qui n'est pas uniquement fonction de la force appliquée, mais fonction de la force par unité de section transversale.

Le champ électrique (E) [kVmm^{-1}] dans une géométrie d'électrodes parallèles est donné par :

$$E = \frac{V}{d} \quad (1.11)$$

Où V et d sont respectivement la tension et la distance entre les électrodes.

Si la tension appliquée est augmentée progressivement, il y aura une tension à laquelle la rupture électrique se produira, c'est-à-dire, au cours de laquelle une étincelle transitera entre les deux électrodes. À l'aide de l'équation (1.11), on pourra alors calculer la rigidité diélectrique ou le champ disruptif du matériau isolant.

Afin d'élucider ce phénomène, considérons un isolant mis entre deux armatures planes, connectées à une source de tension variable (*voir* Figure 1.2). Lorsque la tension est nulle, les électrons du diélectrique décrivent une orbite circulaire autour des noyaux. Au fur et à mesure que la tension appliquée augmente, cette trajectoire devient plus elliptique sous l'effet de l'attraction et du repoussement des électrons par les armatures positive et négative respectivement. Cependant, l'isolant ne peut supporter des tensions croissantes indéfiniment. À une certaine tension limite, cette force exercée dans le diélectrique devient capable d'arracher des électrons du cortège électronique. Le matériau qui était presque dépourvu d'électrons libres devient rempli d'électrons arrachés et prend un caractère de conducteur. Ainsi, il se produit un court-circuit entre les deux armatures.

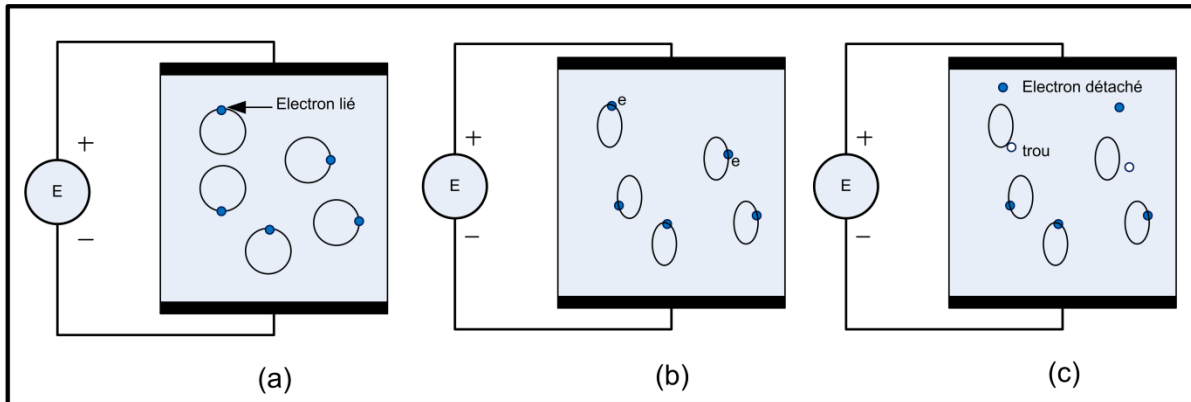


Figure 1.2 Processus de rupture électrique dans un diélectrique
a) faible tension, b) tension élevée, c) tension de rupture

Plusieurs facteurs physiques, électriques et chimiques influencent la résistance à la rupture électrique des matériaux isolants. Parmi ces facteurs, on peut citer : la température, la pression, la présence d'humidité ou de contaminants, la géométrie, le volume d'isolant, etc. (Allen *et al.*, 2007; Busch *et al.*, 2001). En pratique, il est important de noter que ces paramètres n'agissent jamais seuls. Ce qui rend ainsi leur analyse plus complexe.

Le calcul des champs de rupture est d'une importance considérable pour l'ingénierie des équipements haute tension. Le Tableau 1.2 donne le champ disruptif de certains matériaux (Gardiol, 2002).

Tableau 1.2 Rigidité diélectrique de différents matériaux
Tiré de Gardiol (2002, p.332)

Matériaux	Champ disruptif en $[MVm^{-1}]$
Air	2,5
verre	18
Huile minérale	20
Caoutchouc	20
Papier	22
plexiglas	25
Porcelaine	27
Ébonite	27
Résine époxy	35
Mica	57

1.1.3.1 Rupture dans les gaz

L'air dans les conditions normales est un bon isolant. Sa rupture électrique implique un processus dans lequel les électrons chargés négativement en orbite autour des atomes sont arrachés des molécules, sous l'effet de l'ionisation par collision. Si le champ appliqué est suffisamment grand, cette ionisation se maintient et les électrons relâchés se multiplient jusqu'au claquage (Shugg, 1995a).

Les gaz sous pression exhibent une bonne rigidité diélectrique. Par exemple, pour le cas de l'air à la température ambiante, sous la pression atmosphérique (100 kPa), et dans des conditions de faible humidité et de petite distance inter-électrode, sa rigidité diélectrique est d'environ 3 kVmm^{-1} . Uniquement par une augmentation de la pression à 300 kPa, cette limite se voit multiplier par trois (environ 9 kVmm^{-1}) (Stone *et al.*, 2004). Cette relation entre pression et rigidité est connue sous le terme de la loi Paschen. La Figure 1.3 illustre l'allure de cette courbe (Robert *et al.*, 2010). Elle n'est admissible que pour une température constante et pour des champs électriques ne dépassant pas 100 kVmm^{-1} . Si l'on considère, le cas d'un gaz soumis à une tension électrique entre deux armatures planes, cette loi, en fonction du produit pression et distance inter-électrode (pd), prend la forme :

$$V_c = f(pd) = \frac{B pd}{C + \ln(pd)} \quad (1.12)$$

Avec :

V_c : Tension de claquage [kV],

p : Pression du gaz [Pa],

d : Distance inter-électrode [mm],

B, C : Constantes qui dépendent du gaz, des électrodes et autres facteurs.

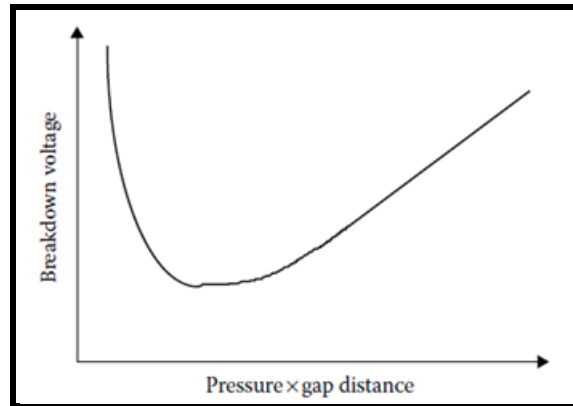


Figure 1.3 Allure de courbe de PASCHEN
Tirée de Robert et al., (2010, p. 401)

Certains gaz tels que l'hexafluorure de soufre (SF_6) et le gaz carbonique (CO_2) ont des propriétés diélectriques supérieures à celles de l'air. Dans ces gaz, un bon nombre d'électrons libres sont absorbés par les molécules du gaz (attachement).

1.1.3.2 Rupture dans les liquides

Les principaux isolants liquides utilisés dans les équipements de puissance sont les huiles minérales et les huiles synthétiques. En plus de leur fonction principale d'isolation, elles ont la propriété de caloporteur et de lubrifiant contre l'oxydation des conducteurs. Elles ont aussi l'avantage de se régénérer si une rupture survient. Les huiles fortement purifiées ont des tenues diélectriques qui peuvent atteindre 100 kVmm^{-1} . Cependant, cette tenue supérieure s'affaiblit avec la présence de contaminants tels que des gouttelettes d'eau, des impuretés ou des bulles gazeuses. Ces facteurs augmentent la possibilité de l'activation des décharges partielles.

L'expérimentation a montré que la dégradation des huiles isolantes est hautement dépendante de la température. Selon la qualité des huiles, le processus de dégradation peut s'enclencher même à des conditions opératoires normales avec des températures supérieures à 60°C . Aussi on peut ajouter que la quantité de gaz dissous ainsi que la mobilité des ions et des électrons (conséquence de l'abaissement de la densité et de la viscosité de l'huile) augmentent avec la température, déclenchant ainsi des décharges partielles et des réactions chimiques avec le

milieu ambiant ce qui peut conduire au claquage (Adamczewski et Januszajtis, 1996; Denat, 2005; Shugg, 1995b; Tobazcon, 1994).

1.1.3.3 Rupture dans les solides

Les matériaux solides isolants sont souvent présents dans les équipements électriques. Ils sont généralement constitués de polymères organiques tels que les résines d'époxy, le polyéthylène, le papier, etc. Ils ont de bonnes propriétés diélectriques, pouvant atteindre 1000 kVmm^{-1} , leur rigidité est la meilleure qui soit. Mais la présence de défauts tels que des impuretés, des cavités gazeuses ou des aspérités condamne de façon très remarquable cette tenue électrique (Boggs, 1990a; Kemp, 1996; Zeller, 1987).

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

Dans la plupart des cas, la rupture va survenir le long d'une surface, ou encore être causée par la carbonisation et l'érosion du matériau dues à des décharges partielles dans des cavités gazeuses ou encore se propager à partir d'un défaut suivant une structure arborescente appelée arbre électrique. La Figure 1.4 illustre la propagation d'un arbre électrique dans le polyéthylène (Shimizu, 1979).

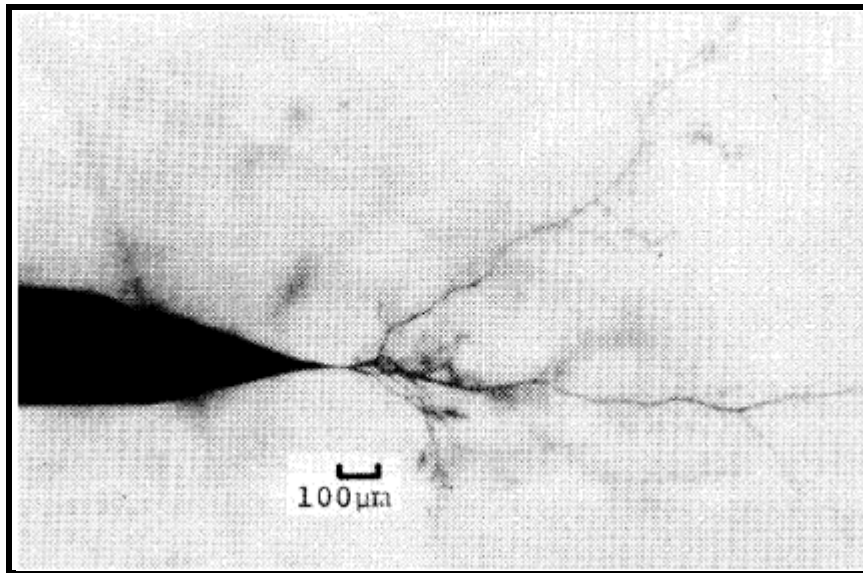


Figure 1.4 Propagation d'un arbre électrique dans le polyéthylène
Tiré de Shimizu (1979, p.7)

1.2 Théories des décharges partielles

1.2.1 Généralités

Les décharges partielles (DP) sont définies comme des décharges électriques localisées qui ne court-circuitent que partiellement l'espacement entre électrodes, c'est-à-dire le volume de l'isolation. Elles peuvent ou non se produire à proximité d'un conducteur. Les décharges partielles sont en général une conséquence de concentrations locales de contraintes électriques dans ou à la surface de l'isolation. Souvent, de telles décharges apparaissent comme des impulsions de durée inférieure à $1 \mu s$ (Power & Energy Society, 2009).

Les décharges partielles sont souvent accompagnées de petites étincelles, pleines d'électrons et d'ions qui bombardent l'isolation. Les matériaux organiques constituant la grande part des systèmes d'isolation (huiles minérales, résines époxydes polyesters, etc.) se dégradent dans ce bombardement par la scission de certaines liaisons chimiques telles que la liaison carbone-hydrogène. Avec le temps, ce phénomène érode un chemin à travers les parties organiques conduisant à la rupture diélectrique. Les DP dans un diélectrique, tel que le polyéthylène (PE), peuvent provoquer sa rupture diélectrique à l'intérieur de quelques jours.

Les DP peuvent se créer dans les différents types d'isolation, solides, liquides ou gazeux, ou toutes combinaisons de ces types. Dans certaines monographies, le terme «décharges partielles» englobe un large groupe de phénomènes de décharge, tels que :

- Des décharges internes survenant dans des cavités dans les diélectriques solides ou liquides,
- des décharges de surface apparaissant à l'interface de différents matériaux isolants,
- des décharges couronnes (*corona*) survenant dans les diélectriques gazeux en présence de champs inhomogènes,
- Des décharges se propageant à partir d'un défaut dans les diélectriques solides, suivant une structure arborescente appelée arbre électrique (*treeing*).

La définition des décharges partielles introduite ci-haut reste valable pour tous ces phénomènes, du fait que tous ces types de décharges précitées prennent naissance dans des zones restreintes dans l'isolation, subissant de fortes concentrations de champ électrique dues aux différents défauts locaux (cavités gazeuses, impuretés, aspérités de surfaces, etc.).

Dans les sections suivantes de ce chapitre, nous exposons essentiellement les mécanismes physiques de claquage de l'air. Plusieurs études ont confirmé que la première cause de la création des décharges partielles dans l'isolation haute tension est la présence de cavités gazeuses dans le matériau diélectrique qui peuvent être dues soit aux défauts de fabrication ou au vieillissement thermique ou mécanique (Bartnikas, 2002; Blackburn *et al.*, 2000; Boggs, 1990a; Niemeyer, 1995; Stone *et al.*, 2004).

Les principaux mécanismes de claquage de l'air sont le mécanisme de Townsend (avalanche électronique) et le mécanisme de Streamer.

1.2.2 Mécanisme de Townsend

La théorie de la rupture des gaz est assez bien établie. Le mécanisme de Townsend est considéré comme la première tentative pour expliquer cette rupture. Elle est basée sur le

principe de génération d'avalanches électroniques successives dues principalement aux collisions entre électrons et atomes ou molécules du gaz jusqu'au claquage. En effet, si un gaz est soumis à un champ électrique suffisamment élevé, un courant de particules chargées électriquement devient possible par l'ionisation partielle du milieu. Ainsi, le gaz devient conducteur et la décharge se produit. Par ailleurs, les conditions ambiantes (température, pression, rayonnement, etc.) ont une grande influence sur ce phénomène (Busch *et al.*, 2001; Fenger et Stone, 2005).

1.2.2.1 Ionisation

En présence d'un champ électrique assez élevé, l'amorçage de décharges partielles dans un gaz dépend de la présence d'électrons libres dans le milieu. Ces derniers n'existent dans l'air que pour de très courtes durées en l'absence d'un champ électrique élevé. Normalement après leur création par des rayons cosmiques ou radioactifs, ils sont directement piégés pour former des ions négatifs. Cependant, dans un champ électrique intense, ces électrons peuvent se détacher à nouveau à partir des ions négatifs suite aux collisions avec des molécules neutres ou bien suite à une interaction avec des photons énergétiques ($h\nu$), émis par des atomes excités.

Le principal concept d'ionisation qui domine dans le mécanisme de Townsend reste le processus de collision. En effet, les électrons en mouvement dont l'énergie cinétique est supérieure à l'énergie d'ionisation sont capables d'ioniser par collision des molécules neutres, en d'autres mots, libérer des électrons du cortège électronique (Bartnikas et McMahon, 1979; Gorur, 2003a), qui à leur tour acquièrent par le champ électrique assez d'énergie pour ioniser d'autres molécules, et ainsi de suite jusqu'au claquage. Ce phénomène est aussi connu sous le nom d'avalanche électronique. Cette avalanche cumulative est souvent accompagnée d'une lueur et d'un bruit chuintant. Le schéma de la Figure 1.5 montre le principe de multiplication des électrons et des ions positifs dans le processus d'avalanche.

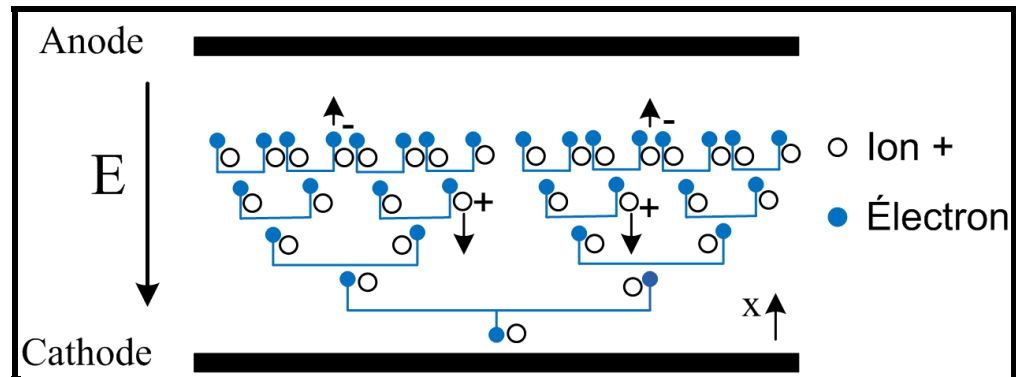


Figure 1.5 Avalanche électronique

Les électrons créés par le développement de l'ionisation peuvent être piégés, comme mentionné ci-dessus, et ainsi retirés du processus d'ionisation. C'est le concept d'attachement. Une croissance nette de la population d'électrons et d'ions positifs serait possible uniquement si le taux d'ionisation est supérieur au taux d'attachement. Ceci ne peut être garanti que si le champ appliqué est suffisamment intense.

1.2.2.2 Premier Coefficient d'ionisation de Townsend

La courbe de la Figure 1.6 représente la variation du courant en fonction de la tension appliquée entre deux électrodes planes. Townsend fut le premier chercheur à étudier cette variation (Townsend, 1915). Dans un premier intervalle $[0, V_1]$ le courant croît proportionnellement avec la tension jusqu'à une valeur de saturation (I_0) et y reste constant. Si des électrons sont arrachés de la cathode par radiation ultra-violette et que la tension est augmentée au-delà d'une valeur critique (V_2), le courant s'emballe avec un taux exponentiel.

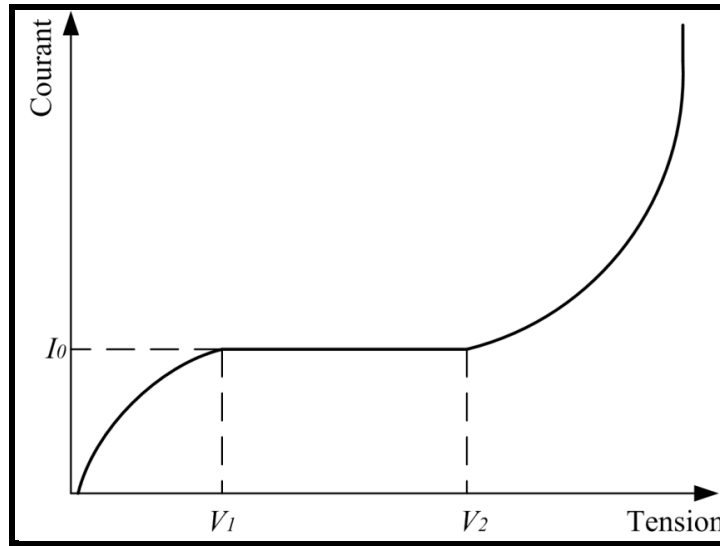


Figure 1.6 Allure de la courbe de la fonction $I = f(V)$
dans une configuration plane d'électrodes
Adaptée de Townsend (1915, p. 2)

Townsend a attribué cette augmentation exponentielle du courant au mécanisme d'ionisation par collision. Pour quantifier ce processus, il a introduit une quantité (α), appelée premier coefficient d'ionisation de Townsend. Ce coefficient est défini comme le nombre d'électrons ou d'ions positifs produits par un électron par unité de longueur dans la direction du champ. Si nous assumons que (n_x) est le nombre d'électrons par seconde se trouvant à la distance (x) de la cathode (*voir* le schéma descriptif de la Figure 1.7), la variation (dn) du nombre d'électrons sur un élément de longueur (dx) dans la direction du champ sera :

$$dn = \alpha n_x dx \quad (1.13)$$

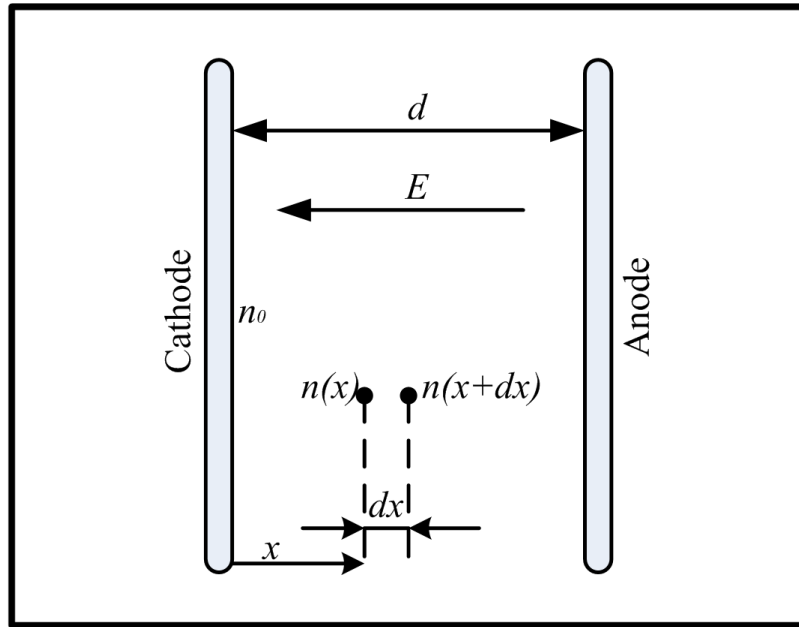


Figure 1.7 Schéma descriptif des différents paramètres utilisés par Townsend

Le nombre total d'électrons par seconde qui atteint l'anode est déterminé en résolvant l'équation différentielle ci-dessus :

$$n = n_0 e^{\alpha d} \quad (1.14)$$

Avec (n_0) est le nombre initial d'électrons qui partent de la cathode.

De cette relation, nous déduisons l'expression du courant (I) à l'anode :

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (1.15)$$

Avec (I_0) représentant le courant initial généré à la cathode.

En outre, pour une température constante et pour une distribution d'énergie donnée, la probabilité d'ionisation dépendra uniquement de la densité du gaz ou de la pression. Par conséquent, nous pouvons écrire :

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (1.16)$$

1.2.2.3 Coefficient d'attachement

Par analogie à la définition du premier coefficient d'ionisation, on définit un coefficient (η), qui quantifie le processus d'attachement des électrons libres pour donner naissances à des ions négatifs. Si ce processus est pris en compte, la relation (1.14) devient :

$$n = n_0 e^{(\alpha - \eta)d} \quad (1.17)$$

Et le courant dans ce cas sera la somme des courants induits par les électrons libres et par les ions négatifs :

$$I = I_0 \left[\frac{\alpha}{\alpha - \eta} e^{(\alpha - \eta)d} - \frac{\eta}{\alpha - \eta} \right] \quad (1.18)$$

Si le processus d'ionisation (création de nouveaux électrons) est balancé par le processus d'attachement ($\alpha = \eta$), la multiplication d'électrons s'arrête et par suite l'avalanche ne se développe plus. Comme le processus d'attachement d'électrons réduit la multiplication des électrons libres, les gaz ayant un coefficient d'attachement élevé, tels que l'hexafluorure de soufre (SF_6), le gaz carbonique (CO_2), ont par conséquent une bonne rigidité diélectrique.

1.2.2.4 Deuxième coefficient d'ionisation de Townsend

Le graphe de l'équation (1.15) dans une échelle logarithmique ($\log I = f(d)$), sous la condition de champ (E) uniforme et de pression (p) constante, devrait normalement être une droite de coefficient directeur (α) comme le montre la Figure 1.8 (Kuffel et al., 2000). Cependant, Townsend a remarqué que, pour de hautes tensions, cette courbe perd sa linéarité

et le courant augmente plus rapidement. Pour expliquer ce phénomène, Townsend a supposé l'existence d'autres électrons libres secondaires provenant du bombardement de la cathode par des ions positifs, jouant aussi un rôle supplémentaire dans le processus d'ionisation par collision.

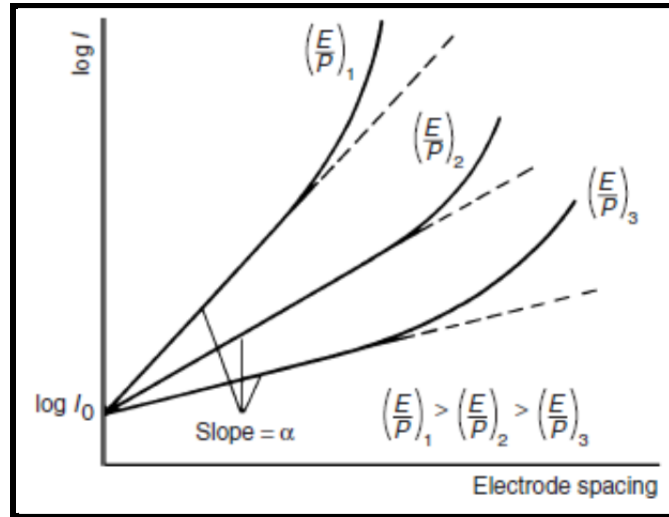


Figure 1.8 Graphe de l'écart en fonction du courant dans un champ uniforme
Tirée de Kuffel et al., (2000, p.322)

Pour quantifier ce mécanisme, Townsend a introduit un deuxième coefficient d'ionisation (γ), comme étant le rapport entre le nombre d'électrons secondaires par seconde généré à la cathode (n') et le nombre d'ions positifs incidents (n'').

$$\gamma = \frac{n'}{n''} \quad (1.19)$$

Si on tient compte maintenant de tous les électrons mis en jeu, la relation (1.14) devient :

$$n = (n_0 + n')e^{\alpha d} \quad (1.20)$$

La condition de l'égalité du courant à l'anode avec celui à la cathode donne :

$$n = (n_0 + n') + \frac{n'}{\gamma} \quad (1.21)$$

En combinant les deux équations (1.20) et (1.21) on obtient :

$$n = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (1.22)$$

En termes de courant :

$$I = I_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (1.23)$$

La quantité $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$ ou bien plus précisément $\gamma(e^{(\alpha-\eta)d} - 1)$ (si on tient compte du mécanisme d'attachement), constitue le critère de rupture de Townsend.

Si $\gamma(e^{(\alpha-\eta)d} - 1) = 1$, la décharge est auto entretenue même en l'absence du courant (I_0).

Si $\gamma(e^{(\alpha-\eta)d} - 1) > 1$, la décharge est cumulative et le courant augmente plus rapidement autant que cette quantité s'éloigne de 1.

Si $\gamma(e^{(\alpha-\eta)d} - 1) < 1$, l'avalanche ne peut être auto-entretenu en l'absence des électrons initiaux.

La loi de Paschen peut être déduite du critère de rupture de Townsend, en remplaçant dans ce dernier (α) par son expression de l'équation (1.16) et en utilisant la relation (1.11) reliant le champ uniforme (E) à la tension de rupture (V_r), ainsi on obtient :

$$f\left(\frac{E}{p}\right)pd = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \quad (1.24)$$

D'où l'équation de la loi de Paschen qui a été établie depuis 1889 :

$$e^{f\left(\frac{V_r}{pd}\right)pd} = \frac{1}{\gamma} + 1 \quad (1.25)$$

Cette relation annonce que la tension de claquage dans le cas de champ uniforme et de température constante dépend du produit de la largeur de l'écart par la pression (pd), ou plus généralement de la largeur de l'écart par la densité du gaz (ρd). Le graphe de la loi de Paschen est caractérisé par un extremum où la tension de rupture minimale se manifeste pour une valeur particulière du produit (pd) (voir Figure 1.3). Ce point extremum correspond aux conditions où le taux d'ionisation est maximum. En pratique, il est conseillé d'opérer toujours du côté droit de ce point extremum.

1.2.3 Mécanisme de Streamer

Ce type de mécanisme se produit principalement en raison de l'effet supplémentaire de la charge d'espace (voir Figure 1.9) créé par une avalanche bien développée et aussi de l'effet de l'ionisation photo-électrique (Haddad et Warne, 2004). Alors que le mécanisme de Townsend prédit une forme d'étincelle de décharge très diffusée, en pratique de nombreuses études ont constaté que cette dernière est plutôt filamenteuse et irrégulière.

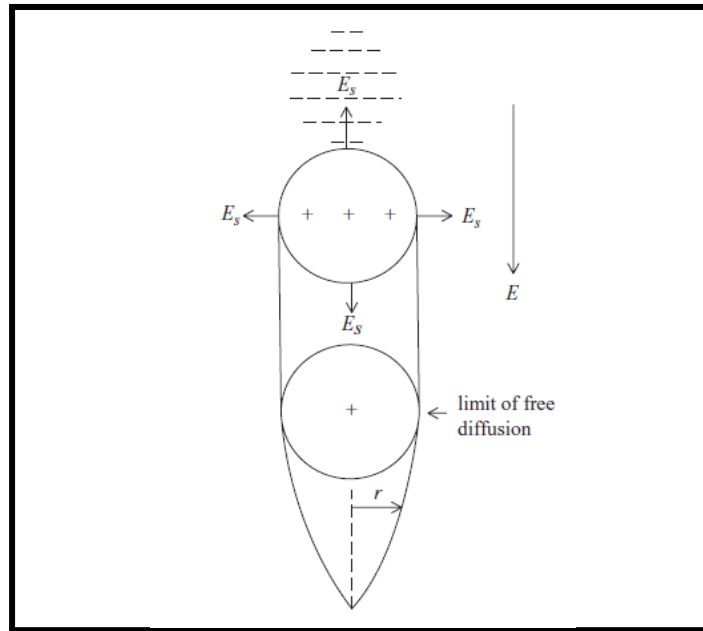


Figure 1.9 Schématisation de la charge d'espace, du champ induit \vec{E}_s et du champ appliqué \vec{E}
Tirée de Haddad et Warne (2004, p.7)

En effet dans le cas d'une avalanche bien prononcée, une forte charge d'espace se produit à cause de la différence de vitesse de déplacement entre les électrons et les ions positifs (Meek, 1942). Cette charge d'espace crée une distorsion suffisante du champ électrique, permettant aux électrons de se diriger vers l'extrémité de l'avalanche pour y créer d'autres avalanches secondaires. Ce processus devient rapidement cumulatif et la rupture électrique se manifeste plus rapidement que si le mécanisme de Townsend agissait seul. La Figure 1.10 schématise la séquence de développement de Streamer positif et négatif, constitué de trois grandes étapes, la création de l'électron primaire (a), l'avalanche critique (b-c) et l'établissement du Streamer (d-e).

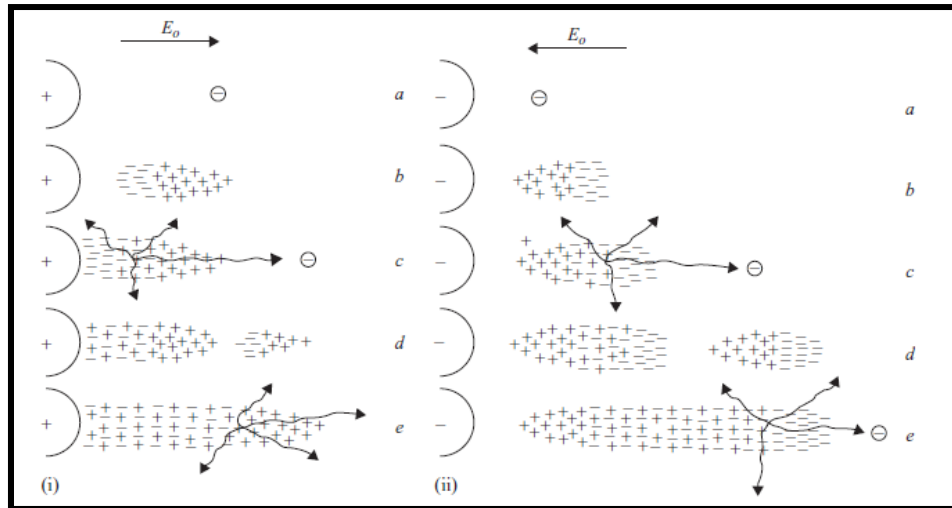


Figure 1.10 Processus de développement de Streamer
 (i) Streamer positif (ii) Streamer négatif
 Tirée de Haddad et Warne (2004, p.7)

1.2.4 Décharges négatives

Les décharges négatives se développant à proximité de la cathode sont généralement moins importantes et moins dangereuses que les décharges positives. Des tests effectués par J. H. Mason confirment qu'il faut plus de 25 % de contrainte électrique dans le cas de pointe négative que dans le cas de pointe positive pour créer une rupture électrique (Mason, 1955). Le fait que les électrons dans le cas des décharges négatives se déplacent dans la direction du champ à intensité décroissante (à cause de la charge d'espace) empêche l'avalanche de se développer facilement (diminution de la vitesse de dérive et de l'efficacité d'ionisation). La Figure 1.10(ii) montre la séquence de développement de la décharge négative.

1.2.5 Décharges couronne (*Corona Discharge*)

L'expérience pratique montre que dans certains cas de développement de Streamer le long de courte distance inter-électrode, il y a ramification de la décharge, appelée communément (*corona*). La cause de ce phénomène n'est pas encore bien cernée. Des hypothèses attribuent ce processus au développement d'avalanches secondaires sur les côtés de l'avalanche

principale. La Figure 1.11 montre un exemple de décharge couronne positive produite à 170 kV dans une configuration d'électrodes pointe-plan.

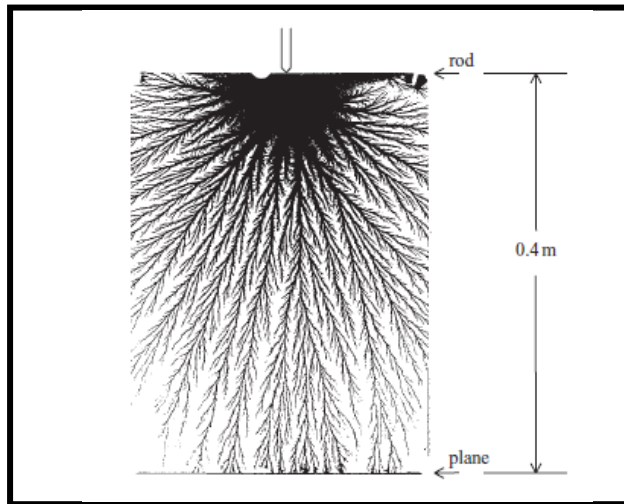


Figure 1.11 Décharge couronne
dans une configuration d'électrodes pointe plan
Tirée de Haddad et Warne (2004, p.14)

1.2.6 Champ non-uniforme

L'amorçage de décharges partielles ou d'avalanche suppose l'existence d'un champ électrique assez intense dans le matériau isolant, supérieur au champ disruptif. En pratique, les diélectriques sont choisis de façon à bien supporter les contraintes électriques de service. Mais malheureusement, l'existence de défauts inhérents tels que des impuretés, des cavités d'air et des aspérités de forme pointue engendrent dans le milieu, une distribution de champ électrique non uniforme et une concentration locale de contraintes électriques à proximité du défaut. Par conséquent, cette région se prononce comme la partie du diélectrique la plus qualifiée à être le lieu de l'activation des décharges partielles. Dans les deux sections suivantes, nous présentons deux types de défauts largement connus dans les systèmes d'isolation, l'effet de pointe et les cavités gazeuses.

1.2.6.1 Cavité gazeuse dans un diélectrique solide ou liquide

Les isolants habituellement utilisés en électrotechnique ne sont jamais parfaitement homogènes. Il existe dans le matériau des cavités de formes et dimensions diverses contenant des gaz. La permittivité du gaz de la cavité est en général plus petite que celle du matériau diélectrique qui l'entoure. Par conséquent, pour un champ électrique (E) donné dans le matériau, le champ (E_{cv}) dans la cavité sera plus élevé.

$$\frac{E_{cv}}{E} = K \quad (1.26)$$

K : Est un facteur > 1 , qui dépend du rapport des permittivités et de la forme de la cavité.

Pour le cas d'une cavité sphérique dans un diélectrique solide, on démontre que (Gorur, 2003a) :

$$K = \frac{3\varepsilon}{2\varepsilon + 1} \quad (1.27)$$

Pour les diélectriques solides et liquides, la permittivité (ε) est généralement supérieure à 2.

Tension et champ aux bornes d'une cavité idéale

La présence de cavité d'air dans un diélectrique peut mener à la rupture électrique du gaz de cette cavité et par conséquent la naissance de décharges partielles. Pour comprendre ce processus, considérons une plaque diélectrique d'épaisseur (d) à l'intérieur de laquelle se trouve une cavité en forme de disque plat de hauteur (d_1) et d'aire (A) (voir Figure 1.12). Pour que la rupture électrique du gaz dans la cavité se produise, il faut que cette dernière subisse l'action d'un intense champ électrique. En utilisant un diviseur de tension, nous

pouvons facilement calculer la tension à travers la cavité. La Figure 1.13 montre un circuit électrique équivalent de la configuration considérée.

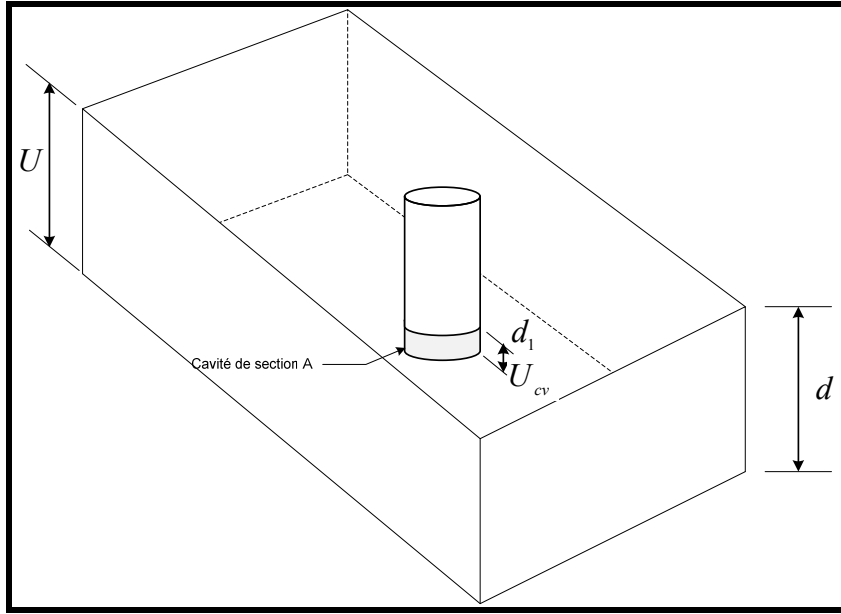


Figure 1.12 Cavité idéale en forme de disque

La capacité de la cavité peut être approximée par la capacité d'un condensateur plan avec :

$$C_{cv} = \frac{A\epsilon_0}{d_1} \quad (1.28)$$

Où ($\epsilon_0 = 8.8510^{-12} \text{ Fm}^{-1}$) est la permittivité du vide. On suppose que le gaz à l'intérieur de la cavité a une permittivité relative ($\epsilon_{rcv} = 1$).

De la même façon, la capacité du diélectrique adjacent (cylindre idéal), d'aire (A) et de hauteur ($d - d_1$) peut être calculée par :

$$C_d = \frac{A\epsilon_0\epsilon_r}{d - d_1} \quad (1.29)$$

ε_r : Permittivité relative du diélectrique.

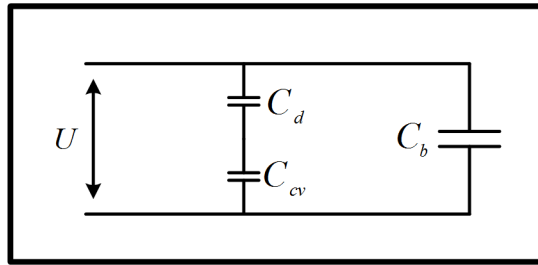


Figure 1.13 Schéma électrique équivalent

C_{cv} : La capacité de la cavité [F],

C_d : La capacité du cylindre adjacent de hauteur $(d - d_1)$ [F],

C_b : La capacité du reste du diélectrique [F].

La tension (U_{cv}) aux bornes de la cavité (capacités en série) est donnée par :

$$U_{cv} = U \frac{C_d}{C_d + C_{cv}} \quad (1.30)$$

U : Tension aux bornes de la plaque isolante [V].

$$U_{cv} = \frac{U}{1 + \frac{1}{\varepsilon_r} \left(\frac{d}{d_1} - 1 \right)} \quad (1.31)$$

Le champ électrique moyen à l'intérieur de la cavité vaut alors :

$$E_{cv} \cong \frac{U_{cv}}{d_1} \quad (1.32)$$

Si (E_{dis}) est le champ de claquage dans la cavité, la tension limite d'apparition des décharges dans la plaque sera donc :

$$U_{lim} = E_{dis} d_1 \left\{ 1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left(\frac{d}{d_1} - 1 \right) \right\} \quad (1.33)$$

À titre d'exemple si l'on considère les données suivantes :

$$U = 10 \text{ kV},$$

$$d_1 = 0.5 \text{ mm},$$

$$d = 5 \text{ mm},$$

$$\epsilon_r = 4.$$

Le champ électrique moyen dans la cavité d'air serait ($E_{cv} = 6,15 \text{ kVmm}^{-1}$), une valeur qui est nettement supérieure au champ disruptif de l'air et par conséquent cette cavité serait le siège de décharges partielles. Ces dernières resteront, dans un premier stade, confinées à la cavité d'air tandis que le reste du diélectrique continuera sa fonction d'isolation (c'est de ce phénomène qu'on tire l'appellation *décharges partielles*), jusqu'à ce que la propagation de la carbonisation de la matière isolante, due à l'érosion par bombardement électronique (cassure des liaisons chimiques des matières organiques), arrive à créer un court-circuit.

Transfert de charges électriques

Au moment du claquage du gaz dans la cavité, une compensation de charge se produit sur les surfaces de cette dernière. La tension électrique aux bornes de (C_{cv}) décroît d'une petite quantité (ΔU_{cv}) jusqu'à l'effondrement de la décharge. Le phénomène est très rapide, de l'ordre de quelques dizaines de ns, on parle donc d'un phénomène ayant une fréquence de l'ordre du MHz. Également par transfert de charges, sur l'ensemble (C_{cv}) et (C_d) une chute

de tension (ΔU_b) se manifeste sur (C_b). La chute de tension (ΔU_{cv}) aux bornes de (C_{cv}) et (C_d), induit un transfert de charges électriques (Δq) :

$$\Delta q = \Delta U_{cv} \frac{C_{cv} C_d}{C_{cv} + C_d} = C_b \Delta U_b \quad (1.34)$$

Si on prend en compte que $d_1 \ll d$ et que $C_{cv} > C_d$, alors ΔU_b devient :

$$\Delta U_b \approx \Delta U_{cv} \frac{C_d}{C_b} \quad (1.35)$$

En pratique, c'est la chute de tension (ΔU_b) sur (C_b), causée par le transfert de charges (Δq), qu'on décèle avec les circuits de mesure.

1.2.6.2 Effet de pointe

Les systèmes d'isolation dans l'équipement électrique de puissance contiennent souvent des inclusions ou des irrégularités de formes géométriques pointues qui engendrent un manque d'uniformité dans le champ électrique. À titre d'exemple, dans le cas d'une configuration d'électrodes pointe-plan, on démontre que le champ électrique au voisinage de la pointe prend des valeurs beaucoup plus importantes que près du plan de neutre. Si la pointe est assumée avoir une forme hyperbolique, la formule qui permet de calculer analytiquement le champ maximal au sommet de la pointe est donnée par (Mason, 1955) :

$$E_{\max} = \frac{2U \sqrt{\left(1 + \frac{r}{d}\right)}}{r \ln \left(\frac{r + 2d + 2\sqrt{d(d+r)}}{r} \right)} \quad (1.36)$$

Avec :

U : Le potentiel électrique à la pointe [V],

d : La distance entre les électrodes [m],

r : Le rayon de courbure au sommet de la pointe [m].

Dans le cas $r \ll d$, l'équation (1.36) prend une forme simplifiée :

$$E_{\max} = \frac{2U}{r \ln \left(1 + \frac{4d}{r} \right)} \quad (1.37)$$

Par ailleurs, il est bien connu que le champ électrique intense au sommet de la pointe affecte significativement la rigidité diélectrique du système. En effet, si le seuil de champ critique est dépassé, ce qui est souvent le cas dans l'équipement électrique de puissance, le milieu voisinant de la pointe devient susceptible à l'activation des décharges partielles ou à l'amorçage d'arbres électriques.

1.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu sur la théorie de la rupture électrique dans les isolants et les mécanismes qui expliquent l'activation des décharges partielles dans un milieu gazeux. Dans le prochain chapitre, nous présenterons la problématique industrielle liée au phénomène de DP pour les transformateurs de puissance. L'état de l'art des différentes méthodes de détection et d'analyse sera aussi introduit.

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE INDUSTRIELLE ET ÉTAT DE L'ART POUR LA MESURE DES DÉCHARGES PARTIELLES

Dans ce présent chapitre, nous exposerons dans un premier lieu la problématique industrielle liée aux DP, spécifiquement pour le cas des transformateurs de puissance. Dans un second volet, nous dresserons un portrait de l'état de l'art concernant les méthodes actuelles de détection et d'identifications des DP. Vers la fin de ce chapitre, nous présenterons la contribution et les objectifs visés par cette thèse.

2.1 Problématique industrielle

Un obstacle important qui affecte la pérennité des équipements de haute tension électrique est la détérioration, progressive et systématique, du système d'isolation par l'action des DP.

Au Québec, la majorité des transformateurs de puissance ont été mis en service il y a plusieurs décennies, le maintien de l'âge moyen du parc a été obtenu uniquement par l'extension et l'agrandissement de ce parc durant les années 1960-1980. Ceci n'est plus vrai depuis les années 2000. C'est donc, un vieillissement de l'âge moyen du parc électrique qui est attendu dans les années à venir. Comme tout appareil à haute tension, les transformateurs de puissance sont généralement conçus pour une durée de vie allant de 30 à 50 ans. Cependant, pour des raisons purement économiques, le maintien de ce parc en service aussi longtemps que possible sans risque de pannes inattendues est plus qu'une nécessité.

Ces dernières années, une forte tendance a été constatée pour le développement de méthodes et d'outils dans le but de prolonger la durée de vie utile des équipements électriques et par conséquent la pérennité du réseau. Ces méthodes sont employées comme un moyen pour améliorer l'efficacité des systèmes, la disponibilité des équipements et la réduction des dépenses attribuables aux défaillances et à l'entretien.

Spécifiquement dans le secteur électrique, les transformateurs de puissance sont parmi les plus importants appareils qui peuvent profiter de cette approche (Mackenzie *et al.*, 2010; Wan *et al.*, 2011).

2.1.1 Les transformateurs de puissance

La norme ANSI/IEEE définit un ‘**transformateur**’ comme un dispositif électrique statique, n'impliquant aucune pièce en mouvement continu, utilisé dans les systèmes d'alimentation électrique pour transférer de l'énergie entre deux circuits au moyen d'un champ électromagnétique commun. Le terme ‘**transformateur de puissance**’ permet de désigner les transformateurs utilisés entre les générateurs et les circuits de distribution. Ils opèrent habituellement à des niveaux de 500 kVA et plus.

Les transformateurs de puissance (*voir* Figure 2.1) sont des éléments vitaux de la transmission d'énergie électrique. Pour transporter économiquement l'énergie électrique produite par les sources jusqu'aux utilisateurs finaux, la tension est transformée au départ (‘basse’ à ‘élevée’) pour minimiser les pertes ohmiques dans les lignes de transport et ensuite est baissée au niveau usager selon les besoins. C'est donc un rôle important et stratégique que jouent les transformateurs à haute tension (THT) dans les réseaux de distribution d'énergie électrique.



Figure 2.1 Exemple d'un transformateur à haute tension
(<http://solvinginc.com/transformers.htm>)

À noter, les THT sont parmi les appareils les plus coûteux et par conséquent, ils prennent une grande part dans l'investissement des circuits de puissance. Leur fiabilité est donc cruciale pour le bon fonctionnement du réseau. Des systèmes de diagnostic et de prévention de défaillances pour ces appareils seraient d'une valeur appréciable.

2.1.2 Système d'isolation des transformateurs

Pour les transformateurs de puissance, la combinaison papier-huile est largement utilisée comme système d'isolation (*voir* Figure 2.2). De tous les composants constituant un transformateur, son système d'isolation reste le composant le plus sensible aux défaillances (Jongen *et al.*, 2005b; Massingue *et al.*, 2006; Sokolov *et al.*, 2001). À partir du moment où un transformateur est mis en service, son système d'isolation, que ça soit un système à l'état solide ou liquide ou une combinaison des deux, subit un processus lent et irréversible de dégradation. La cause la plus fréquente de cette dégradation est l'activation des DP, soit dans des cavités gazeuses où à la surface de l'isolant (Bartnikas, 2002).

L'influence des décharges partielles sur la durée de vie du système d'isolation est reconnue depuis longtemps. Chaque événement de décharges partielles cause une dégradation de la

matière par l'impact de l'énergie des électrons ou des ions accélérés, ce qui provoque des transformations chimiques de toutes sortes.

Pour l'isolant 'papier', sa dégradation est étroitement liée à la dépolymérisation de sa principale constituante chimique : la cellulose. Tandis que pour l'élément 'huile', sa dégradation est synonyme de la rupture de sa liaison moléculaire carbone-hydrogène.

Des études statistiques et empiriques ont bien montré que la pérennité des transformateurs à haute tension est en grande partie affectée par l'endommagement de leur système d'isolation sous l'effet de l'activité des décharges partielles (Jongen *et al.*, 2005a; Sokolov *et al.*, 1999).



Figure 2.2 Transformateur de puissance
isolation papier huile (ABB)

2.1.3 Le besoin de la supervision en ligne

La mise hors service inattendue des transformateurs de puissance pourrait engendrer de graves répercussions économiques, sociales et environnementales. Par exemple, les répercussions économiques d'une interruption électrique, de quelques heures seulement, sur les activités d'une aluminerie seraient catastrophiques. Les pertes économiques dues aux coûts des opérations de maintenance non programmées et de l'énergie électrique non produite se chiffrent en million de dollars. De plus, en cas de défaillance totale, le

remplacement d'un transformateur géant nécessiterait toute une logistique adaptée et très coûteuse.

Du côté résidentiel, une interruption électrique prolongée mettrait en péril la santé et la sécurité des résidents de l'agglomération concernée. Aussi, dans le cas des transformateurs à huile, certaines défaillances risquent de déverser des milliers de litres d'huile dans l'environnement et de provoquer de sérieux incendies.

Pour éviter de telles situations, une confirmation des performances des matériaux isolants pour leurs fonctions spécifiques dans le système est indispensable. D'où le besoin et le souhait d'implanter pour chaque transformateur un système de surveillance en temps réel si c'est possible, non destructif et fiable (Alireza *et al.*, 2004; Kuo, 2009; Kuppuswamy et Coquelin, 2005) qui aura pour objectif l'évaluation continue de sa disponibilité tout au long de sa vie utile, la localisation et la reconnaissance du développement des défauts à un stade précoce et enfin la détermination des plans de maintenances adéquats.

Les études des mécanismes de défaillance ont toujours démontré que l'activité des décharges partielles est un indicateur fiable et précoce de nombreuses anomalies et qu'elle est également liée à la durée de vie résiduelle du système d'isolation (Stone *et al.*, 1988). La détection précise de l'activité des décharges partielles pourrait donc donner de précieuses alertes de prévention d'éventuels défauts et pourrait aussi fournir des informations utiles au sujet de la durée de vie résiduelle de l'isolant.

Le fait que les décharges partielles ont la propriété d'être à la fois un indicateur et la principale cause de dégradation du système d'isolation explique pourquoi la mesure et le diagnostic des décharges partielles est devenu un moyen très attrayant pour superviser l'état de l'appareillage à haute tension (Power & Energy Society, 2010; Stone, 2005). L'évaluation de l'ampleur et de la nature des décharges partielles a été considérée par plusieurs études comme un moyen de diagnostic fiable et précieux pour se renseigner sur l'état d'un système d'isolation.

Ces dernières années, une forte tendance a été constatée pour le développement de nouvelles méthodes de détection et de reconnaissance des signatures de décharges partielles dans les différents domaines de la physique et pour différentes applications en électrotechnique. La caractérisation de ces signatures de DP peut donner des informations supplémentaires quant à la nature et à l'ampleur des défauts.

2.2 Revue de littérature – État de l'art du domaine

Avant de définir les objectifs de ce projet de recherche, une revue de littérature a été effectuée selon deux grands axes comme le montre le diagramme de la Figure 2.3. Le premier, aborde l'aspect fondamental du mécanisme des décharges partielles. Le second, et qui nous intéressait le plus, touche les moyens et les méthodes de détection et de mesure des décharges partielles.

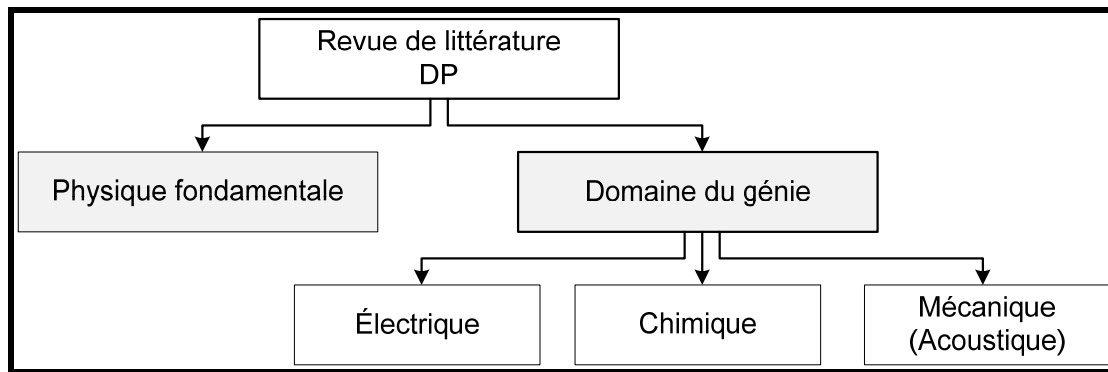


Figure 2.3 Plan de la revue de littérature

Du côté fondamental, beaucoup de recherches ont été entreprises depuis plusieurs décennies pour cerner et comprendre les phénomènes physiques des DP. Parmi les chercheurs les plus connus dans ce domaine, nous pouvons citer Townsend, Bartnikas, McMahon, Kreuger, Gulski (Bartnikas *et al.*, 1979; Boggs, 1990b; Kreuger *et al.*, 1993). Le chapitre 1 de cette thèse a exposé quelques études qui ont tenté d'expliquer le phénomène des DP et leurs processus d'activation.

Du côté application, puisque les décharges partielles sont un phénomène physique d'origine électrique et qui a des effets chimiques et mécaniques, beaucoup de recherches ont été entamées ces dernières années dans ces trois grands axes. Ces recherches étudient les différents aspects des DP, comme leur détection, l'estimation de leur intensité, la reconnaissance de leurs signatures et l'interprétation des données dans l'objectif d'avoir des réponses fiables sur l'état de l'isolation des appareils haute tension.

2.2.1 Méthodes de détection et de mesure des DP

Étant donné que les DP ne peuvent pas être mesurées directement, leurs méthodes de détection et de mesure sont généralement basées sur l'évaluation et l'identification des différents types d'échanges d'énergie qui se manifestent au moment de la décharge, telles que le rayonnement électromagnétique, le transfert de charge électrique, les ondes ultrasonores, les pertes diélectriques et les réactions chimiques.

Les mesures de DP ont acquis une grande importance au cours des quatre dernières décennies et le grand nombre de publications dans le domaine témoigne de cet intérêt.

La section suivante introduit les plus importantes méthodes de détection de décharges partielles utilisées à ce jour dans les équipements de haute tension et spécifiquement dans les transformateurs de puissance.

2.2.1.1 Techniques électriques

Les techniques électriques de détection de décharges partielles sont les techniques les plus utilisées dans plusieurs circonstances. Elles peuvent être classées en trois types de mesure :

- Techniques s'intéressant à la mesure de pertes diélectriques dues à l'activité des DP (*'Test Tip-Up'* (Findlay *et al.*, 1959; Power & Energy Society, 2001), Analyseur de pertes diélectriques (Dakin et Malinaric, 1960; Simons, 1980)),
- Techniques mesurant les impulsions de décharge (coupleur capacitif, transformateur de courant),

- Mesures se basant sur l'effet du champ électromagnétique associé aux sources de décharges (fenêtres diélectriques, antenne UHF).

Relativement à notre sujet de recherche, nous nous limiterons dans cette sous-section juste aux deux dernières méthodes : le couplage capacitif et les fenêtres diélectriques.

Coupleur capacitif

Cette méthode vise à détecter les impulsions rapides (qui durent quelques nanosecondes) de courant dues aux transferts de charges déclenchés par l'activité des décharges partielles. La détection s'accomplit par le montage d'un coupleur capacitif (C_k) en parallèle avec l'objet à tester comme indiqué au schéma de la Figure 2.4.

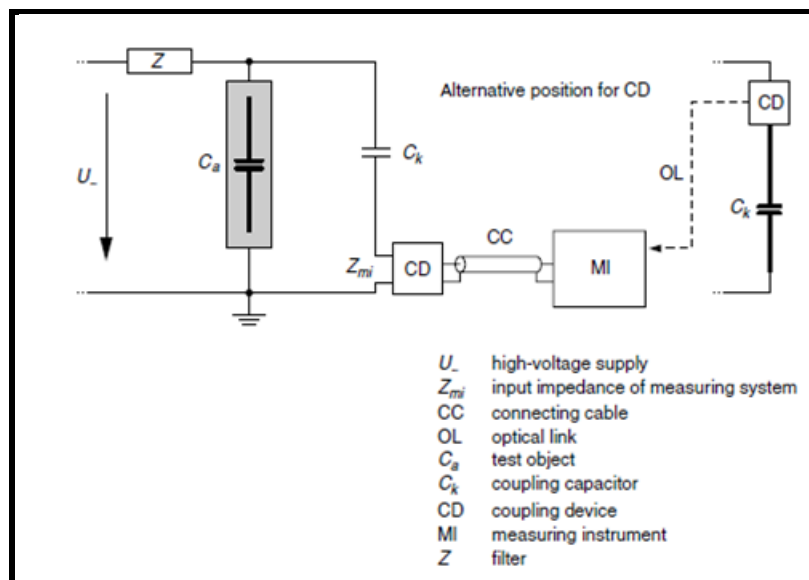


Figure 2.4 Diagramme conventionnel de mesure de DP
par la méthode couplage capacitif

Tirée de *Power & Energy Society* (2009, p.32)

La capacité de couplage (C_k) ainsi que les raccordements haute tension doivent être libres de décharges pour toute tension appliquée durant le test. La valeur recommandée pour (C_k) est généralement comprise entre 300 pF et 1 nF (Power & Energy Society, 2009).

Les signaux issus du coupleur sont envoyés vers une impédance de mesure avant d'être acheminés ensuite vers un système de mesure qui est généralement un analyseur d'amplitude d'impulsions.

Kurtz et Stone furent parmi les chercheurs à adapter cette méthode aux alternateurs hydroélectriques au Canada (Kurtz et Stone, 1979). Beaucoup d'appareils sensibles et efficaces basés sur cette technique sont pleinement utilisés dans l'industrie et aussi dans les laboratoires. Auparavant, cette technique s'utilisait au cours des arrêts programmés, mais ultérieurement Kurtz *et al.* (Kurtz *et al.*, 1980) décrivaient comment ces coupleurs capacitifs peuvent être fixés en permanence de telle sorte que les mesures peuvent être effectuées sans interruption de service.

Les impulsions de décharges partielles enregistrées par le système de mesure de cette méthode sont souvent quantifiées dans le cas de tension alternative par le quadruplet (q_i, V_i, t_i, ϕ_i) avec :

q_i : Charge apparente [C],

V_i : Tension instantanée correspondante à (q_i) [V],

t_i : Instant de l'occurrence de (q_i) [s],

ϕ_i : Position dans la phase de (q_i) [degré].

Le système de mesure comprend généralement une unité de post-traitement des données enregistrées utilisée pour des fins d'évaluations plus poussées menant à la détermination d'autres paramètres utiles d'ordre statistique ou graphique. Le but est d'aider l'utilisateur à avoir des indications rapides sur la qualité de l'isolation de l'objet testé. À titre d'exemple, il est fortement recommandé d'afficher un diagramme de résolution dans la phase de la signature de DP. Ce dernier peut non seulement assister dans l'identification du type de défauts causant la décharge mais aussi servir comme outil de discrimination de certains bruits

électromagnétiques qui ne sont pas généralement corrélés en la phase (Power & Energy Society, 2009).

Le diagramme de résolution dans la phase de la signature de DP DRPDP est une représentation graphique tridimensionnelle des paramètres (q_i, ϕ_i, n_i) : L'amplitude de l'événement de décharge (charge apparente), le nombre d'impulsions de décharge par unité de temps, et la position de ces impulsions dans la phase (voir Figure 2.5).

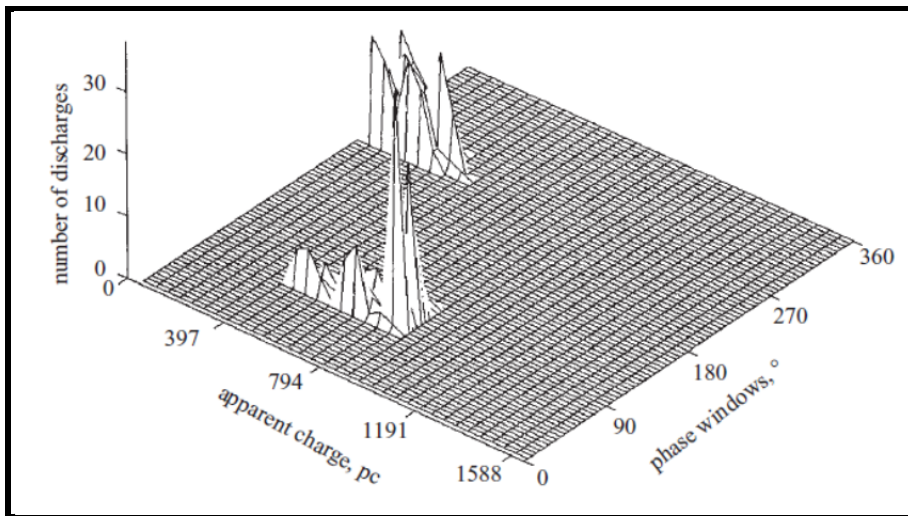


Figure 2.5 Exemple de diagramme de résolution dans la phase
de la signature de DP en 3D
Tirée de Haddad et al., (2004, p.156)

Une représentation bidimensionnelle est aussi possible pour ce type de digramme utilisant un code de couleur pour le troisième paramètre qui est le nombre de décharges (n_i) (voir Figure 2.6).

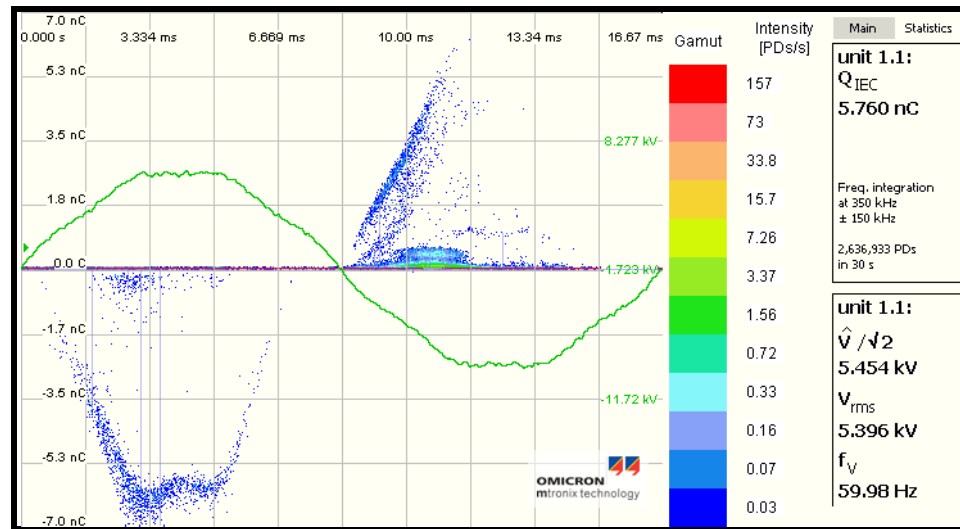


Figure 2.6 Exemple de diagramme de résolution dans la phase en 2D
Décharges à l'intérieur d'une bulle dans de l'huile minérale

Il est facilement admis que les informations contenues dans ces diagrammes sont d'une grande utilité pour l'évaluation de l'intégrité du système d'isolation. Cependant, en pratique, l'interprétation de ces diagrammes ne se prête pas de façon automatique et sans ambiguïté comme on peut le penser du premier coup. Un ensemble de facteurs tels que les interférences externes et la complexité des mécanismes de décharges reliés aux différents types d'isolation complexifient cette interprétation et limitent la portée de cette méthode aux experts du domaine (Stone, 1991).

Il convient de noter que les changements dans la forme de la signature de décharges en fonction du temps sont maintenant également reconnus comme indicateurs potentiels de la nature, et de l'étendue de l'activité des décharges partielles. Aussi les changements dans les différents moments statistiques de la distribution des événements de décharges (la moyenne, la variance, etc.) commencent à montrer des corrélations avec des formes spécifiques de dégradations associées à l'activité des décharges partielles (Haddad *et al.*, 2004).

Par contre, les techniques électriques basées sur le principe de couplage capacitif présentent certaines limites. Elles restent incapables de détecter les foyers des décharges. En plus, leur sensibilité diminue avec l'augmentation de la capacitance de l'objet testé tels les

transformateurs à haute tension (Rajani *et al.*, 2001) ce qui rend leur utilisation en ligne presque impossible.

Des recherches sont encore en cours dans cet axe pour améliorer la manière dont se fait la mesure des décharges et aussi dans le but d'automatiser l'analyse et l'interprétation des résultats des tests qui ne se fait jusqu'à maintenant que par des experts (Ramakrishnan et Suresh, 2005; Satish et Walter, 1994).

Les fenêtres diélectriques

Cette méthode est basée sur la détection d'ondes électromagnétiques de très haute fréquence (UHF) émises par la source de DP. Les impulsions de courant de DP impliquent généralement des temps de montés de moins de 1 ns, ce qui induit des signaux électromagnétiques dans la gamme UHF (300-3000 MHz) (Bartnikas, 2005; Judd *et al.*, 2002) excitant l'enceinte de l'équipement dans différents modes de résonance électrique (Judd *et al.*, 1996) et qui peuvent persister jusqu'à une microseconde. Les résonances sont considérées comme des symptômes de l'activité des décharges partielles, elles peuvent être captées par des sondes UHF (antenne), placés à l'intérieur ou sur le bâti de l'équipement et être visualisées sur un analyseur de spectre. Les détecteurs UHF doivent avoir une largeur de bande élevée (Jongen *et al.*, 2005b; Judd *et al.*, 1995) parce que le contenu fréquentiel des signaux peut varier considérablement en fonction de l'emplacement de la décharge et du trajet du signal. Une sensibilité minimale de l'ordre de 6 mV/Vm^{-1} dans la gamme de fréquences de 500 à 1500 MHz est nécessaire (Judd *et al.*, 2001).

Parce que les équipements électriques sont souvent contenus dans des enceintes métalliques, les ondes électromagnétiques ne peuvent se propager à l'extérieur du bâti (cage de Faraday). Par conséquent, des ouvertures (fenêtres) couvertes de matériau diélectrique (pour maximiser le transfert d'énergie) sont généralement créées sur les couvercles des bâtis pour avoir une vue sur ces ondes électromagnétiques. La Figure 2.7 montre un exemple de fenêtre

diélectrique contenant un capteur UHF sur un transformateur de puissance (Judd *et al.*, 2005).

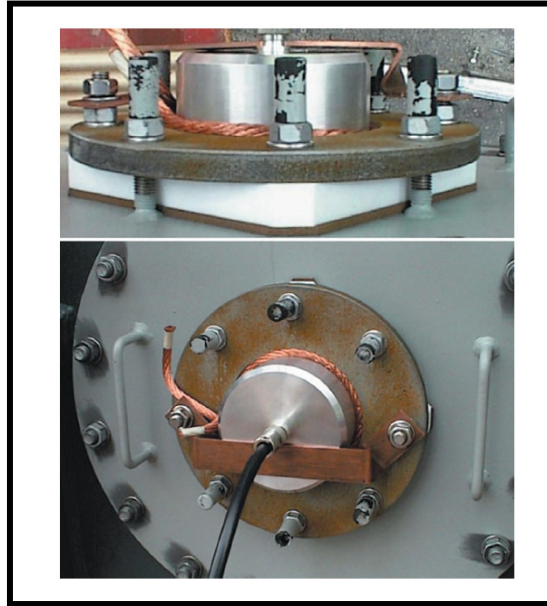


Figure 2.7 Exemple de fenêtre diélectrique sur un couvercle de transformateur
Tirée de Judd et al., (2005, p.6)

La Figure 2.8 montre un diagramme typique de système de mesure basé sur la détection UHF. Les signaux reçus sur les détecteurs UHF sont acheminés vers une unité d'acquisition (analyseur de fréquence ou oscilloscope rapide), puis enregistrés sur un ordinateur pour le post-traitement (analyses et visualisations des données).

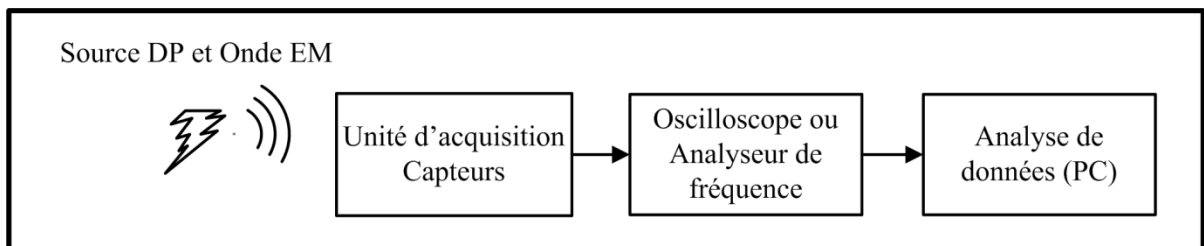


Figure 2.8 Diagramme de base d'un système de mesure UHF

Le délai de propagation de l'onde électromagnétique est insignifiant comparé hâtivement à la période du cycle d'alimentation. De ce point de vue il peut être donc considéré comme instantané. Par conséquent, pour l'interprétation et la classification des DP, la génération de diagramme de résolution dans la phase identique à celui obtenu par la méthode conventionnelle est possible si l'acquisition du signal est synchronisée avec la tension d'alimentation.

Un grand avantage de la technique UHF est son excellent rapport signal-bruit (Tavner, 2008) (voir Figure 2.9) qui permet facilement de distinguer entre les signaux de décharges et les signaux parasites (Jongen *et al.*, 2005b; Tenbohlen *et al.*, 2008). En outre, si plusieurs capteurs sont installés, la localisation des foyers de décharges peut être estimée par l'utilisation du principe du temps de vol des ondes UHF.

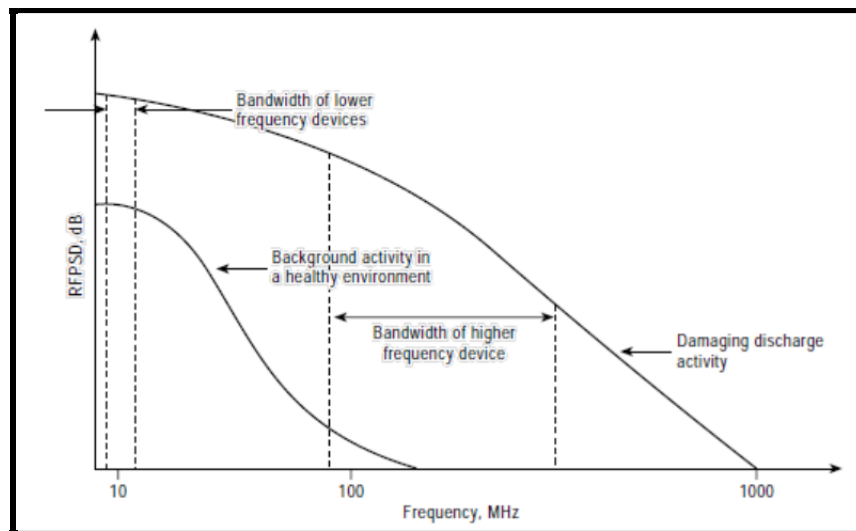


Figure 2.9 L'énergie radiofréquence émise par les bruits de fond et l'activité de décharge
Tirée de Tavner (2008, p.237)

Initialement, la méthode UHF a été développée dans les années 1980 pour les sous-stations à isolation gazeuse (*Gas Insulated Substations GIS*) (Boggs et Stone, 1982; Hampton et Meats, 1988). Elle s'est révélée très efficace, et de nombreux articles sont publiés sur le sujet. Plusieurs outils de diagnostic des GIS à travers le monde utilisent cette technique et sont

proposés à travers des solutions commerciales. Récemment, son application s'étend au diagnostic des transformateurs de puissance, et bien qu'elle soit en cours de développement elle a montré un grand potentiel pour la détection en ligne, la reconnaissance et la localisation de l'activité des sources de DP.

2.2.1.2 Techniques chimiques

Les techniques chimiques se sont avérées comme de précieux et fiables outils de diagnostic pour la détection des états de défauts dans les transformateurs à isolation papier huile. Elles se basent sur la mesure et l'analyse des composants résultant des réactions chimiques qui se manifestent lors du processus de décharges électriques.

Les deux principales techniques utilisées de nos jours sont l'analyse des gaz dissous DGA et la chromatographie.

La technique DGA identifie le niveau des gaz dissous dans l'huile, produits par la dégradation de cette dernière dans le transformateur. Le test consiste en la détermination de la concentration des différents types de gaz dissous dans un échantillon pris du transformateur. Parmi les gaz mesurés, on trouve l'acétylène (C_2H_2), le méthane (CH_4), l'hydrogène (H_2), le dioxyde de carbone (CO_2), et l'éthylène (C_2H_4) (Kemp, 1995). Cette technique permet, en plus de la détection de la présence des décharges, de faire des corrélations entre le niveau des gaz dissous et les types de défauts dans le transformateur. Bien que cette technique soit très répandue (elle n'est pas coûteuse), il existe encore des débats sur la question de la corrélation entre un défaut spécifique et le niveau de chaque type de gaz dissous. Certains experts avancent que le taux d'augmentation de ces gaz est plus important que la mesure absolue de leurs niveaux (Duval, 1989).

La deuxième méthode, la chromatographie, consiste à mesurer la concentration de la matière dégradée provenant de l'isolant papier qui est le glucose et ses dérivés. Comme le DGA cette méthode présente certaines incertitudes concernant la corrélation entre la concentration en

glucose et le type de défaut, dû à l'instabilité des dérivés du glucose et à la faible solubilité du glucose dans l'huile minérale (Kemp, 1995).

Les techniques chimiques présentent deux limitations majeures. Elles sont incapables de localiser les foyers des décharges partielles et leur application en ligne est presque impossible. Cependant dans la dernière décade, beaucoup de recherches se sont attaquées à l'utilisation de techniques issues de l'intelligence artificielle pour assister les méthodes chimiques quant à la prise de décision et l'implantation en ligne. Parmi ces techniques, on peut nommer les systèmes experts, la logique floue et les réseaux de neurones (Hong-Tzer et Chiung-Chou, 1999; Shintemirov *et al.*, 2009).

2.2.1.3 Techniques mécaniques (émission acoustique)

Les techniques acoustiques sont employées massivement dans l'analyse des défaillances et en contrôle non destructif dans les machines tournantes. Par contre, dans l'analyse des DP, si elles sont beaucoup utilisées pour le cas des machines tournantes et des câbles extrudés de haute tension, ce n'est que tout récemment que des chercheurs essaient de les utiliser pour les transformateurs à haute tension.

Hong Zhao *et al.* proposaient en 2007 un nouveau capteur acoustique pour la détection des décharges partielles dans les transformateurs de puissance (Li *et al.*, 2007).

S. M. Markalous *et al.* publiaient en 2008 une étude sur l'utilisation des signaux acoustiques et électromagnétiques en la détection des décharges partielles dans les transformateurs de puissance (Markalous *et al.*, 2008).

Su-Yeon Choi *et al.* ont publié en 2008-2009 une analyse fréquentielle des signaux acoustiques émis par les décharges partielles et un algorithme de localisation de la source de la DP dans un transformateur à isolation huile (Kil *et al.*, 2009; Su-Yeon *et al.*, 2008).

La Figure 2.10 montre un exemple d'application de cette technologie à un transformateur (Chen *et al.*, 2005).



Figure 2.10 Décharges partielles et technologie acoustique
Tirée de Chen et al., (2005, p.2504)

La technique acoustique est une méthode non intrusive basée sur la détection du signal acoustique émis par la libération rapide de l'énergie provenant d'une source de décharge partielle. La décharge agit comme une sorte de source ponctuelle d'ondes élastiques transitoires dans la gamme des ultrasons, habituellement entre 20 kHz et 1 MHz, se propageant à travers l'isolation. Ces dernières peuvent être détectées sur les parois de l'objet testé en utilisant des capteurs ayant habituellement une bande passante centrée à environ 60 kHz ou 150 kHz (Power & Energy Society, 2007). Les signaux captés sont traités par des systèmes conventionnels d'acquisition de données.

Malheureusement, bien qu'il ait été démontré dans le cas des géométries simples, l'existence d'une proportionnalité entre la tension mesurée et la taille de la décharge (charge apparente), en raison de la complexité des impédances acoustiques associées à la propagation de l'onde (phénomène de réflexion, d'absorption, etc.), aucune calibration efficace n'est possible pour les installations de forme complexe (Haddad *et al.*, 2004). D'un autre côté, connaissant la vitesse de déplacement de l'onde acoustique et la règle qui stipule que l'énergie émise est inversement proportionnelle au carré de la distance entre la source et le capteur (De Silva,

2007a; Rajani *et al.*, 2001), nous pouvons utiliser ces propriétés dans les algorithmes de localisation des foyers de décharge. Il s'agit de mesurer le temps d'arrivée relatif à chaque capteur. Avec un minimum de quatre capteurs géoréférencés au préalable, un principe de triangulation peut être employé pour identifier les coordonnées spatiales de la source de décharge.

Le Tableau 2.1 donne quelques exemples de vitesse de son dans différents matériaux.

Tableau 2.1 Vitesse de son dans différents matériaux

Type	Matériau	Vitesse de son (ms^{-1})
Gaz	Air	343
	Vapeur	494
Liquide	Huile de transformateur	1425
	Eau	1497
Solide	Plexiglas	2680
	cuivre	5010
	Fer	5950

Les capteurs acoustiques (*voir* Figure 2.11) sont essentiellement des transducteurs piézo-électriques qui permettent de convertir le signal acoustique (mécanique) en charge électrique.



Figure 2.11 Capteur ultrasonique
(www.ndbtech.com)

Généralement, les capteurs acoustiques sont dotés d'une base isolante qui leur confère la propriété d'être indépendant des interférences électromagnétiques. Pour avoir le maximum de sensibilité, le capteur doit être attaché à la paroi de l'objet testé de manière à minimiser la perte d'énergie à travers le matériau d'interface. L'interposition d'une fine couche de gel visqueux est fortement conseillée pour remédier à l'irrégularité et la rugosité de la surface de la paroi de l'objet testé.

Les méthodes acoustiques présentent plusieurs avantages, citons :

- Elles sont indépendantes des bruits électromagnétiques ce qui les rend intéressantes pour utilisation sur site (*on line*),
- Elles sont recommandées pour les appareils ayant une large capacitance,
- Elles offrent un potentiel intéressant pour la localisation des foyers des décharges partielles.

L'application de cette méthode aux transformateurs à haute tension peut être considérée comme relativement récente. Elle offre encore un grand champ de recherche, notamment dans la reconnaissance des signatures de décharges associé aux différents types de défauts (décharges de surface sur les traversées, décharges internes dans des cavités gazeuses, etc.) (Boczar *et al.*, 2009; Kundu *et al.*, 2008), dans l'élimination des bruits (signal denoising) (Kweon *et al.*, 2005; Tang *et al.*, 2009) et aussi dans l'élaboration d'algorithmes efficaces pour situer les foyers de décharges (Felizardo *et al.*, 2009; Xiaodi *et al.*, 2008).

2.2.2 Portrait de la recherche dans le domaine

Actuellement, la recherche dans le domaine des décharges partielles se focalise dans deux grands axes : Le premier axe concerne le **développement de méthodes pour l'identification et l'interprétation des signatures de décharge en fonction du type et de la taille des défauts**. Une tendance vers l'automatisation des analyses par le biais des outils de l'intelligence artificielle, pour une future intégration dans des systèmes de contrôle en ligne, est également constatée. Wang, Yu a publié en 2011 une nouvelle méthode de

reconnaissance automatique de la signature de décharges dans le cas des transformateurs. La méthode introduit l'utilisation des réseaux de neurones dans l'interprétation des données extraites des signaux issus de capteurs acoustiques (Wang, 2011). A. Cavallini, G. Montanari *et al.* ont publié en 2008 une investigation sur la reconnaissance des décharges partielles à partir de défauts artificiels créés dans une isolation papier huile afin d'améliorer la fiabilité des transformateurs (Xiaolin *et al.*, 2008). Cheng-Chien Kuo a proposé en 2009 un système artificiel de reconnaissance des décharges partielles par émission acoustique dans les transformateurs à époxy-résine (Kuo, 2009).

L'équipe du Département électrique et informatique de l'Université de Virginia, Zhenyuan Wang *et al.*, a proposé en 2009 un outil de diagnostic pour le contrôle (*on line and off line*) des transformateurs à haute tension, basé sur l'analyse des gaz dissous, en utilisant une combinaison d'algorithmes de réseaux de neurones artificiels et système expert (Yishan *et al.*, 2009).

Le second axe concerne le **développement d'algorithmes et de méthodes pour le traitement des signaux de décharges et la localisation de leurs foyers.**

J. Tang et Y. Xie ont publié un nouvel algorithme de localisation de foyer de décharges, basé sur la différence de temps sur une courbe d'accumulation d'énergie de plusieurs signaux (Tang et Xie, 2011). Judd *et al.* ont proposé une modélisation de la propagation des signaux UHF dans un transformateur par la méthode FDTD (*Finite-Difference Time-Domain*) avec pour objectif d'une meilleure localisation de source de décharge (Ishak *et al.*, 2010).

Dans le domaine du traitement, des chercheurs se sont intéressés aux outils *wavelet* pour le filtrage des signaux de décharges partielles (Luo et Zhang, 2011; Tang *et al.*, 2009).

En outre, pour profiter des avantages des différentes méthodes de détection et améliorer la fiabilité des systèmes de contrôle, la combinaison de données issues de différents systèmes de mesure a fait aussi l'objet de récentes études (Reid *et al.*, 2011; Rudd *et al.*, 2010).

2.3 Objectifs de projet de recherche

Pour les systèmes d'isolation en service, comme on l'a montré dans ce chapitre, il est donc opportun d'employer des techniques non destructives et directes (*on-line*) pour la détection et le diagnostic des DP et ceci afin de déterminer si une intervention de maintenance préventive est requise et ultimement pour prévenir une défaillance en service. Ainsi, d'énormes pertes matérielles peuvent être épargnées, tout en améliorant la pérennité du réseau électrique, la sécurité et la disponibilité des équipements. C'est spécifiquement dans ce cadre que vient s'intégrer notre projet de recherche. **Il consiste à investiguer le potentiel d'une nouvelle génération de capteurs piézoélectriques pour la détection de décharges partielles.**

Des coupleurs piézoélectriques (*voir* Figure 2.12), ayant de très bonnes caractéristiques (bande passante de 20 MHz, flexible, miniature, économiques, etc.) ont été récemment mis au point à l'Institut de Matériaux Industriel (IMI) de Boucherville (Qc., Canada) (Kobayashi *et al.*, 2005). Plusieurs de ces coupleurs ont été fournis par l'IMI à l'ÉTS afin de comparer les mesures électriques provenant de coupleurs capacitifs aux mesures ultrasonores provenant des sondes piézoélectriques. Sur la base de l'intérêt bénéfique que peuvent avoir les outils d'assistance en maintenance préventive des installations électriques basés sur cette nouvelle technologie, tant sur le plan économique (prix de revient faible) que sur le plan de la qualité des diagnostics, le but de ce travail est d'appriivoiser cette nouvelle technologie et de l'adapter à la problématique des décharges partielles.



Figure 2.12 Capteurs piézoélectriques

Les objectifs de ce projet peuvent être énumérés comme suit :

- L’approvisionnement du potentiel de cette nouvelle technologie dans la détection des DP. Un banc d’essai a été conçu et réalisé pour des fins de validation expérimentale,
- S’assurer de la cohérence ‘métrologique’ de ces capteurs : répétitivité, étalonnage, sensibilité, connectivité, etc.,
- Comparaison des mesures prises par ces capteurs avec des mesures électriques provenant d’un système de mesure conventionnel pour des fins de validation,
- Développement des outils d’acquisition et de traitement des signaux issus des capteurs pour en extraire toutes informations utiles,
- Développement d’algorithme de localisation des foyers de décharges se basant sur le temps de vol des ondes acoustiques et électromagnétiques. Ce dernier objectif est d’une très grande importance pour les applications industrielles,
- La reconnaissance des signatures de décharges associées à certains types de défauts tels qu’une bulle d’air dans de l’huile minérale, et les décharges dues à l’effet de pointe. Une simulation par éléments finis de ces configurations sera aussi présentée.

2.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la problématique industrielle comme telle, et un portrait concis de la recherche dans le domaine de la détection des décharges partielles. Également, nous avons présenté les objectifs de recherche.

Industriellement parlant, nous considérons que la maîtrise des différents aspects de cette technologie aura sans doute un important impact bénéfique et innovateur sur les outils d'assistance en maintenance préventive des installations électriques. Dans le prochain chapitre, nous présenterons la planification des expériences à entamer en vue d'étudier le potentiel des capteurs BIT/PZT.

CHAPITRE 3

MONTAGE EXPÉRIMENTAL

Nous présentons dans ce chapitre le système de mesure que nous avons développé et proposé pour l'étude expérimentale. Le chapitre est constitué de deux sections. La première donne une description des capteurs piézoélectriques employés, du protocole expérimental en général, du banc d'essai proprement dit ainsi que le plan d'expérience qui est proposé. La deuxième section traite de l'analyse des performances métrologiques du système de mesure : son étalonnage et ses analyses de biais et de linéarité.

3.1 Description du système

3.1.1 Présentation des sondes piézocéramiques

Les matériaux piézo-électriques, tels que les piézocéramiques, lorsqu'ils sont comprimés, génèrent une charge électrique proportionnelle à la force appliquée. En tant que tels, une fois intégrés sur la surface d'une sonde portable ou fixés avec une méthode appropriée à une enceinte, ils offrent un moyen simple pour détecter des signaux acoustiques.

Des sondes piézoélectriques opérant à très haute fréquence (*High Temperature Ultrasonic Transducers HTUTs*) ont été récemment mises au point par C. K. Jen *et al.* (Kobayashi et Jen, 2004; Kobayashi *et al.*, 2005) à l'Institut de Matériaux Industriel (IMI) de Boucherville (Qc., Canada). Plusieurs de ces sondes ont été fournies par l'IMI à l'ÉTS afin de comparer les mesures électriques provenant de coupleurs capacitifs aux mesures ultrasonores provenant des sondes piézoélectriques. Neuf films de ces céramiques piézoélectriques sont illustrés à la Figure 3.1.

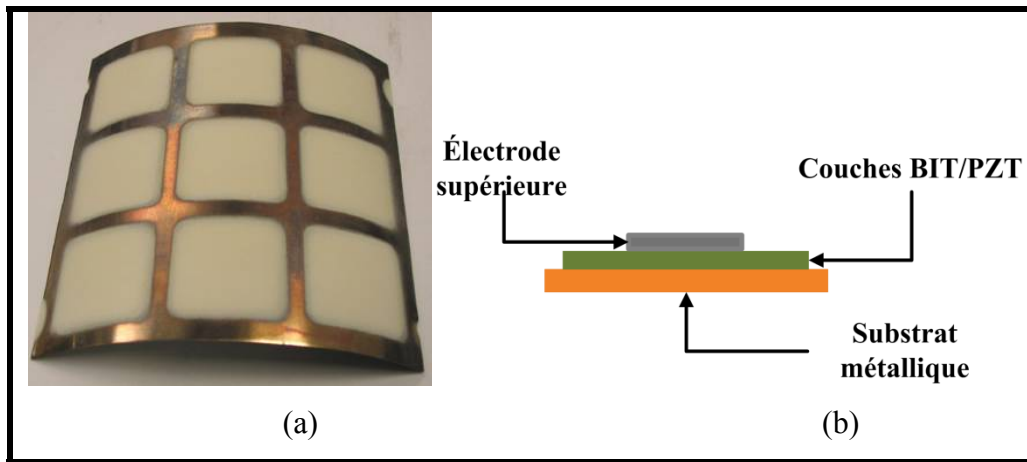


Figure 3.1 Capteurs piézoélectriques HTUTs a) photo b) schéma de principe

Ces sondes sont faites d'un mélange (sol-gel) de BIT (titanate de bismuth), et de PZT (zirconate de plomb titanate), dans un rapport de 1:3. Le BIT a été choisi pour sa haute température de Curie, 675 °C, tandis que le PZT a été sélectionné pour sa bonne constante diélectrique. Le processus d'élaboration de ces sondes est résumé par le diagramme de la Figure 3.2. Il consiste globalement en les étapes suivantes :

- Préparation du mélange BIT/PZT,
- Broyage de la solution pour atteindre la grosseur de grain désirée inférieure à 1µm ,
- Pulvérisation du sol-gel sur un substrat métallique par un pistolet à air,
- Séchage et recuit du mélange à des températures respectivement de 90 °C et de 650 °C par un pistolet à chaleur,
- Polarisation électrique par la technique de décharge de couronne pour conférer au mélange la propriété de piézoélectricité.

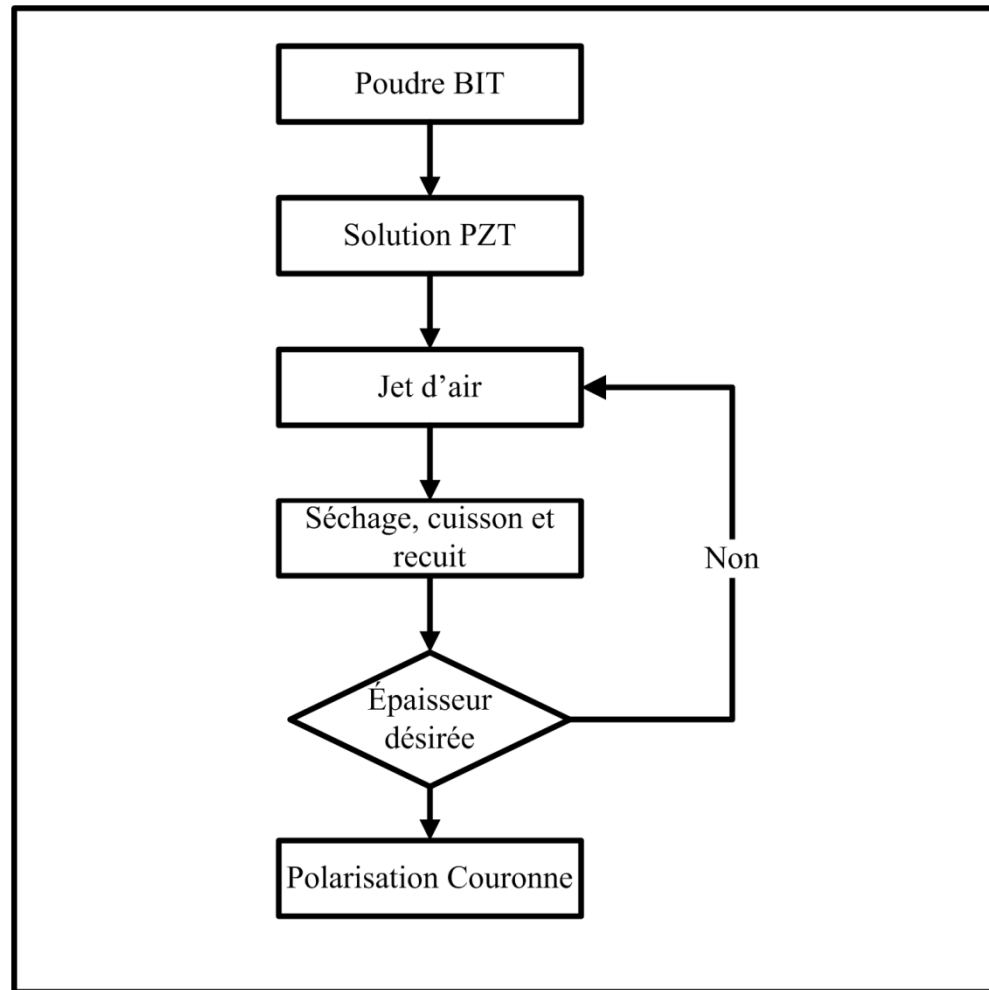


Figure 3.2 Processus d'élaboration d'une sonde piézoélectrique BIT/PZT

Le potentiel de cette nouvelle technologie de sondes repose sur une série d'avantages inhérents. Elles ont une structure légère miniature et malléable (épaisseur de l'ordre de 40–120 μm), ce qui leur confère une très grande flexibilité et la possibilité d'être collées (ou même 'peinturées') sur des surfaces de différentes formes. Elles peuvent être employés dans des conditions d'utilisation difficiles. Elles offrent une grande marge de température d'utilisation (-150 °C à 400 °C) et une constante diélectrique élevée, $\epsilon_r \approx 90$. En outre, elles ne nécessitent aucun couplage électrique et leur coût est très abordable. Pour plus de détails sur la méthode d'élaboration et les propriétés de ces sondes, nous référons le lecteur à (Kobayashi *et al.*, 2004; Kobayashi *et al.*, 2005).

3.1.2 Préparation du capteur

Pour vérifier la réaction de ces sondes piézoélectriques aux ondes acoustiques, une sonde a été collée à l'aide d'une colle à l'époxy sur la surface extérieure d'un bécber en prenant soin d'éliminer les petites poches d'air. Une électrode supérieure a été ajoutée par une colle conductrice en argent. Le capteur ainsi construit a été connecté directement à un oscilloscope numérique. Les réponses de ce capteur à des ondes acoustiques provenant de chocs entre deux tiges en acier ainsi qu'à des décharges partielles produites par une configuration pointe-plan, sont illustrées à la Figure 3.3.

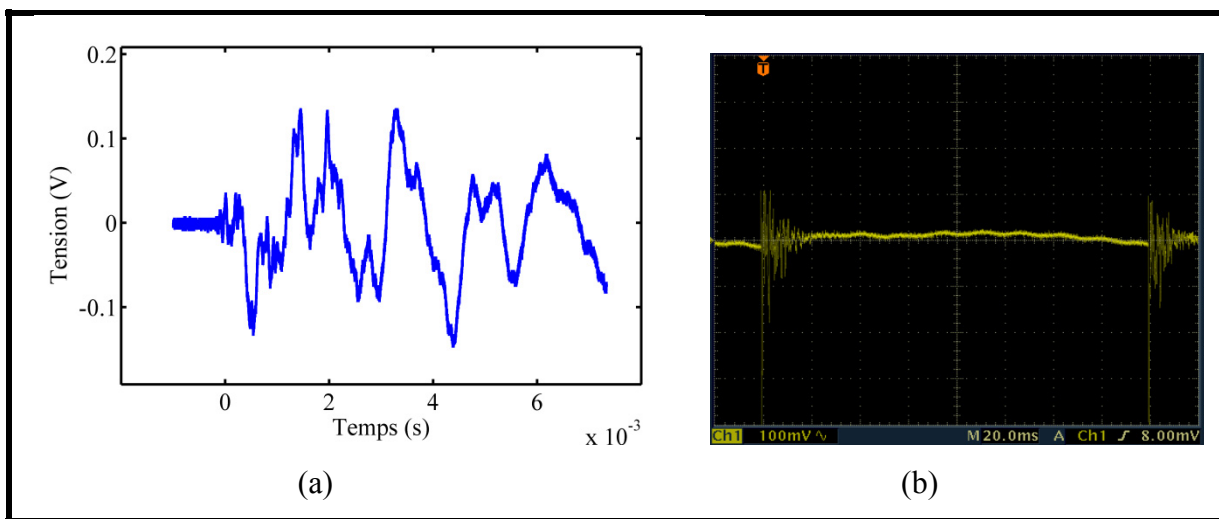


Figure 3.3 Signaux captés par un capteur BIT/PZT après deux types d'excitation
a) Choc mécanique b) Décharge électrique

À priori, ces simples tests démontrent bien que cette nouvelle génération de capteur répond bien aux deux types d'excitation. Une première observation, basée sur les vitesses de propagation des ondes captées, suggère que ces capteurs détectent en plus des ondes acoustiques, les ondes électromagnétiques émises par les impulsions électriques. Ils agissent en quelque sorte également comme une fenêtre diélectrique. Ce résultat intéressant et encourageant a incité l'exploitation de cette capacité pour la détection des décharges partielles. D'autres tests ont été réalisés sur un banc d'essai plus sophistiqué et doté de

plusieurs capteurs. Le protocole expérimental, le banc d'essai, ainsi que le plan d'expérience seront introduits dans les sections suivantes.

3.1.3 Protocole expérimental

Le protocole expérimental, tel que résumé sur le diagramme de la Figure 3.4, consiste à générer des DP sur le banc de test à l'aide d'une source de tension. Les mesures expérimentales seront effectuées en parallèle avec deux dispositifs. Le premier est composé des capteurs BIT/PZT proprement dits, le deuxième consiste en un coupleur capacitif (1nF/20kV) connecté en parallèle avec l'alimentation haute tension. Ce dernier dispositif, qui est une technique de mesure reconnue dans le domaine de la détection de décharges partielles pour laquelle de nombreux équipements commerciaux et fiables sont disponibles, sera employé pour comparer et valider les signaux obtenus par les BIT/PZT. Évidemment, pour réaliser ceci, un post-traitement est nécessaire pour extraire de ces signaux les informations utiles.

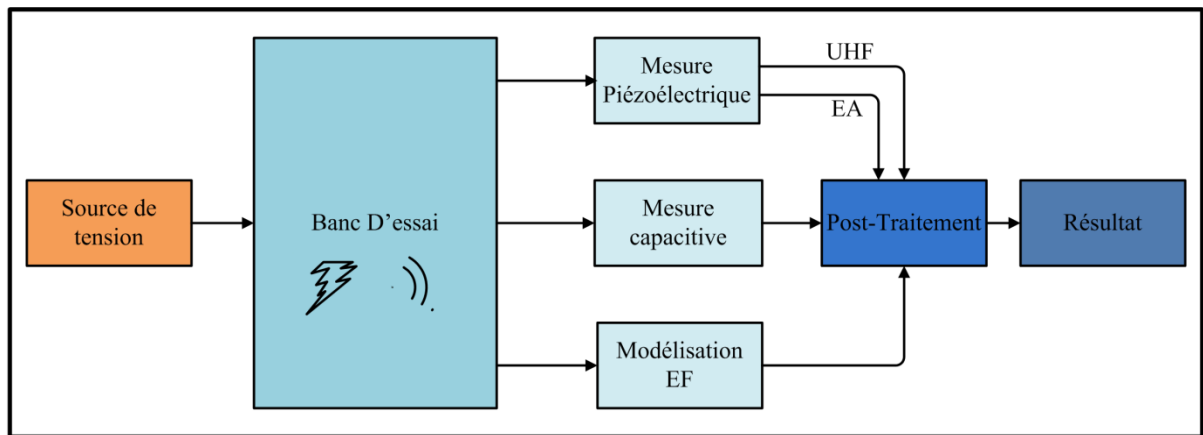


Figure 3.4 Protocole expérimental

Avec ce protocole, on va tenter de vérifier la capacité de ces capteurs à capter les signaux acoustiques ainsi que les signaux ultras hautes fréquences (UHF) émis par une source de décharge artificielle (DP).

Finalement, signalons que les types de défauts qui seront simulés dans le cadre de cette étude sont largement rencontrés dans les transformateurs de puissance, à savoir l'effet de pointe et la présence de bulles de gaz dans un diélectrique. Ils seront utilisés comme source de décharges dans notre dispositif. La modélisation par éléments finis EF de la distribution du champ électrique induit par de telles configurations sera aussi présentée.

3.1.4 Banc d'essai

Le banc d'essai utilisé dans cette investigation est illustré à la Figure 3.5a. Il consiste en une source AC haute tension, connectée à l'objet testé. Ce dernier est logé dans un boîtier en PMMA¹ portant plusieurs capteurs BIT/PZT sur ses côtés à des positions prédéfinies.

Ces capteurs sont directement reliés aux canaux d'un oscilloscope numérique (Tektronix3014B®). Comme mentionné précédemment, pour des fins de validation des résultats, un coupleur capacitif de 1 nF a été monté en parallèle avec le système.

Les décharges partielles sont créées soit par une configuration d'électrodes pointe-plan, soit par une configuration bulle d'air dans un diélectrique (huile minérale dans notre cas). La distance entre les deux électrodes est ajustable par un système vis-écrou. Les trous prépercés dans le couvercle supérieur du boîtier permettent un positionnement prédéterminé du lieu de la décharge dans le plan.

Nous avons conçu le boîtier du banc d'essai tel que représenté dans la Figure 3.5b. La réalisation du boîtier a été effectuée dans les ateliers de l'ÉTS. Cette conception offre l'avantage de pouvoir coller efficacement les sondes piézoélectriques et aussi de modifier, avec une relative précision, la localisation de la source de décharges.

¹ PMMA : polyméthacrylate

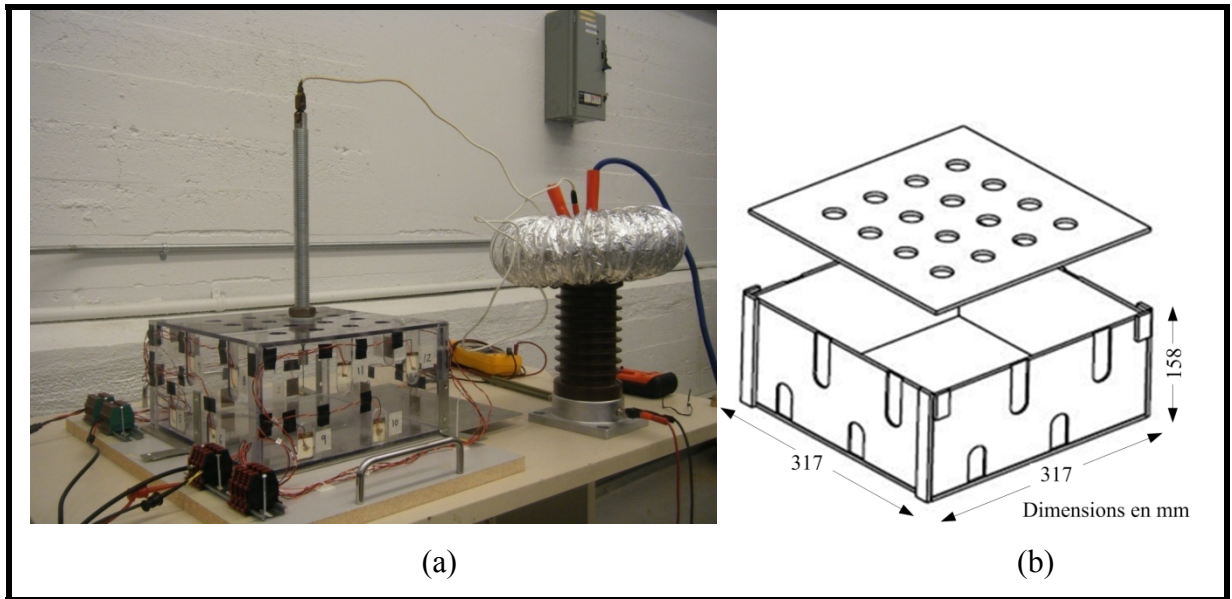


Figure 3.5 a) Banc d'essai, b) Boitier en PMMA

Les signaux mesurés par l'oscilloscope sont enregistrés par un système d'acquisition de données puis ils sont traités afin d'extraire le signal utile des décharges partielles en soustrayant le bruit de fond, l'onde de 60 Hz et toutes autres interférences qui lui sont superposées. La Figure 3.6 présente le montage expérimental utilisé et le circuit électrique équivalent.

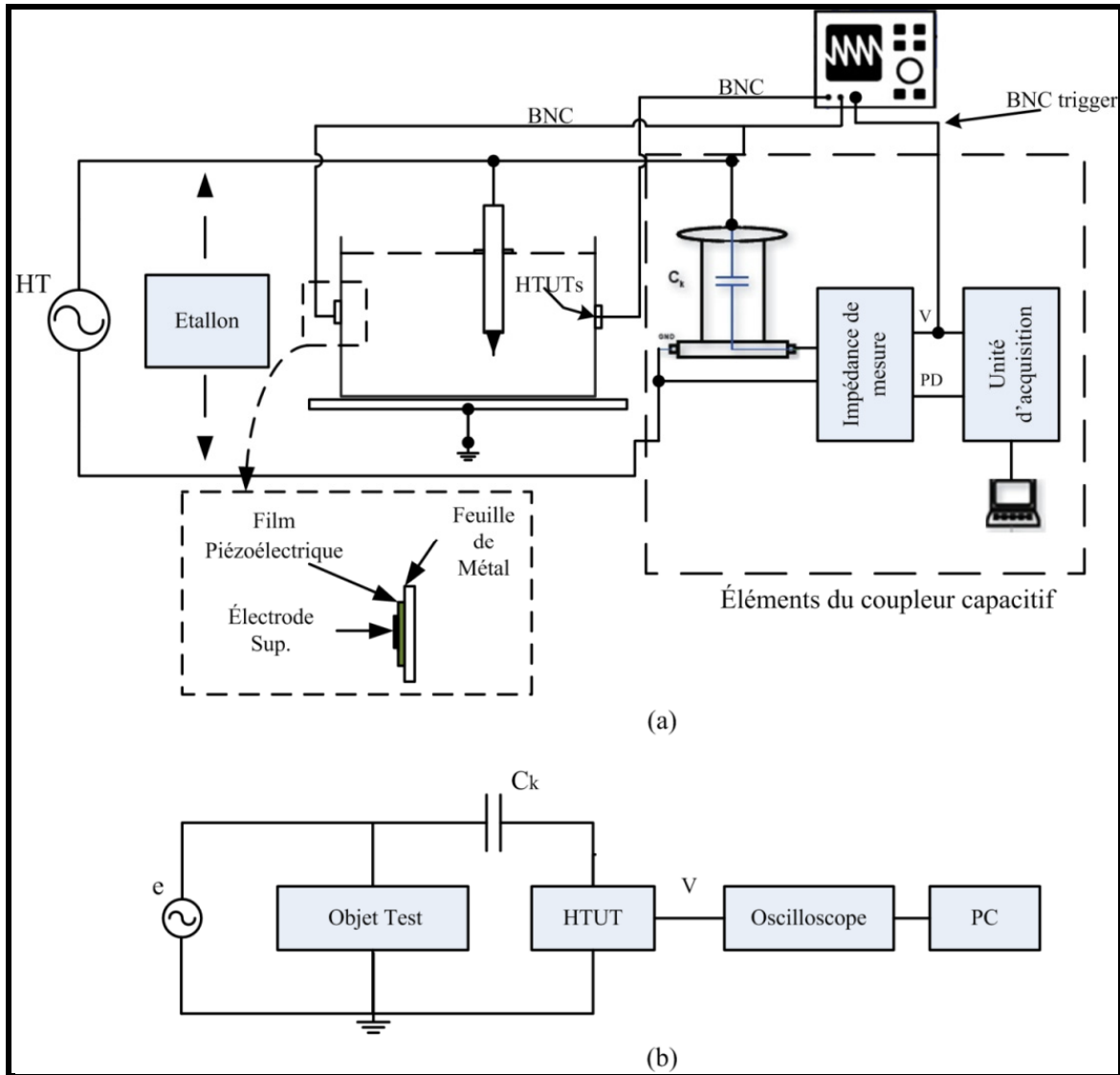


Figure 3.6 Schéma (a) du montage expérimental et (b) du circuit équivalent

La fonction de transfert du circuit équivalent est donnée par :

$$Z(\omega) = \frac{\hat{v}}{\hat{e}} = jRC_c \omega \frac{1}{1 + jR(C + C_k)\omega} \quad (3.1)$$

Avec $C_k \approx 0.13 \text{ pF}$ qui présente la capacité de couplage entre la haute tension et la contre électrode du capteur piézoélectrique, $C = C_p + C_2$ représente la capacité équivalente du

piézoélectrique ($C_p = 6.37 \text{ nF}$) et du câble coaxial ($C_2 = 1.66 \text{ nF}$) et R représente l'impédance de mesure de l'oscilloscope (50Ω ou $1 \text{ M}\Omega$).

La réponse en fréquence du système est illustré à la Figure 3.7.

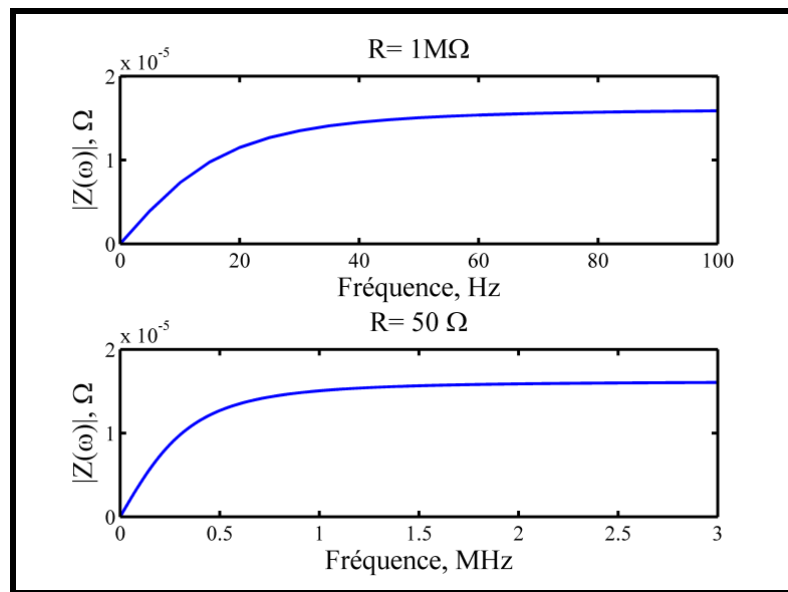


Figure 3.7 Réponse fréquentielle du système

3.1.5 Plan d'expériences

Le diagramme de Figure 3.8 représente le plan d'expériences adopté dans cette thèse. Les travaux seront effectués dans le Laboratoire de haute tension au CTT de l'ÉTS. Pour permettre une validation croisée des résultats, trois types de mesures seront conduits et analysés dans cette étude :

- Mesures dans la gamme de fréquences UHF,
- Mesures acoustiques,
- Mesures conventionnelles (couplage capacitif).

Le banc d'essai offre la possibilité de varier plusieurs paramètres d'entrée tels que les coordonnées (x_s, y_s, z_s) et l'intensité des décharges, la position du capteur (x_c, y_c, z_c) , la nature du milieu de décharge (air, huile) et le type de défaut (pointe, bulle de gaz, décharges de surface, décharges avec une pièce métallique flottante...). Cette variation de paramètres permettra de mieux caractériser les signatures de décharges (amplitude, nombre de décharges, position des décharges par rapport à la phase de l'excitation AC, ...) et aussi d'effectuer des tests visant la localisation des foyers de décharge.

La quantification de l'amplitude des DP se fait usuellement en pico-Coulomb (pC) (Power & Energy Society, 2010). Pour réaliser l'étalonnage, une opération de calibrage permet de transformer la lecture des volts en une quantité de charges électriques mesurée en pico-Coulomb. Cette opération sera effectuée au début de chaque test en utilisant un étalon commercial provenant de la compagnie OMICRON®. Les différents signaux captés seront post-traités numériquement et affichés selon différents diagrammes recommandés pour la représentation des DP tels que les diagrammes de résolutions dans la phase DRPDP et les diagrammes d'analyse d'amplitude des impulsions AAI.

Pour des fins de validations, les résultats seront comparés à des mesures issues d'un coupleur capacitif monté en parallèle avec l'objet test.

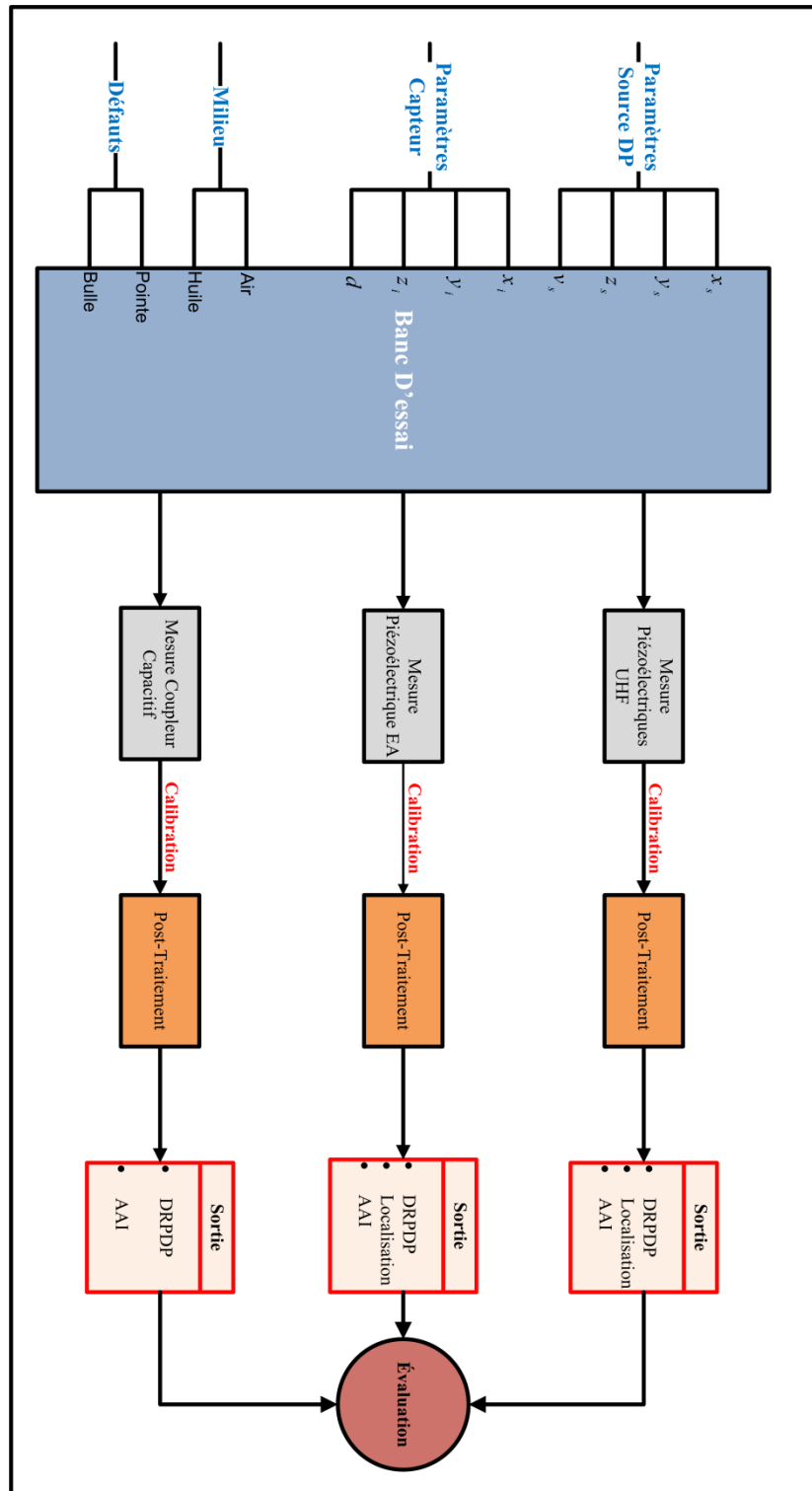


Figure 3.8 Plan d'expériences proposé

3.2 Analyse des performances métrologiques du système de mesure

3.2.1 Gammes fréquentielles

Les impulsions de décharges partielles émettent des signaux dans une large gamme de fréquences. Dans notre investigation, nous sommes intéressés par deux types de signaux, les ondes acoustiques EA et les ondes UHF. Le diagramme de la Figure 3.9 représente un axe de fréquences pour les DP et les techniques de détection correspondantes à chaque bande de fréquences.

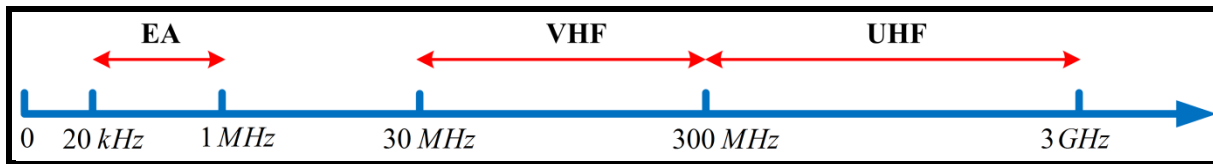


Figure 3.9 Gammes de fréquences des DP

3.2.2 Étalonnage (Calibration)

Comme mentionné précédemment, l'amplitude des DP est quantifiée en pC. Par conséquent, une opération de calibration des mesures issues des capteurs est nécessaire. Aussi, les différences intrinsèques durant la fabrication, les variations inhérentes à l'installation des capteurs et les changements dans les conditions de test nous obligent à effectuer la calibration pour chaque capteur et chaque nouveau test.

Pour transformer les mesures de tension en quantités de charges, un calibrateur (CAL542 d'OMICRON®) émettant des décharges cycliques de l'ordre de (50 pC) a été utilisé. La Figure 3.10 montre un signal typique enregistré par un capteur piézoélectrique BIT/PZT des impulsions émises par le calibrateur (50 pC).

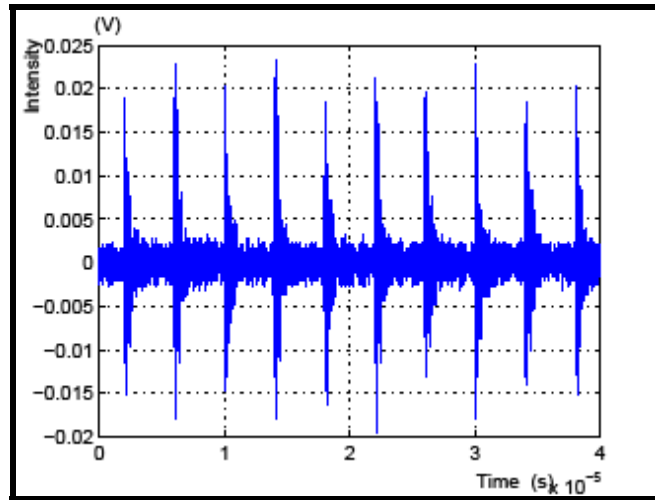


Figure 3.10 Décharges enregistrées pour 10 cycles

Quatre (4) intensités de décharge, $q_i = [-50 \text{ pC} \quad -20 \text{ pC} \quad 20 \text{ pC} \quad 50 \text{ pC}]$, ont été appliquées pour identifier la réponse du capteur piézoélectrique BIT/PZT. Ces valeurs ont été établies pour couvrir approximativement l'étendue des mesures. Une étude typique appliquée à un des capteurs sera présentée dans cette section à titre d'exemple.

Une série de vingt (20) mesures est prise pour chaque intensité de décharges (q_i). Chaque mesure consiste en cinq (5) impulsions de décharges. Puisque la réponse à une impulsion est un signal électrique amorti (voir Figure 3.10), un traitement numérique est utilisé pour extraire le pic max de chaque réponse d'impulsion. Le tableau des mesures de calibration est joint en Annexe I.

Avant d'effectuer l'analyse statistique qui nous permettra de déterminer le facteur de calibration (gain et erreur statique), une série de tests semble être nécessaire pour vérifier la distribution des échantillons de mesures et aussi le degré de stabilité du système de mesure.

3.2.2.1 Test de normalité des résidus

Ce test représente une étape importante de cette analyse. Il a pour objectif de vérifier si les résidus des mesures possèdent ou pas un comportement gaussien. Les résidus présentent les

différences entre les mesures effectuées durant les opérations d’étalonnage et le modèle tel qu’identifié. Dans notre cas, il s’agit d’un modèle linéaire qui lie la charge (pC) à la valeur lue par le capteur (mV). La normalité n’est pas une finalité pour notre analyse. Toutefois, l’absence de normalité est généralement symptomatique d’un phénomène parasite qu’on devrait chercher à identifier et à isoler du système de mesure (MSA Work Group, 2002). Les résultats de ce test sont regroupés dans la Figure 3.11 et le Tableau 3.1.

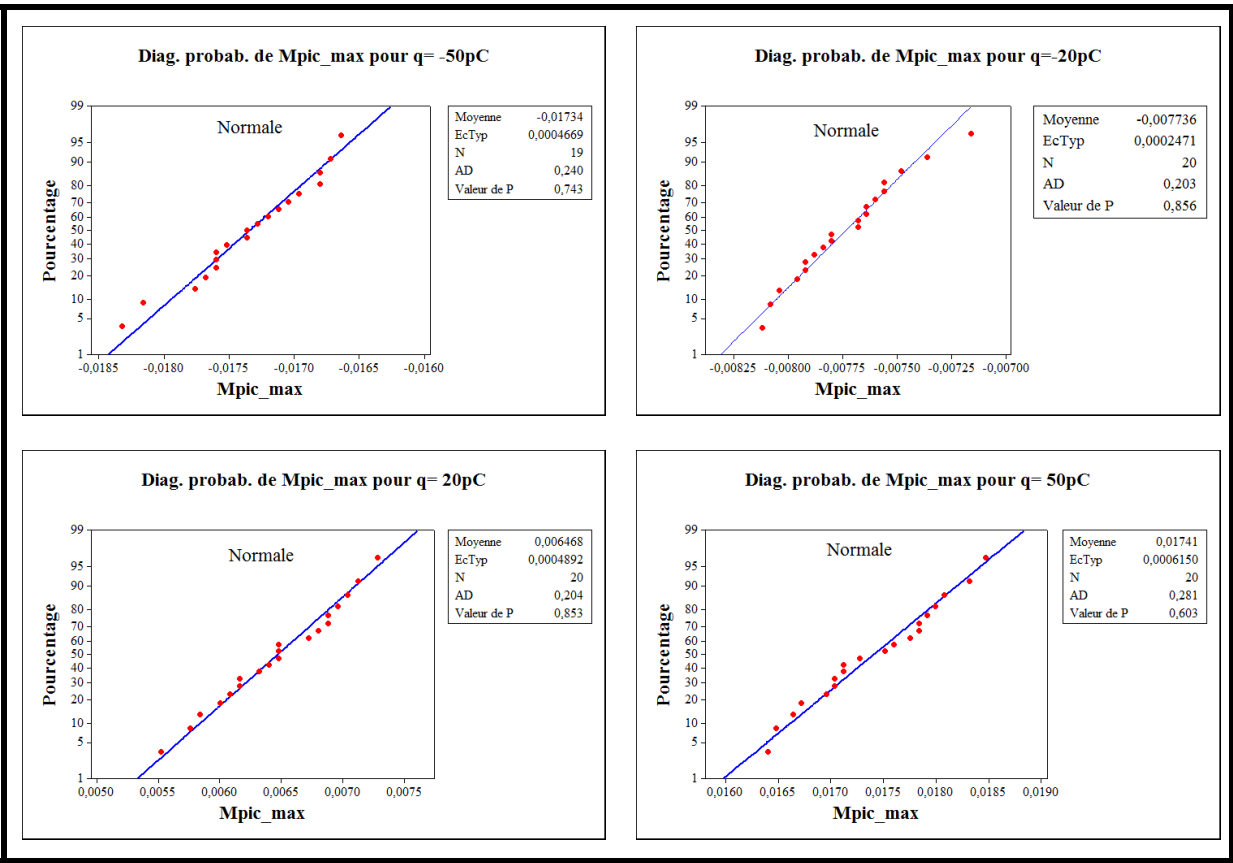


Figure 3.11 Test de normalité des résidus effectué sur chaque groupe de mesure

Tableau 3.1 Récapitulatif des statistiques des résidus (étalonnage)

Charge	-50 pC	-20 pC	20 pC	50 pC
Moyenne	-1,734E-2	-7,7E-3	6,4 E-3	1,741 E-2
Écart type	4,6E-4	2,4 E-4	4,8 E-4	6,1 E-4
<i>p-Value</i> ²	0,743	0,85	0,85	0,60

A priori, les points de données des quatre diagrammes de probabilité sont relativement proches de la ligne de référence et les valeurs de probabilité sont comprises dans l'intervalle $[0,60 \text{ } 0,85]$, ce qui indique des résidus conformes à une loi normale.

3.2.2.2 Test de stabilité / Ergodicité

Ce test est effectué à l'aide des cartes de contrôle de type I-MR (Individu-Étendue Mobile / *Individual Moving Range*). Ces dernières permettent de déterminer si la moyenne et la variation entre les échantillons sont maîtrisées (stables). Un procédé est dit maîtrisé s'il ne présente qu'une variation aléatoire et gaussienne à l'intérieur des limites de contrôle. Les résultats de ce test appliqué aux quatre échantillons de mesure $[-50 \text{ pC } -20 \text{ pC } 20 \text{ pC } 50 \text{ pC}]$ sont illustrés à la Figure 3.12.

² Le *p-Value* indique la probabilité d'effectuer une erreur du type I (erreur *Alpha*, généralement considérée comme égale à 5 %) sur l'hypothèse nulle du test statistique. Dans notre cas, il s'agit d'un test de normalité d'Anderson-Darling. Une valeur de *p-Value* < 0,05 indiquerait qu'on peut rejeter l'hypothèse de normalité des données. Par conséquent, une valeur *p-Value* > 0,05 est une bonne indication du comportement, *a priori*, gaussien des données.

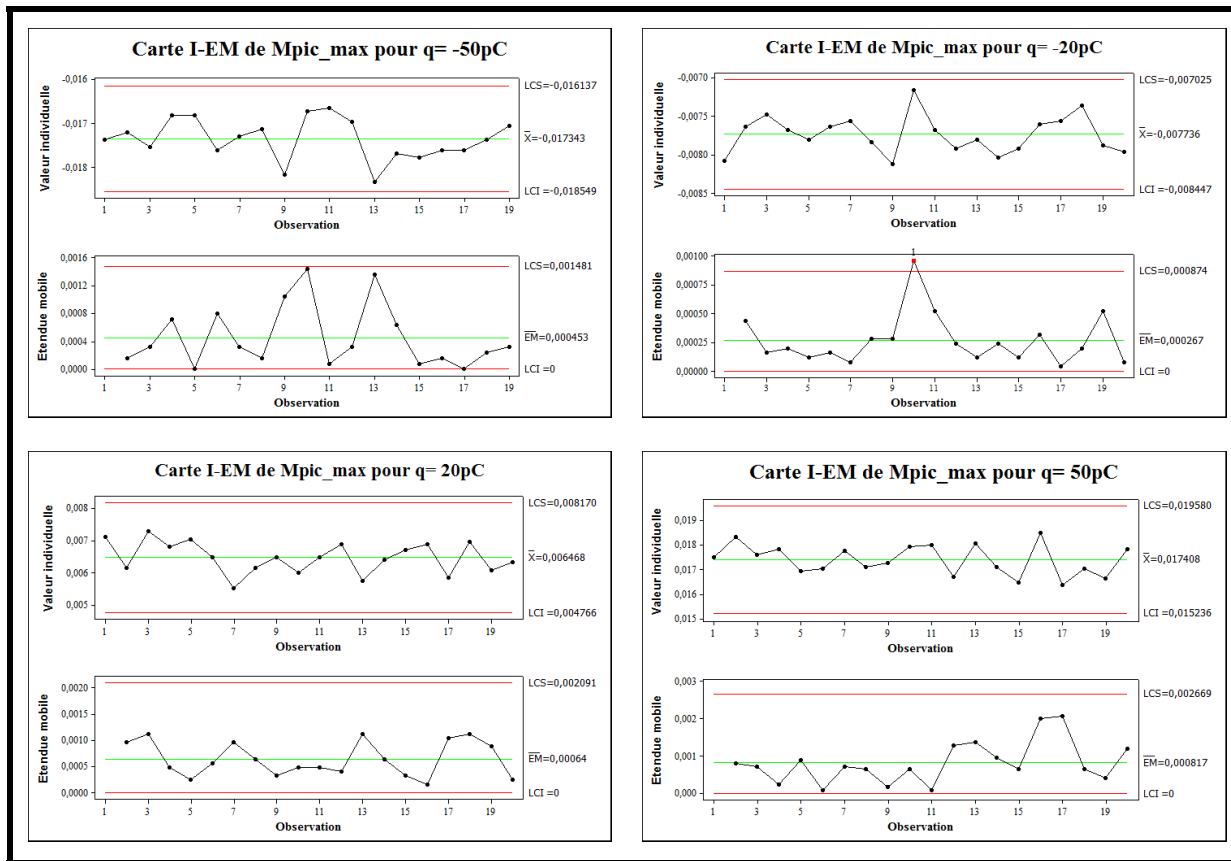


Figure 3.12 Cartes de contrôles enregistrées pour chaque charge de calibration

D'après les différentes cartes de contrôles I-MR, la moyenne et la variation de chaque échantillon peuvent être considérées comme stables et maîtrisées. Un seul point sur la carte EM de l'échantillon ($-20pC$) est hors limite. Ce point sera ignoré dans la suite du traitement. La Figure 3.13 montre la carte de contrôle I-MR de l'échantillon ($-20pC$) sans le point aberrant.

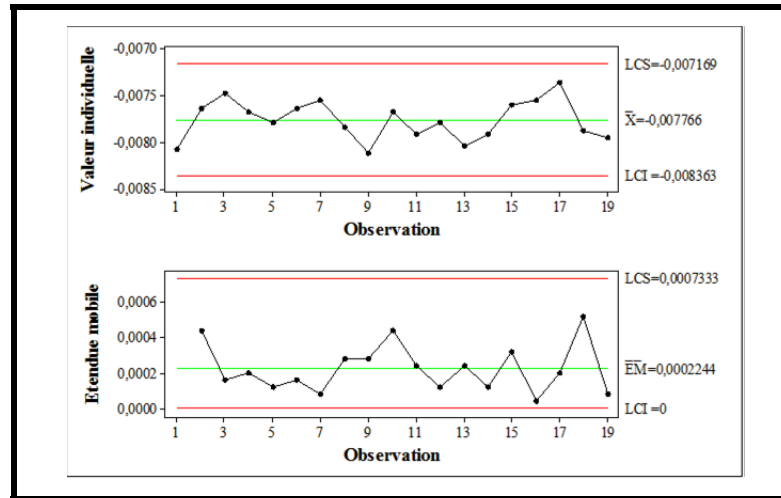


Figure 3.13 Carte I-MR pour (-20 pC) sans le point aberrant

3.2.2.3 Régression et analyse de linéarité

L'objectif de l'étalonnage consiste à déterminer le facteur d'échelle (F) qui représente le rapport entre la charge d'étalonnage (q) injectée entre les bornes de l'objet du test et la lecture (L) du système de mesure. L'unité de (F) est le $[\text{pC V}^{-1}]$.

$$F = \frac{q}{L} \quad (3.2)$$

La régression linéaire par la méthode des moindres carrés a été utilisée pour estimer ce facteur d'échelle et aussi pour vérifier le niveau de corrélation entre l'intensité de décharge (q) et la valeur lue par le système de mesure (L). Les résultats de cette étude sont résumés dans les graphes ci-après.

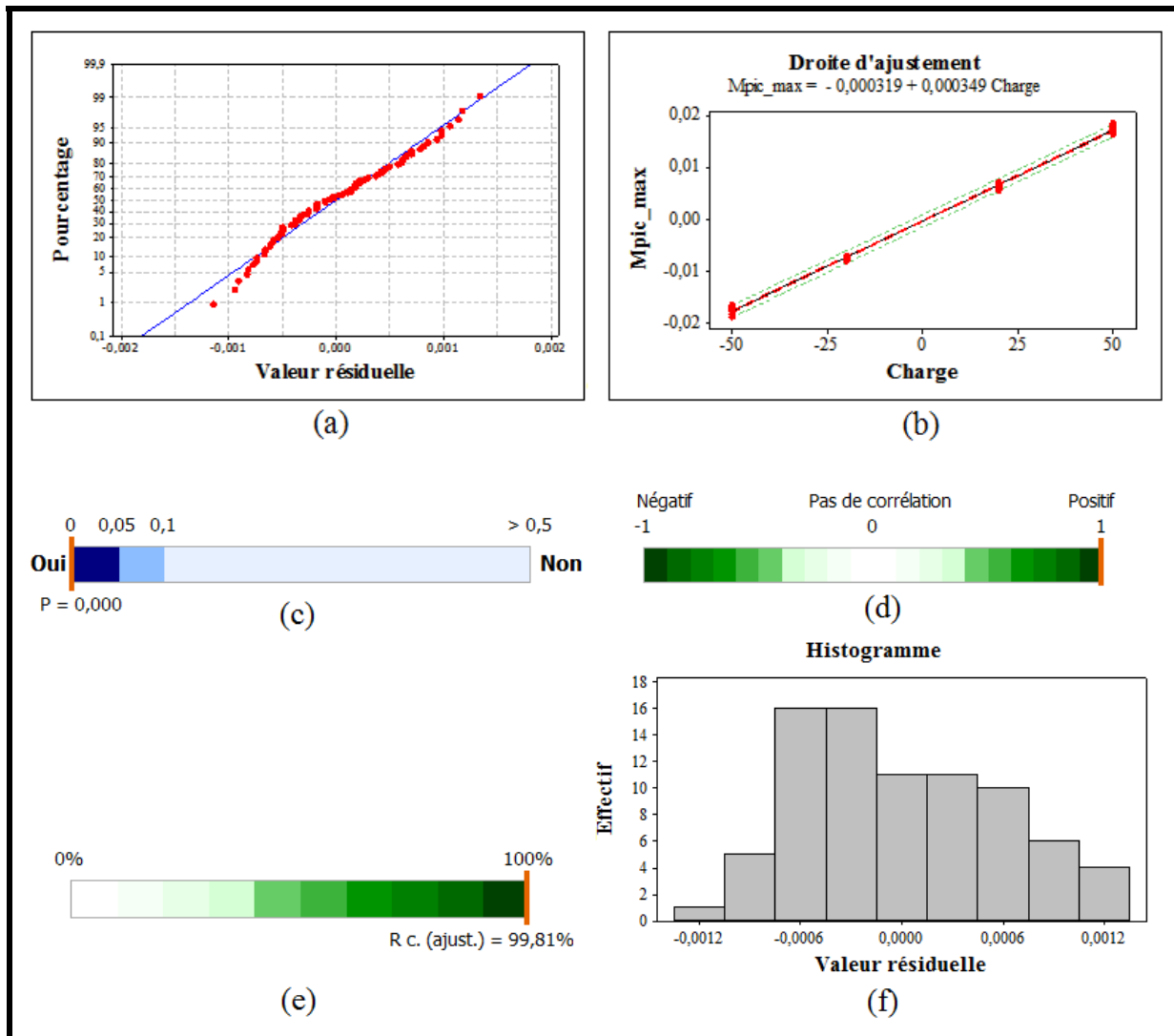


Figure 3.14 Diagrammes de l'analyse de régression

- a) Droite de Henry b) Droite d'ajustement c) Diagramme d'existence de relation
d) Diagramme de corrélation e) Pourcentage de données prises en compte par le modèle

La Figure 3.14a représente la droite de Henry. Cette dernière donne une indication quant à la normalité de l'ensemble des résidus. Comme on peut le constater, presque tous les points de mesures sont alignés, ce qui confirme l'hypothèse de la normalité des données.

La droite ajustée pour le modèle linéaire (voir Figure 3.14b) décrit la relation entre la charge de calibration (q) et la valeur du pic maximal (L), son équation s'écrit comme suit :

$$L = -3,20 \times 10^{-4} + 3,49 \times 10^{-4} q \quad (3.3)$$

L'inverse du coefficient directeur de cette droite d'ajustement donne une estimation consistante du facteur de calibration recherché. Dans ce cas, nous avons identifié un facteur de 2858 pCV⁻¹.

Le diagramme de la Figure 3.14c prouve l'existence d'une relation significative sur le plan statistique entre l'intensité des impulsions de calibration (q) et la valeur du pic maximal mesuré (L). La probabilité d'effectuer une erreur du type I (P) est inférieure au seuil de risque retenu ($\alpha = 0,05$). Aussi l'étude de corrélation résumée par la Figure 3.14d, indique l'existence d'une forte relation positive entre les deux paramètres (q) et (L). Le coefficient de corrélation approche la valeur 1. Le graphe de Figure 3.14e montre que le coefficient de corrélation de *Pearson* R^2 est de 99,8 %. Dans le même sens, l'histogramme des valeurs résiduelles de la Figure 3.14f indique que 96 % des mesures peuvent être incluses dans un intervalle de tolérance de (± 1 mV), ce qui nous laisse conclure que la sensibilité de notre système de mesure est assez bonne pour que ce dernier soit appliqué à la détection des DP.

3.2.2.4 Étude de l'erreur de linéarité et du biais

Pour vérifier l'exactitude du système de mesure par rapport aux valeurs de références et sa cohérence métrologique, une étude du biais et de linéarité s'impose selon les recommandations du guide GUM/ISO (MSA Work Group, 2002). Dans notre cas, les valeurs de référence seront calculées par la formule de l'équation (3.2), en utilisant le facteur d'échelle déterminé précédemment. Les résultats de cette étude sont illustrés dans les diagrammes de la Figure 3.15, la Figure 3.16 et la Figure 3.17.

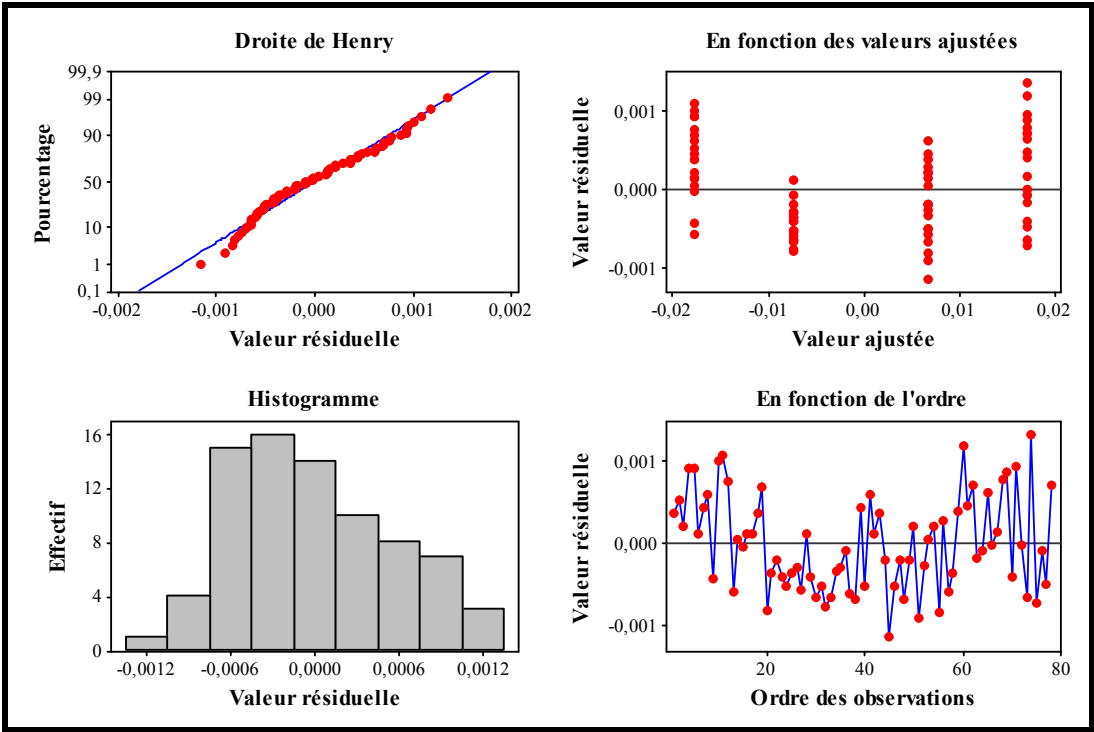


Figure 3.15 Diagrammes de valeurs résiduelles

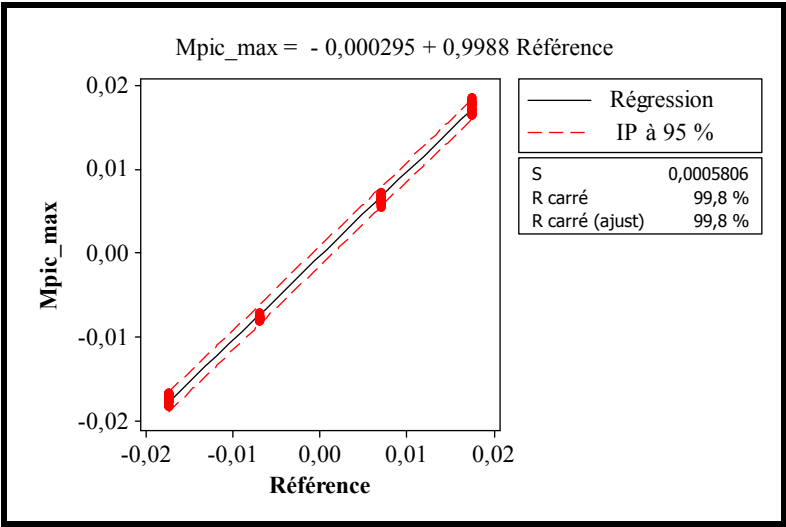


Figure 3.16 Droite d'ajustement linéaire

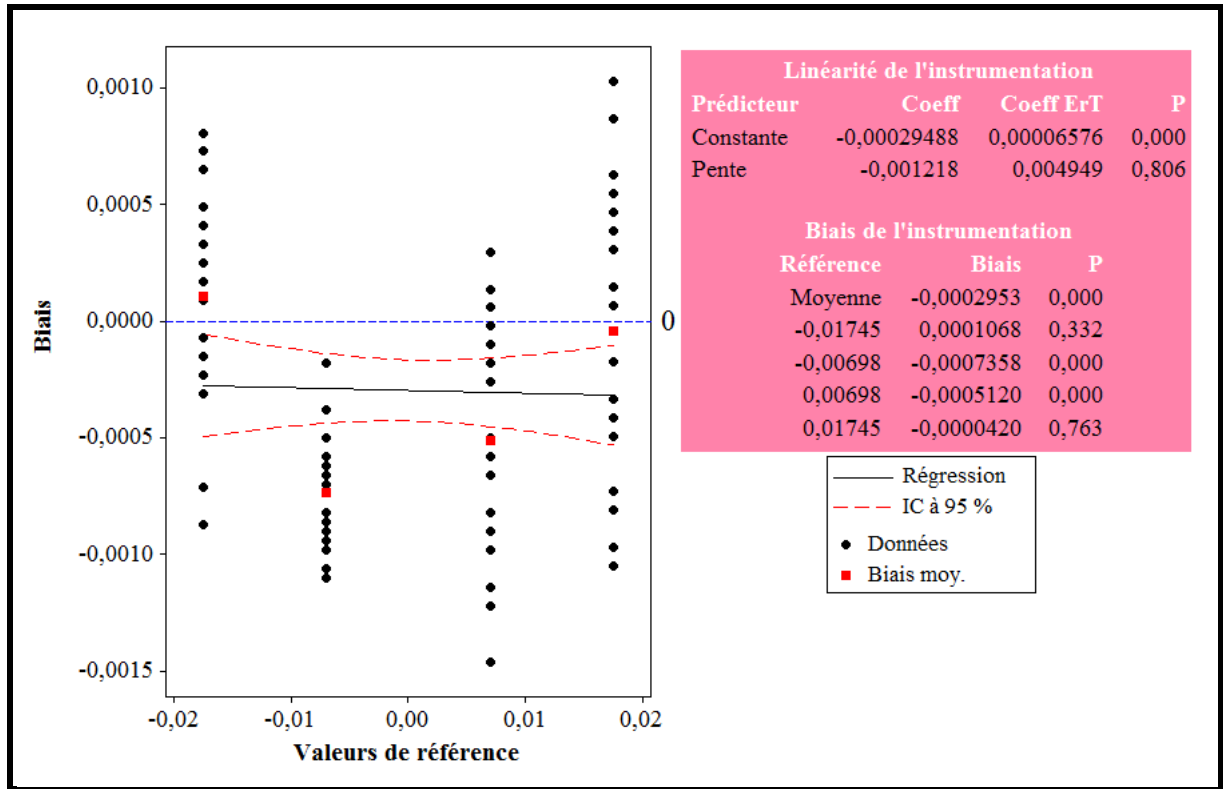


Figure 3.17 Diagramme de linéarité et du biais

L'étude de linéarité et du biais utilise la moyenne des mesures et les valeurs de référence pour estimer le biais et la linéarité. Elle tient en compte également de l'erreur de répétitivité. D'après les résultats, on constate que le système de mesure présente une bonne linéarité (la droite de régression est presque parallèle à la droite de référence) et un très faible biais de l'ordre de 0,3 mV. Donc, une lecture en Volt d'une charge (q) a en moyenne, une erreur de biais de 0,3 mV et comme erreur de fidélité ± 1 mV à 95 %.

Une deuxième étude de linéarité et du biais a été effectuée en prenant comme valeurs mesurées le pic max de chaque cycle. Les résultats de cette étude, résumés à la Figure 3.18, montrent aussi une bonne linéarité et un plus faible biais par rapport à l'étude précédente.

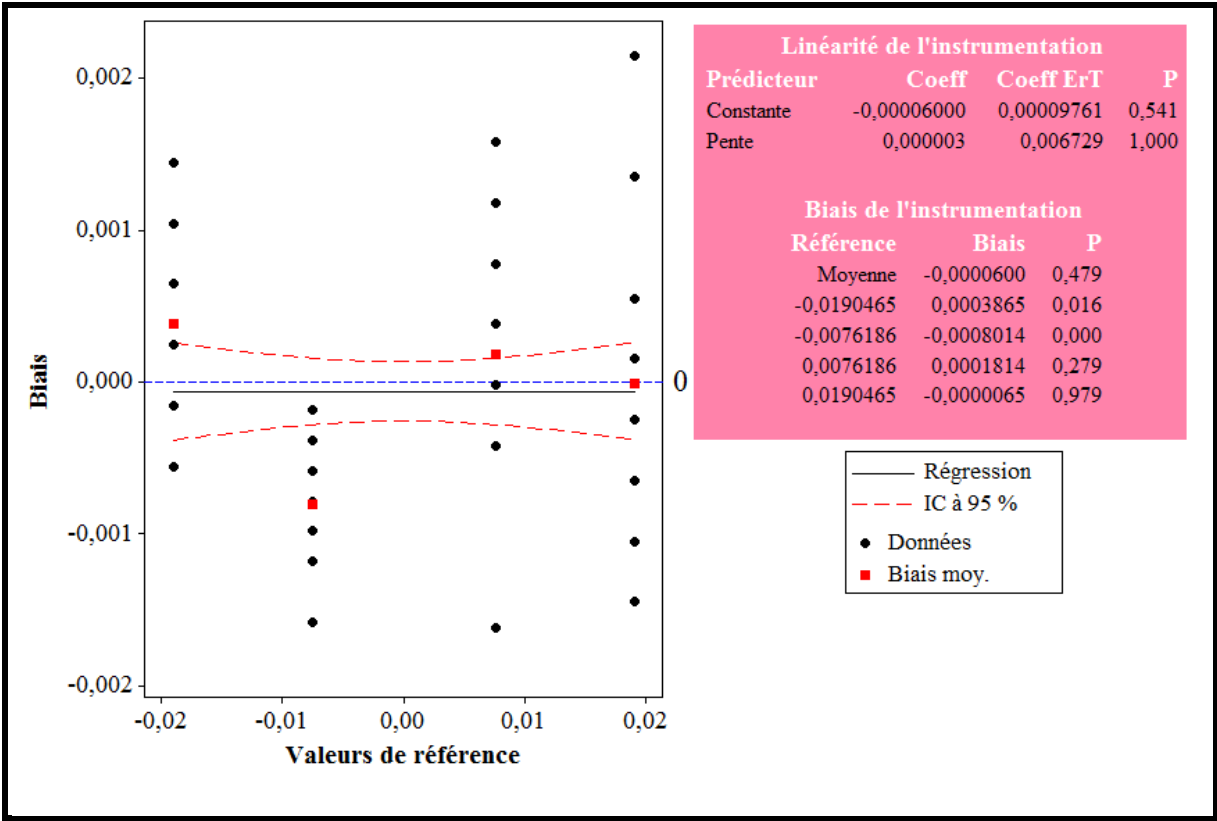


Figure 3.18 Diagramme de linéarité et du biais pour la 2e étude

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement les caractéristiques électriques et morphologiques d'une nouvelle génération de capteurs piézoélectriques que nous proposons d'employer et dont nous voulons explorer le potentiel pour détecter les décharges partielles dans les appareils de haute tension. Également, nous avons présenté les premières réponses prometteuses de cette nouvelle technologie de piézoélectrique à des excitations émises par une source de DP. Les tests de calibration, avec leurs analyses statistiques, ont montré que les mesures issues de notre système de mesure basé sur cette technologie sont maîtrisées et stables. Le niveau d'erreur du biais et de fidélité sont respectivement de l'ordre de 0,3 mV et de ± 1 mV à 95 %, des valeurs qui sont conformes avec la norme sur la mesure des DP qui tolère jusqu'à $\pm 10\%$ de la plus grande valeur mesurée.

CHAPITRE 4

MODÉLISATION ET POST-TRAITEMENT DU SIGNAL

Avant de lancer l'expérimentation, nous avons voulu obtenir des estimations de l'ordre de grandeur du champ électrique qui sera engendré à l'intérieur du banc d'essai. Nous présentons donc dans ce chapitre une modélisation par la méthode des éléments finis (MEF) du profil du potentiel et du champ électrique créés par une configuration d'électrodes **pointe-plan**. L'influence de la charge d'espace sur le champ électrique maximal sera aussi présentée. Dans un second volet, nous exposons les algorithmes des post-traitements que nous avons développés et qui seront appliqués aux signaux bruts issus du système de mesure pour en extraire toutes les informations utiles.

4.1 Modélisation par la MEF de la configuration pointe plan du banc d'essai

Les calculs de champ électrique sont requis pour les matériaux isolants des systèmes haute tension afin de vérifier les contraintes électriques maximales auxquelles ils sont soumis et qui peuvent amorcer leur détérioration. Pour des configurations simples d'électrodes, tel que plans parallèles, le champ électrique dans l'isolation peut être facilement calculé. Toutefois, pour des configurations de géométries plus complexes, le recours aux outils de simulation numérique comme la MEF semble indispensable.

La MEF est parmi les méthodes les plus utilisées pour la résolution numérique des équations aux dérivées partielles décrivant le comportement des systèmes physiques. Elle s'adapte très bien aux domaines hétérogènes et de géométries complexes. Sa précision peut être améliorée en augmentant le nombre d'éléments.

En gros, la MEF consiste en quatre grandes étapes, comme illustré au diagramme de la Figure 4.1 :

- La modélisation du phénomène physique par des équations du milieu continu aux dérivées partielles et l'établissement des conditions initiales et des conditions aux limites nécessaires pour avoir une solution,

- La formulation sous forme variationnelle par affaiblissement de la forme intégrale forte en utilisant le principe de pondération du résidu par une fonction de test et l'intégration par partie,
- La discrétisation de la forme variationnelle et le maillage du domaine,
- L'assemblage de l'ensemble des éléments et résolution matricielle du système discret obtenu.

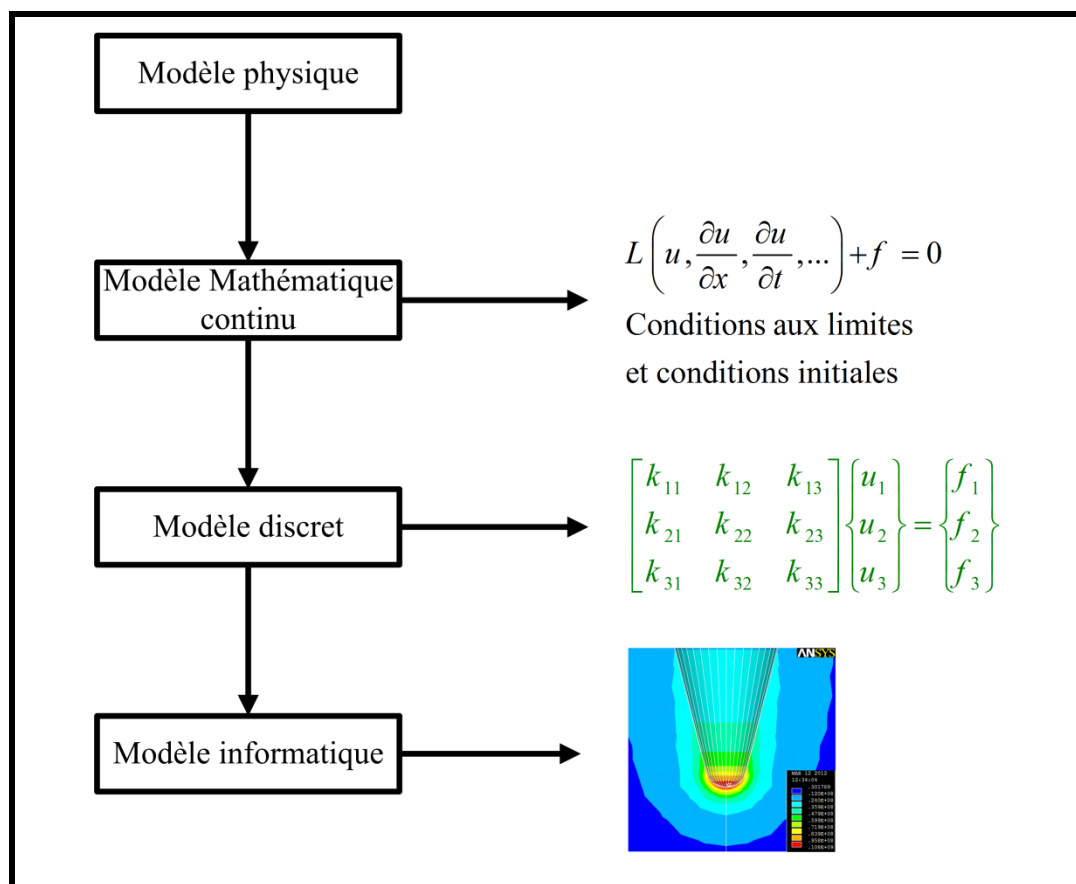


Figure 4.1 Boucle de modélisation par la MEF

4.1.1 Description physique du problème à résoudre

La présence de forme pointue de faible rayon de courbure sur une électrode engendre une distorsion du champ électrique et une forte concentration de celui-ci au niveau de la pointe. Ce qui peut, comme mentionné dans les chapitres précédents, induire l'activation de

décharges partielles par ionisation du milieu environnant. La Figure 4.2 représente le schéma du problème à résoudre. Il est constitué d'une configuration d'électrodes **pointe-plan** immergée dans une boîte en plexiglas remplie d'huile minérale. La pointe utilisée est une aiguille de diamètre 1 mm et de rayon de courbure (r) de $7,5\mu\text{m}$ (voir Figure 4.3). La symétrie intrinsèque du système d'électrodes pointe-plan nous permet de modéliser uniquement la moitié du domaine. Par conséquent, le problème peut être résolu comme étant un modèle à deux dimensions.

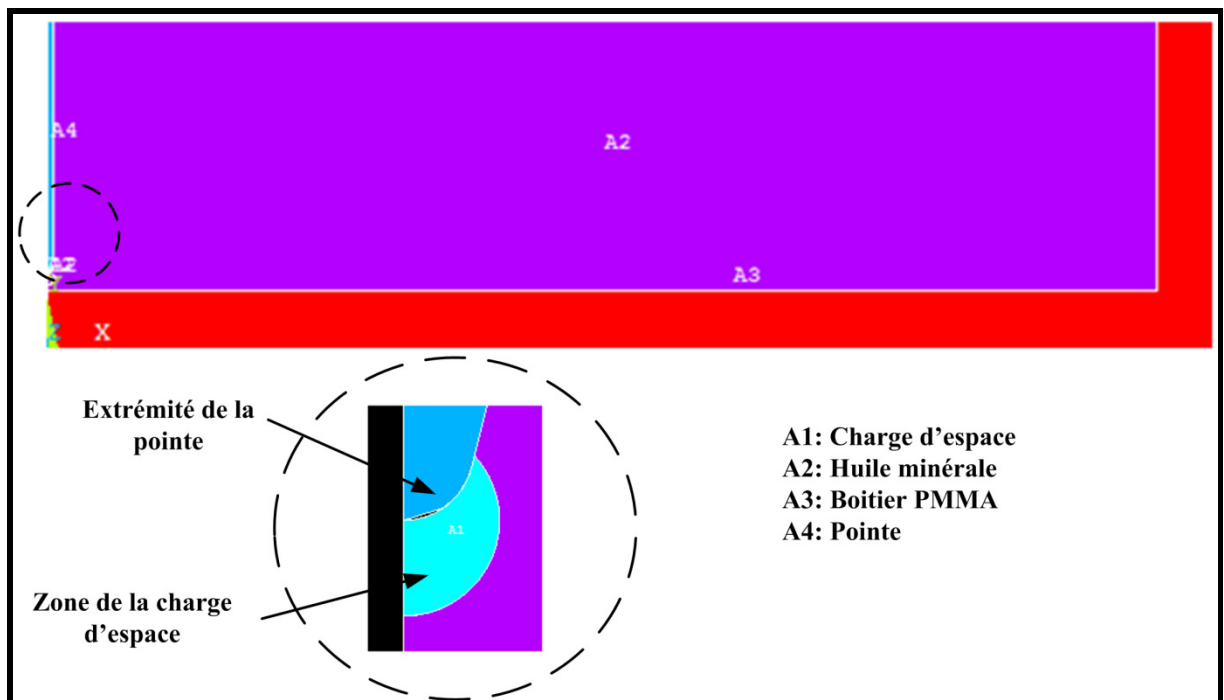


Figure 4.2 Schéma du modèle à résoudre

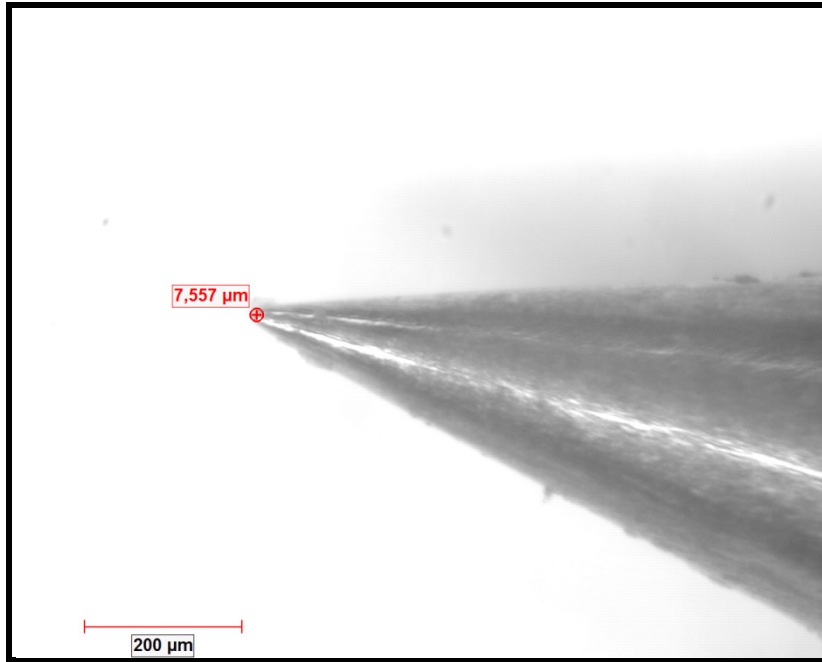


Figure 4.3 Photo de la pointe prise par un microscope

Cette étude nous est utile pour déterminer la distribution du potentiel et du champ électrique dans le diélectrique, autant dans l'huile que dans l'air. L'influence d'une charge d'espace répartie uniformément sur une sphère et de la distance inter-électrode sur le champ maximal sera aussi étudiée.

4.1.2 Formulation mathématique

Notre étude concerne l'aspect électrostatique du problème. La distribution du potentiel est gouvernée par l'équation de Poisson :

$$\Delta V + \frac{\rho}{\epsilon} = 0 \quad (4.1)$$

Avec

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \quad (4.2)$$

ρ : Densité de charge d'espace [C/m²],

ε : Permittivité du milieu [F/m].

4.1.2.1 Conditions aux limites

Les conditions initiales et aux limites de ce problème sont évidentes. Elles sont de deux types : la condition de *Dirichlet* sur les deux électrodes et la condition de *Neumann* sur les frontières.

Condition de *Dirichlet* sur les deux électrodes est la suivante :

$$V_{po\ inte} = V_a \text{ et } V_{plan} = 0 \quad (4.3)$$

En positionnant les frontières suffisamment loin de la zone sollicitée, la condition de *Neumann* devient naturelle et nous pouvons écrire :

$$\frac{\partial V}{\partial n} = 0 \quad (4.4)$$

Avec (\mathbf{n}) le vecteur normal à la surface.

Sous l'influence de la contrainte du champ électrique, des homocharges peuvent être injectées par les électrodes dans le milieu environnant, soit par injection de Schottky ou par effet tunnel. La charge d'espace joue un rôle très important dans le vieillissement et la dégradation diélectrique (Baumann *et al.*, 1989; Blaise, 1993). En effet, le champ électrique propre aux charges d'espace se superpose au champ appliqué et modifie de façon significative la limite de rupture de l'isolation.

Pour l'étude de l'effet de la charge d'espace sur la distribution du champ électrique, nous avons utilisé le modèle sphérique recommandé pour le cas de figure pointe-plan (Shimizu, 1979).

Ce modèle consiste en une sphère de rayon (R) chargée uniformément par une densité de charge (ρ). Le rayon de cette sphère est donné par (Hibma et Zeller, 1986) :

$$R = \frac{r}{2} \left(1 + \frac{V_a}{V_c} \right) \quad (4.5)$$

Où :

r : Rayon de courbure de la pointe [m],

V_a : Tension appliquée [V],

V_c : Tension d'amorçage de décharge [V].

La Figure 4.4 illustre le modèle utilisé pour le calcul numérique et les conditions aux limites.

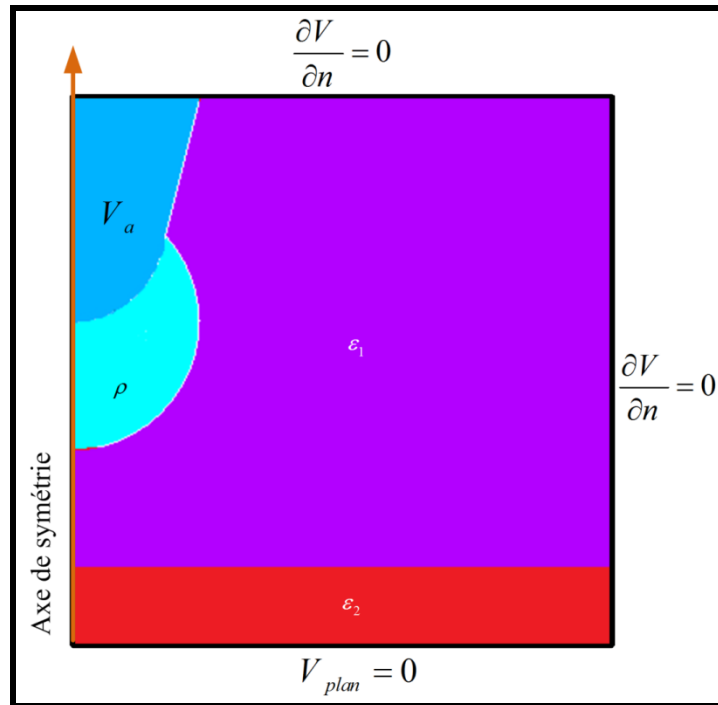


Figure 4.4 Modèle adopté pour le calcul numérique

4.1.2.2 Résultats

La résolution du problème a été effectuée par le logiciel d'éléments finis Ansys®. Les différents résultats trouvés dans le cas sans charge d'espace et avec charges d'espace seront présentés ci-dessous.

Cas sans charge d'espace

La simulation électrostatique représentée sur la Figure 4.5 illustre une distribution typique du potentiel ainsi que du champ électrique dans un milieu constitué uniquement de l'air, c'est-à-dire avec les deux matériaux diélectriques de permittivité unitaire (selon (4.4)). La distance inter-électrode est de 6 mm, le rayon de courbure est de $7,5 \mu\text{m}$ et la tension appliquée est de 3 kV. Nous constatons que le champ maximal se situe dans la région de la pointe de l'aiguille.

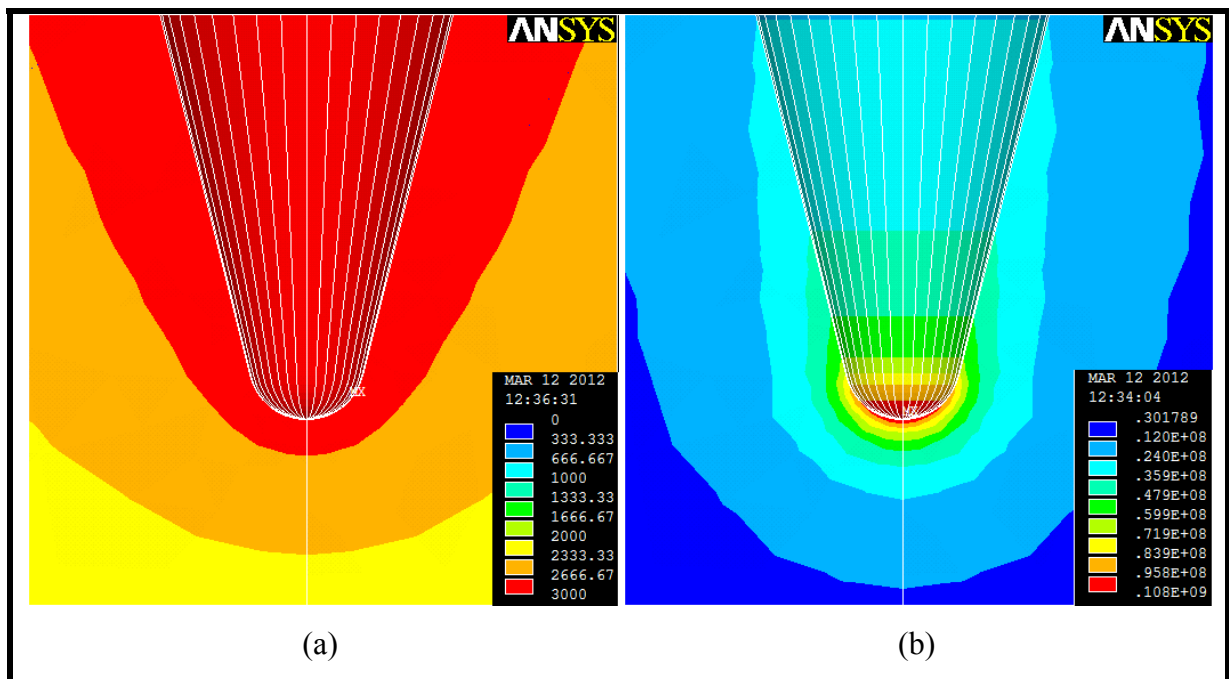


Figure 4.5 Profile du potentiel (a) et du champ électrique (b) dans l'air pour $V_a = 3 \text{ kV}$

Une comparaison de la valeur maximale du champ électrique calculée par la formule analytique introduite à la section 1.2.6.2 et celle calculée numériquement a donné une différence de l'ordre de 9 %.

$$E_{\text{analytique}} = 99,1 \text{ kVmm}^{-1}$$

$$E_{\text{numérique}} = 108 \text{ kVmm}^{-1}$$

Cette différence peut être attribuée principalement au facteur lié à la forme géométrique des deux aiguilles utilisées. Dans la formule analytique, on suppose une forme hyperbolique, ce qui n'est pas le cas dans l'étude numérique.

La distribution du champ électrique dépend de la permittivité relative des matériaux isolants. Si uniquement on fait ajouter à la configuration précédente la permittivité du matériau de la boîte en plexiglas, c'est-à-dire avec ($\epsilon_1 = 1$) et ($\epsilon_2 = 3,3$) le champ maximal est augmenté de plus que 20 kVmm^{-1} . La Figure 4.6 montre ce résultat.

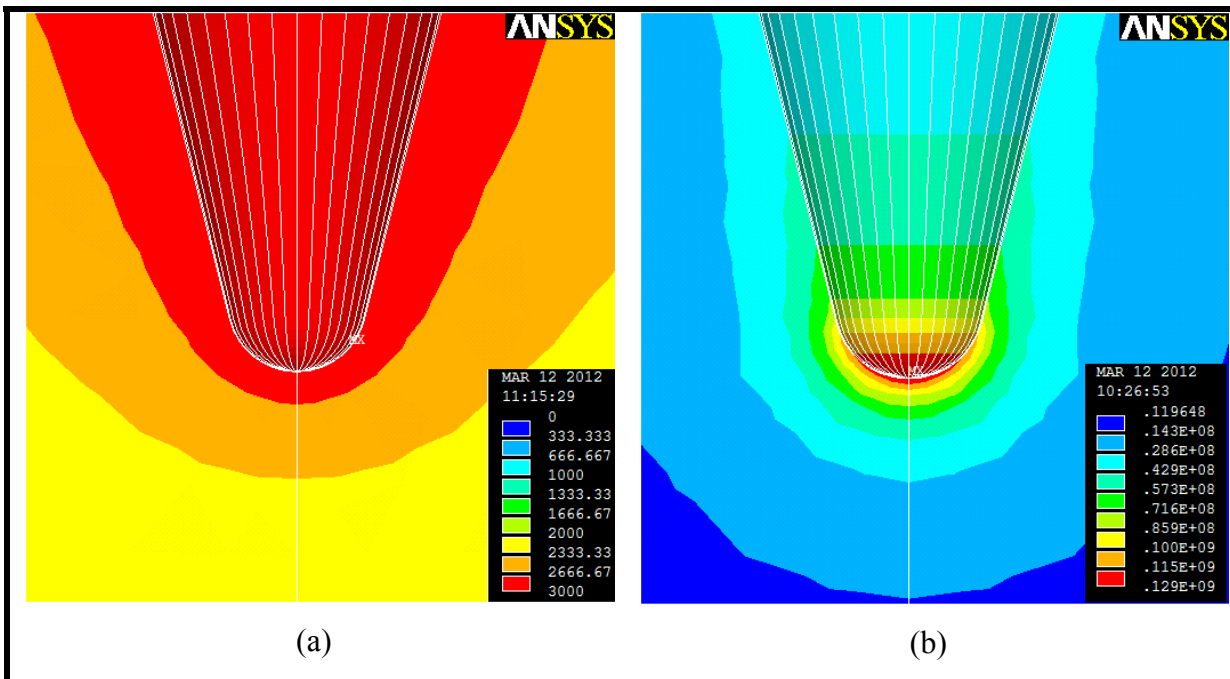


Figure 4.6 Profil du potentiel (a) et du champ électrique (b) dans l'air à l'intérieur de la boîte en plexiglas pour $V_a = 3 \text{ kV}$

Le champ maximal dépend de la forme géométrique de la pointe et de sa position par rapport au plan de masse. La Figure 4.7 montre la variation du champ maximal en fonction de la distance inter-électrode. Comme attendu, le champ maximal décroît avec l'augmentation de la distance inter-électrode.

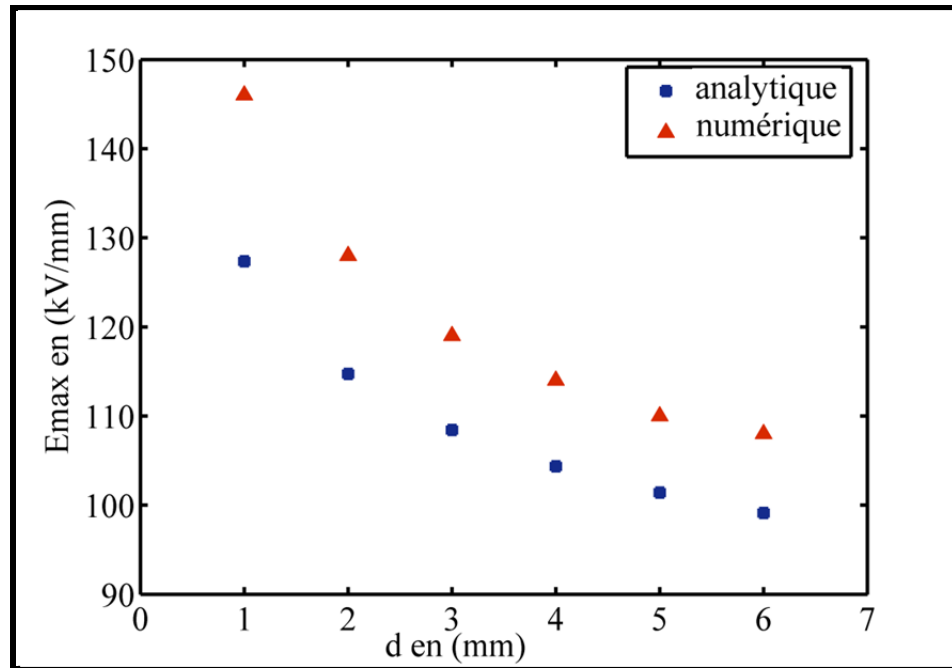


Figure 4.7 Champ maximal versus distance inter-électrode

La Figure 4.8 illustre la variation du champ maximal versus le rayon de courbure de la pointe. Le champ électrique maximal change de façon très significative. Il est d'autant plus critique que le rayon devienne plus petit.

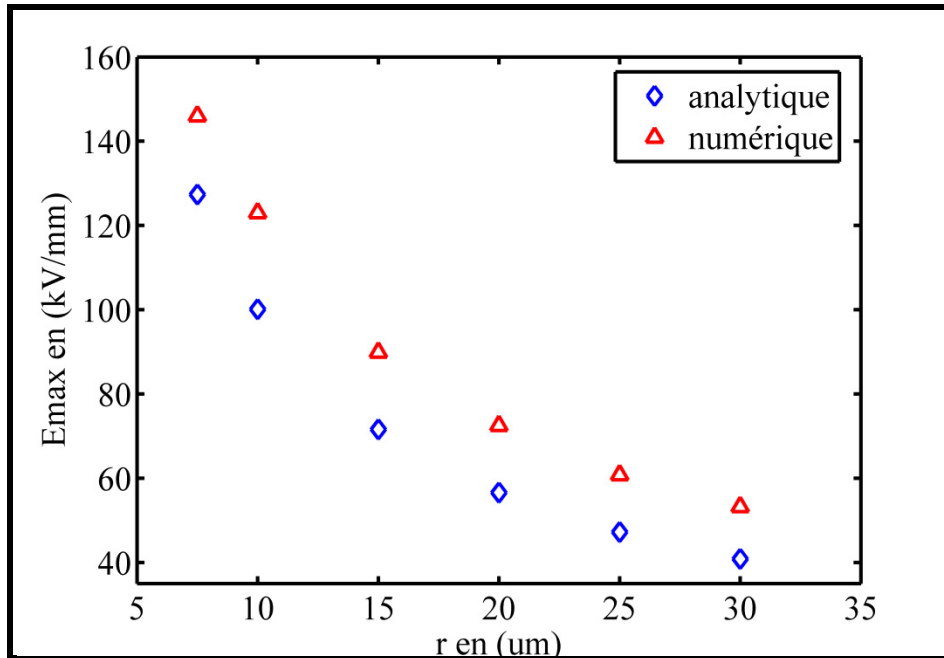


Figure 4.8 Champ maximal versus rayon de courbure

Cas avec charge d'espace

Il est bien connu que la charge d'espace joue un rôle très important dans le vieillissement et la dégradation diélectrique par son effet direct sur l'intensité et sur la distribution du champ électrique (Blaise, 1993). La tension d'amorçage des décharges partielles est fortement dépendante de l'ampleur de la charge d'espace.

Comme mentionné ci-haut, le modèle de charge d'espace sphérique a été adopté pour simuler l'influence de cette dernière sur la distribution du champ électrique (*voir* Figure 4.4). Ce modèle est le plus adéquat pour le cas de configuration pointe-plan (Shimizu, 1979).

Dans notre simulation, la charge d'espace est assumée être une homocharge uniformément répartie sur une sphère de rayon 10 μm autour de la pointe, la distance inter-électrode est prise égale à 2 mm et la tension appliquée est de 3 kV.

La Figure 4.9 montre l'effet de la charge d'espace sur le champ électrique maximale. Ce dernier décroît linéairement avec la croissance de la charge d'espace jusqu'au point où la charge d'espace atteint son maximum. Après ce point, le champ maximal change de sens.

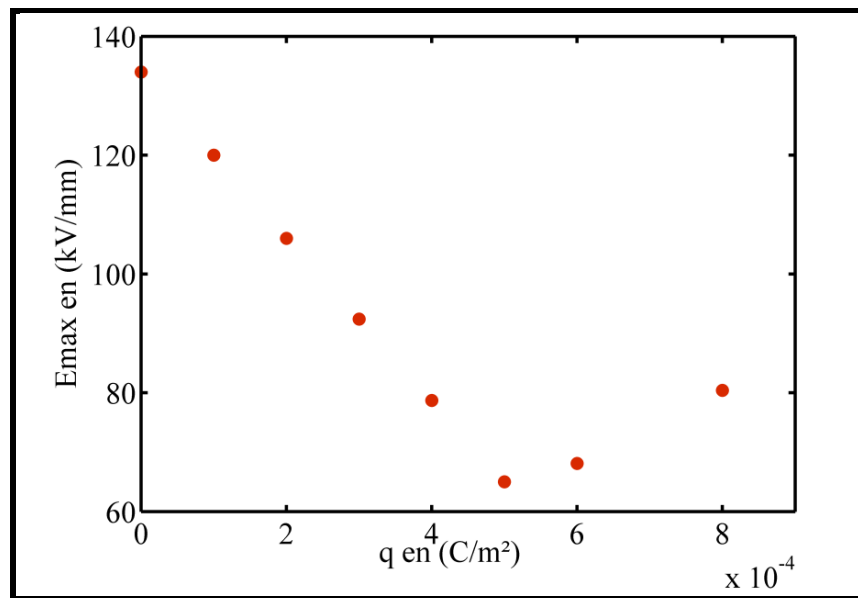


Figure 4.9 Variation du champ maximal versus la charge d'espace

Aussi cette simulation a montré que, au fur et à mesure que la charge d'espace augmente, la région du champ maximal se déplace vers le lieu de la charge d'espace. La Figure 4.10 illustre ce résultat.

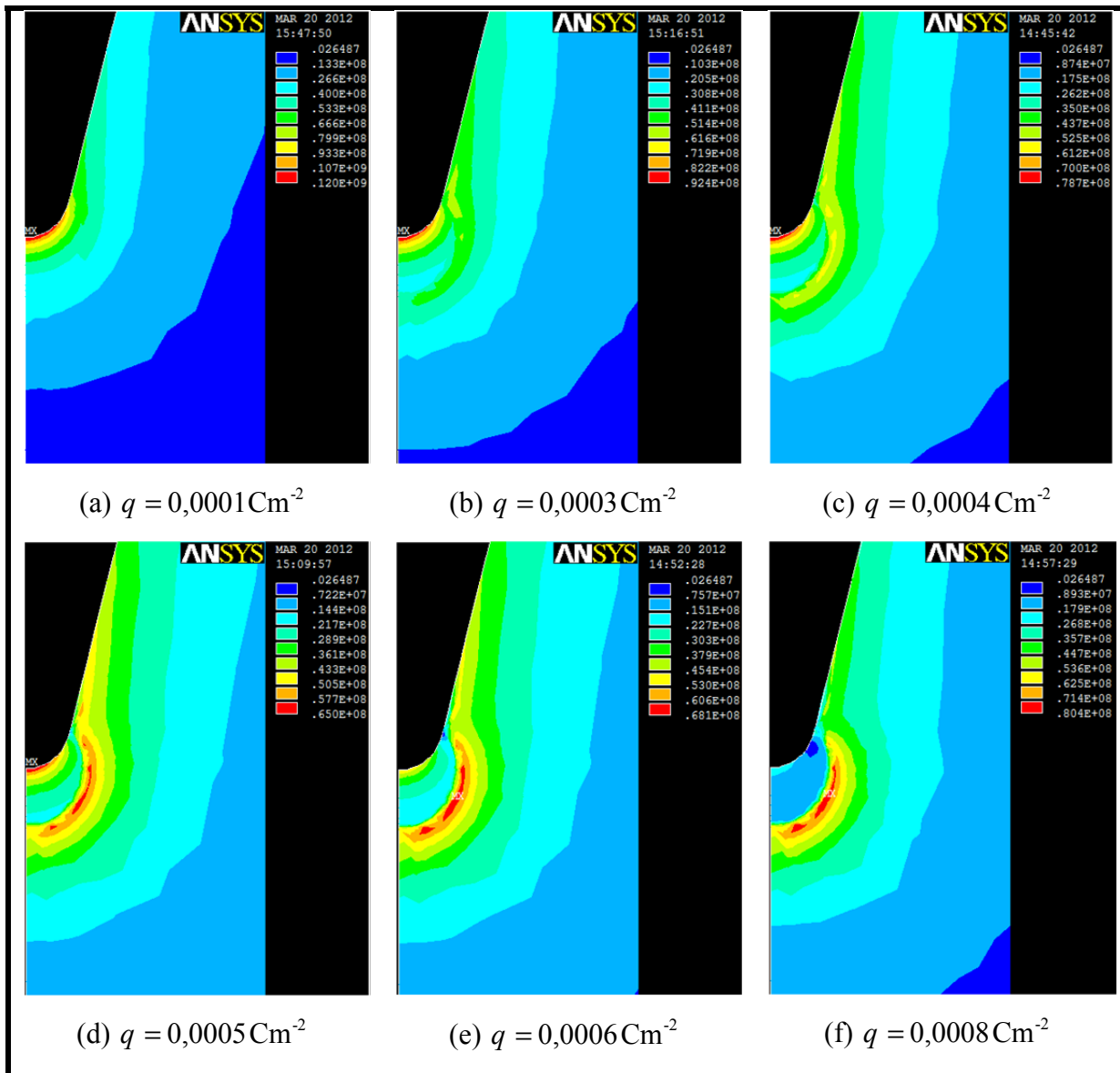


Figure 4.10 Distribution du champ électrique en fonction de la densité de charge d'espace

4.2 Traitement du signal brut issu des piézoélectriques

Le signal brut issu des capteurs piézoélectriques est généralement porté par l'onde de 60 Hz et il est fortement affecté par les réflexions des impulsions des décharges partielles (DP) et par le bruit de mesure. En plus de la détection des signaux acoustiques, ces capteurs détectent aussi des signaux UHF en agissant comme des antennes raisonnantes. La Figure 4.11 montre un exemple de signal brut typique tel que mesuré par un capteur piézoélectrique.

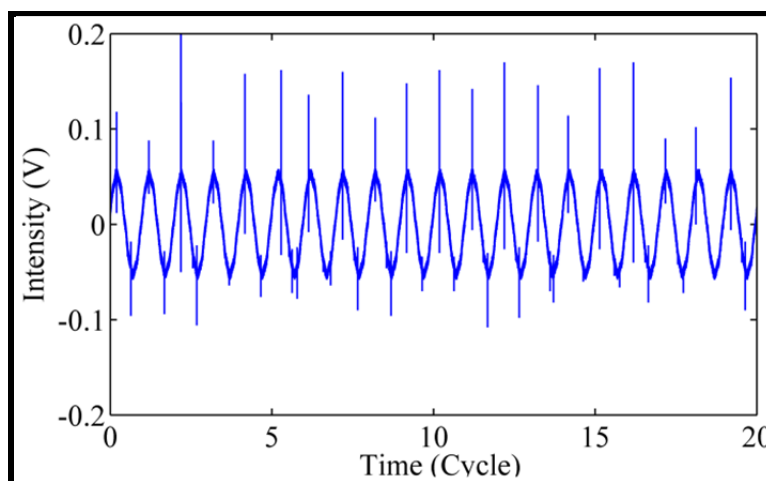


Figure 4.11 Exemple d'un signal brut à 2,45 kV

Des algorithmes ont été développés dans l'environnement Matlab® pour filtrer les fréquences indésirables et extraire les signaux utiles. Essentiellement, ces algorithmes emploient les techniques à base d'ondelettes (*wavelets*) discrètes pour filtrer et extraire les informations pertinentes à notre étude. Les différents résultats caractérisant les DP (amplitudes, temps des décharges et fréquences des décharges, position dans la phase) sont affichés par la suite sous forme de graphiques tels que le diagramme de résolution dans la phase, les diagrammes temporels et les diagrammes AAI. Ces modes de présentation sont communs dans l'usage scientifique et industriel pour la caractérisation des DP. Dans la section suivante, nous présenterons une brève introduction sur la technique d'analyse des signaux par les ondelettes.

4.2.1 La transformée en '*Wavelets*'

Dans le domaine du traitement numérique des signaux, le recours à la transformée en ondelettes est devenu une solution populaire pour l'analyse des signaux et surtout pour ceux qui contiennent des événements transitoires comme dans notre cas. L'emploi des ondelettes est un concept relativement récent qui date des années 1980 (Daubechies, 1990; Mallat, 1989). On les trouve dans plusieurs applications telles que la compression vidéo, le

traitement d'images, la reconnaissance d'objets. La méthode '*wavelets*' permet d'avoir une description plus efficace des signaux dans l'espace **fréquence-temps**. Elle utilise simultanément de larges fenêtres avec un faible taux d'échantillonnage pour extraire les basses fréquences et de petites fenêtres avec un plus grand taux d'échantillonnage pour localiser les événements à haute fréquence.

L'analyse par ondelettes considère qu'un signal temporel, pas nécessairement périodique, peut être reconstruit par la translation et la mise en échelle de petites fonctions ondulatoires appelées 'ondelettes mères' (*mother wavelets*). La fonction ondelette mère est généralement choisie comme une onde oscillatoire qui s'amortit dans les deux directions temporelles à partir du centre de sa médiane. Son spectre est donc un passe-bande. La Figure 4.12 montre un exemple d'ondelette Daubechies Db20.

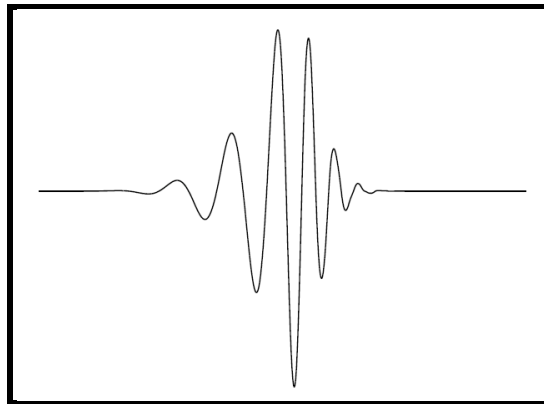


Figure 4.12 Exemple d'ondelette Db20
(Isaac *et al.*, 2008)

Les ondelettes sont de formes et de tailles diverses (*voir* Figure 4.13). En étirant et en déplaçant une ondelette, nous pouvons l'aligner sur un détail caché du signal et ainsi identifier le contenu en déterminant sa position dans le temps et sa fréquence.

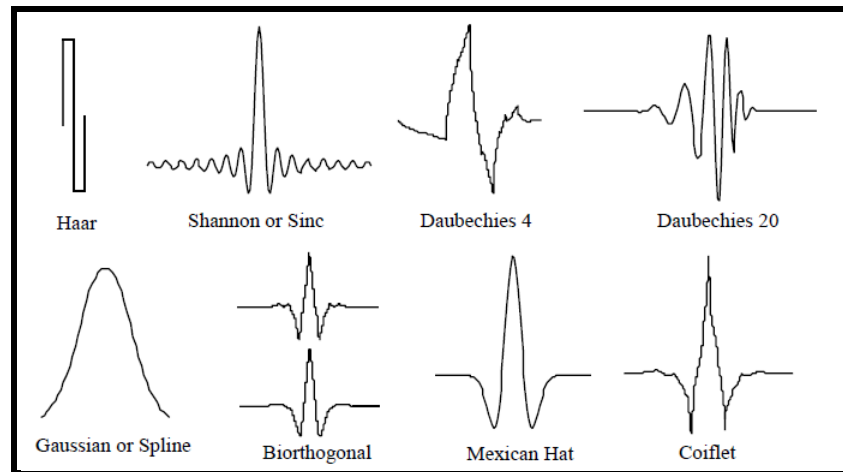


Figure 4.13 Quelques ondelettes mères (Fugal, 2009)

La Figure 4.14 illustre schématiquement le processus d'analyse avec la méthode des ondelettes. Elle ressemble en principe à la transformation de Fourier, sauf qu'ici, au lieu d'utiliser des sinusoïdes, on utilise une ondelette qui peut être étirée et aussi translatée.

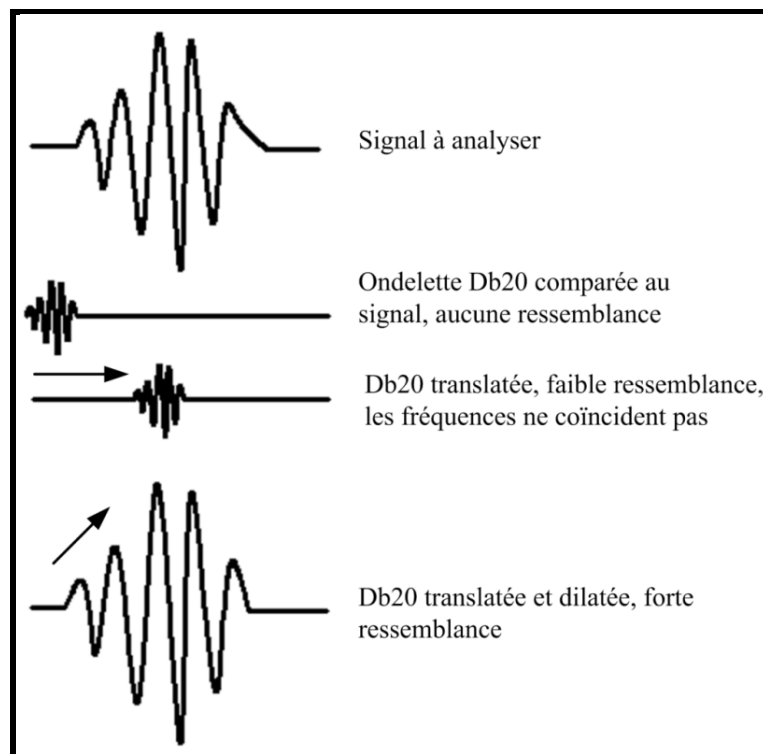


Figure 4.14 Schéma du processus d'analyse par ondelette
Adapté de (Fugal, 2009)

Pour un signal temporel $g(t)$ et une fonction ondelette de base $\psi(t)$, la transformée en ondelettes correspondante, $W(a,b)$ est défini comme :

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \psi_{a,b}(t) dt \quad (4.6)$$

Les fonctions famille de l'ondelette $\psi(t)$ sont définies par :

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a > 0, -\infty < b < \infty \quad (4.7)$$

Où :

a : Paramètre d'échelle (*scale factor*),

b : Paramètre de décalage (*shifting*).

Pour un instant donné $t=b$, si le signal $g(t)$ contient un événement oscillatoire de fréquence f proche de $1/a$, alors le résultat de l'intégration de l'équation (4.6) donnera lieu à une valeur (coefficient) significative.

En effet, les détails du signal $g(t)$, loin du point $t=b$, n'ont pas d'importance et ceci est dû au fait de l'atténuation de l'ondelette mère dans les deux directions. La transformée fournit donc des informations locales sur la fréquence du signal $g(t)$ autour de $t=b$. Quand le paramètre (b) est varié, la fonction $g(t)$ est balayée dans l'espace-temps et quand le paramètre (a) est changé, les différentes signatures de fréquences contenues dans le signal sont révélées. La fonction $g(t)$ est alors mappée dans l'espace fréquentiel.

D'une manière simplifiée, la transformée en ondelettes consiste à calculer un indice de ressemblance entre le signal traité et une ondelette de position (b) et de paramètre

d'échelle (a). Si l'indice est grand, la ressemblance est forte, sinon elle est faible (voir Figure 4.14). Les indices sont les coefficients d'ondelettes.

Le taux d'amortissement de l'ondelette mère est généralement choisi en fonction du facteur d'échelle (a). Si (a) est petit, ce qui correspond à une fréquence élevée, alors le taux d'atténuation est rapide (analyse locale) et si (a) est grand, correspondant à une fréquence faible, alors le taux d'atténuation est lent (analyse globale).

4.2.1.1 Transformée en ondelette discrète (*Discret Wavelet Transform - DWT*)

Dans l'analyse discrète, les ondelettes dans l'équation (4.7) ne sont pas translatées, ni mises à l'échelle de façon continue, mais plutôt de façon discrète. Cette manière de faire permet de minimiser le problème de redondance des coefficients, inhérent à la forme continue.

L'analyse DWT, qui est considérée comme étant une banque de filtre, consiste généralement en un traitement itératif à plusieurs niveaux (multi-résolution), chaque niveau désigné octave, est constitué d'une paire de filtres à réponse impulsionnelle finie (FIR), un filtre passe-bas LP et un filtre passe-haut HP. Chaque filtre est suivi d'un sous-échantillonneur comme le montre la Figure 4.15.

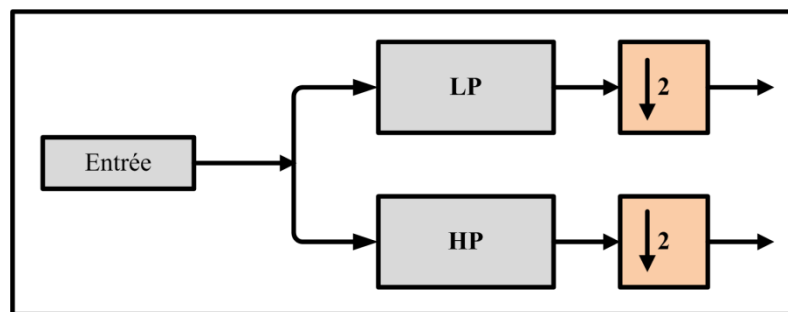


Figure 4.15 Un niveau d'analyse par DWT

Le filtre passe-bas (LP) produit une approximation du signal d'entrée (composantes basse fréquence) tandis que le filtre passe-haut (HP) produit le détail du signal d'entrée (composantes haute fréquence).

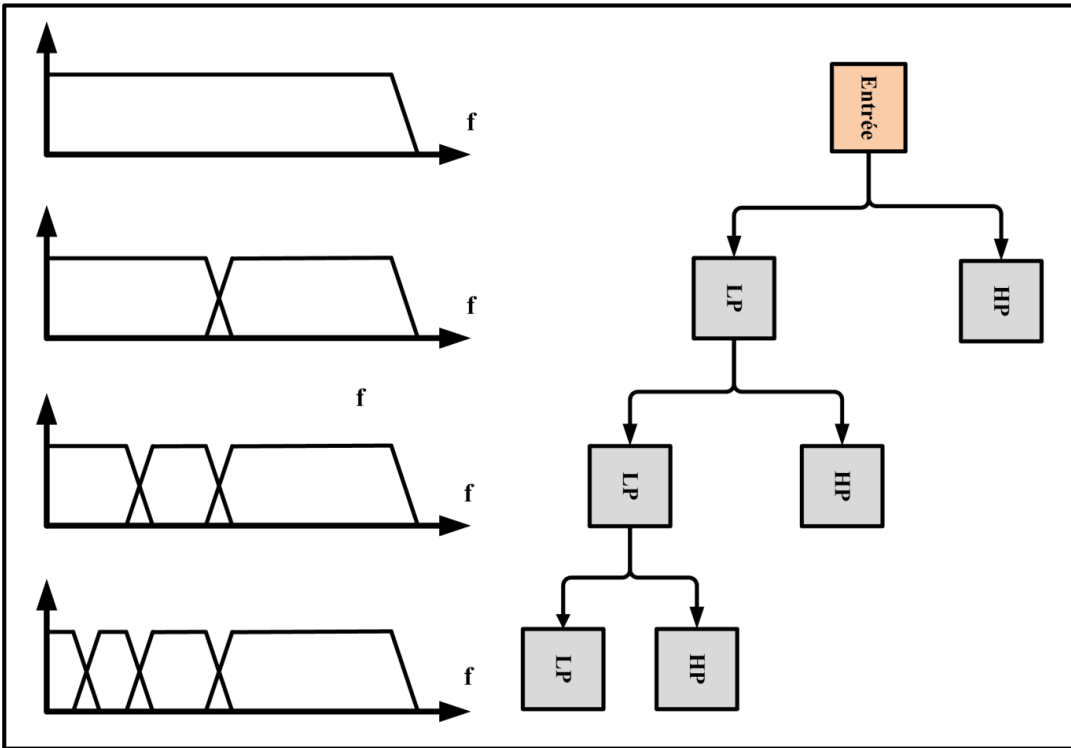


Figure 4.16 Fractionnement itératif du spectre d'un signal avec une banque de filtres

Par conséquent, l'analyse par ondelettes décompose un signal en un ensemble hiérarchique d'approximations et de détails comme montré sur la Figure 4.16. Les niveaux de la hiérarchie correspondent souvent à ceux d'une échelle dyadique (voir Figure 4.17). La relation entre un niveau j de la décomposition et le paramètre d'échelle (a) est définie par :

$$a = 2^j \quad (4.8)$$

Le paramètre (b) est choisi souvent comme étant proportionnelle au facteur d'échelle (a) tel que :

$$b = ka = 2^j k \quad (4.9)$$

Les fonctions famille de l'ondelette $\psi(t)$ s'écrivent alors comme suit :

$$\psi_{j,k} = 2^{\frac{-j}{2}} \psi(2^{-j}t - k) \quad (4.10)$$

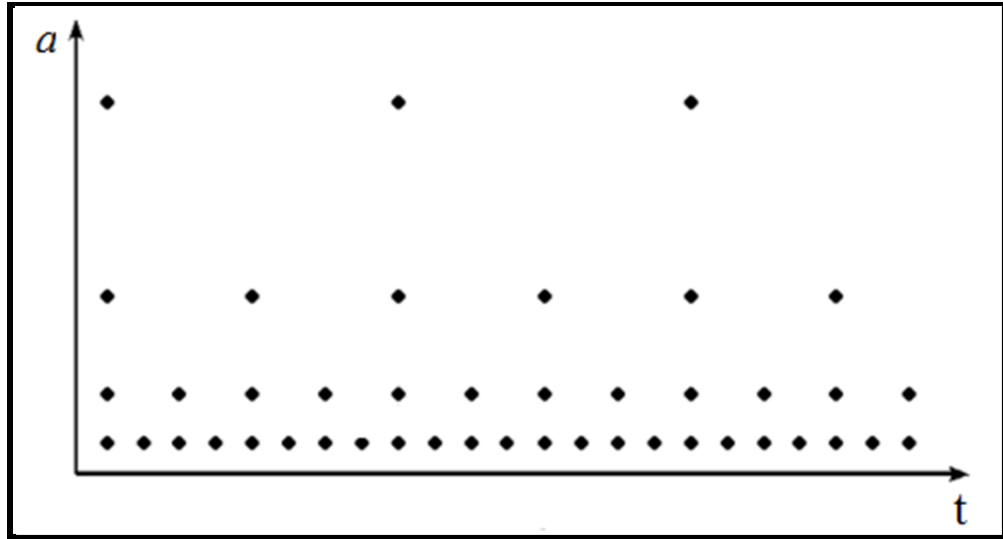


Figure 4.17 Espace temps-échelle sur une grille dyadique

Les expressions des équations (4.11) et (4.12) définissent respectivement le détail et l'approximation d'un signal à un niveau j .

$$D_j(t) = \sum_k C(j,k) \psi_{j,k}(t) \quad (4.11)$$

$$A_j = g(t) - \sum_{j < J} D_j \quad (4.12)$$

4.2.1.2 Transformée inverse

La transformée inverse permet de reconstruire un signal $g(t)$ à partir des coefficients $C(a,b)$ issus d'une analyse antérieure en ondelettes. La formule de la transformée inverse prend deux formes, une pour le cas continu et une autre pour le cas discret.

Cas continu :

$$g(t) = \int_{R^+} \int_R C(a,b) \psi_{a,b}(t) da db \quad (4.13)$$

Cas discret :

$$g(t) = \sum_j \sum_k C(j,k) \psi_{j,k} \quad (4.14)$$

4.2.1.3 Relation entre fréquence et échelle

Pour être précis, dans la transformée en ondelette, on parle de pseudo-fréquence. Cette dernière est reliée au paramètre d'échelle (a) par l'équation (4.15) (Abry, 1997) :

$$f_a = \frac{f_c}{aT} \quad (4.15)$$

Avec :

T : Période d'échantillonnage [s],

f_c : Fréquence centrale [Hz],

f_a : Pseudo fréquence [Hz].

4.2.2 Acquisition des signaux

Le premier maillon de la chaîne du post-traitement est l'étape d'acquisition des signaux bruts dans un format exploitable par les programmes de traitement. Dans cette section, nous présenterons les algorithmes d'acquisition des données des signaux issus des piézoélectriques et aussi des signaux issus du coupleur capacitif.

4.2.2.1 Cas des capteurs piézoélectriques

Les signaux issus des piézoélectriques sont mesurés par un oscilloscope Tektronix3014B® en utilisant le mode ‘détection de crête’. Ce dernier permet la détection des évènements transitoires rapides, tels que les impulsions induites par l’activité des DP, même si l’échelle du temps est grande. L’oscilloscope Tektronix3014B® enregistre le signal en deux fichiers format texte (*.txt). Le premier contient des données décrivant le profil maximum du signal. Le deuxième contient les données du profil minimum pour l’acquisition du signal des décharges pour une durée donnée. Nous avons utilisé le logiciel SignalExpress® de Labview® et le port GPIB.

Afin d’exploiter les fichiers textes enregistrés, un programme Matlab® a été développé pour extraire les informations utiles et combiner les deux profils pour reconstituer le signal brut. Le diagramme de la Figure 4.18 montre ce processus.

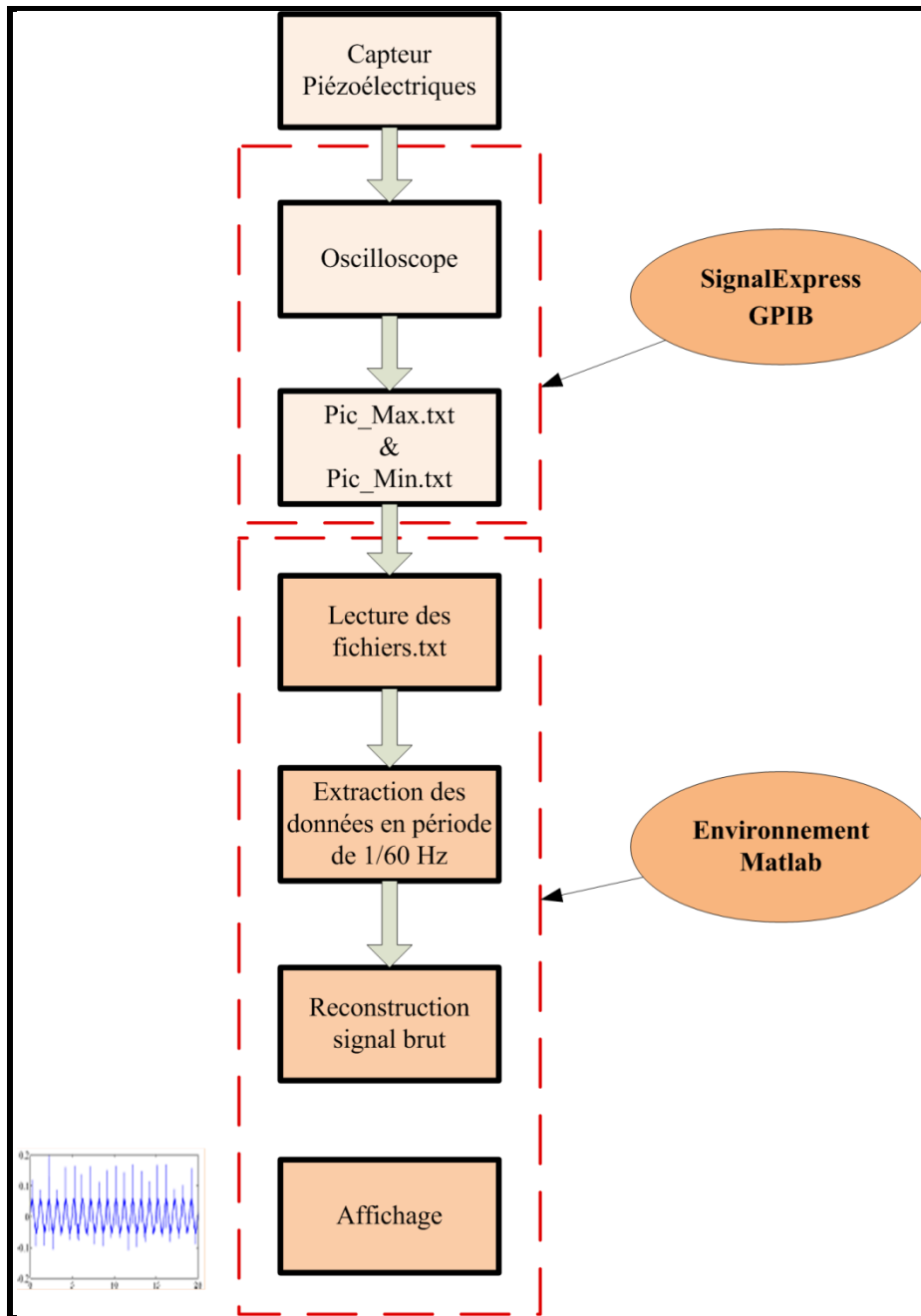


Figure 4.18 Diagramme d'acquisition du signal issu des capteurs piézoélectriques

4.2.2.2 Signal du coupleur capacitif

Dans le but de comparer les mesures des capteurs piézoélectriques aux mesures d'un système de mesure électrique (couplage capacitif) reconnu et compatible avec la norme IEC 60270, nous avons utilisé le module commercial d'analyse de décharges partielles MPD600 d'Omicron®. Ce dernier permet l'enregistrement des événements de DP dans deux fichiers binaires.

Le premier fichier d'extension (*fichier.Q*) contient les valeurs des intensités de DP (exprimées en Coulomb) formatées sur 32 bits et les valeurs des instants où les événements des DP sont survenus (exprimées en seconde) formatées sur 64 bits. Tous les événements de DP sont enregistrés par ordre chronologique et chaque valeur d'intensité est suivie immédiatement par son instant d'occurrence. L'instant du premier événement de DP est zéro (0) seconde.

Le deuxième fichier d'extension (*fichier.PH*) contient un vecteur de positions de phase des événements de DP, constitué de valeurs binaires de 64 bits comprises entre 0 et 1. Une valeur de zéro signifie que l'événement est survenu au début du cycle de référence (tension d'alimentation) et une valeur par exemple de 0.25 signifie qu'il s'est produit à 25 % du cycle de référence.

Le diagramme de la Figure 4.19 montre le processus d'acquisition du signal issu du coupleur capacitif et l'algorithme adopté pour la lecture des différents fichiers dans l'environnement Matlab®. En fin de traitement, les données des deux fichiers (.Q) et (.PH) seront rassemblées dans une seule matrice Q de trois colonnes. La première colonne contient les intensités des DP, la deuxième contient les instants d'occurrence des DP et la dernière contient les positions de phase des DP.

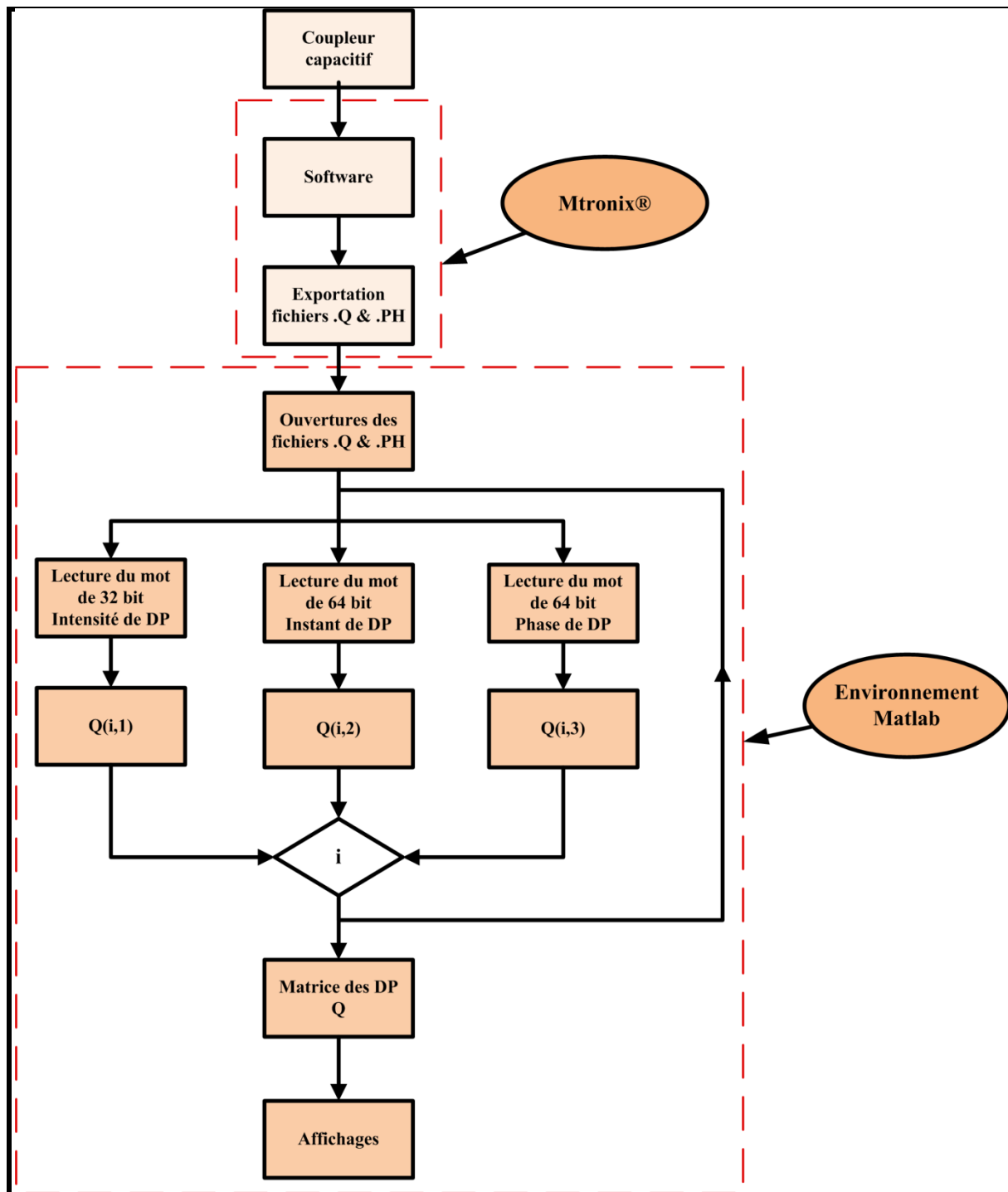


Figure 4.19 Diagramme d'acquisition du signal issu du coupleur capacitif

4.2.3 Processus retenu pour le traitement

Une décomposition jusqu'au sixième niveau du signal brut avec l'ondelette Daubechies db3 a permis le filtrage de l'onde de 60 Hz. Un seuil supérieur au niveau du bruit de fond et un test dans la phase ont été appliqué au signal synthétisé pour le débarrasser du bruit de fond et des réflexions. Le diagramme à la Figure 4.20 résume le processus de filtrage retenu.

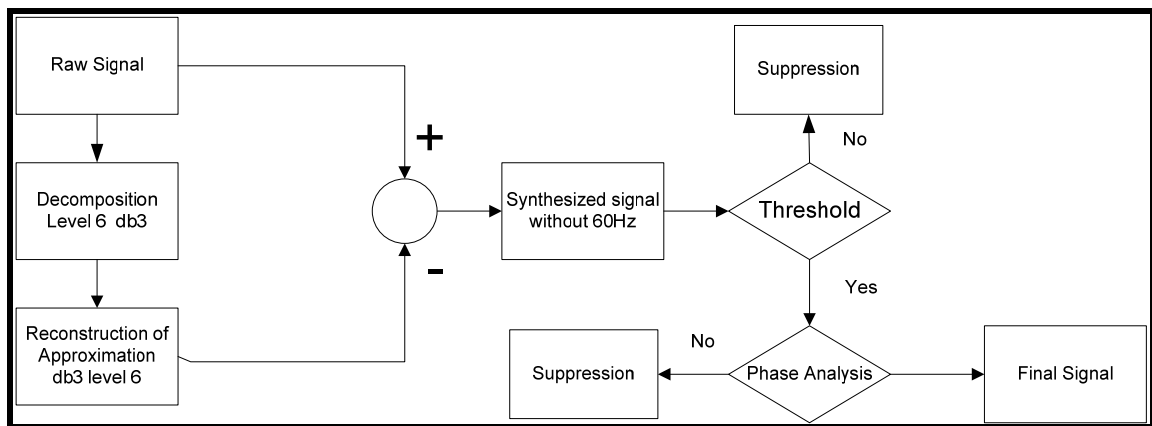


Figure 4.20 Diagramme du processus de traitement

La Figure 4.21 montre un exemple des signaux à 3 kV pris avant et après l'application du processus de traitement numérique de filtrage.

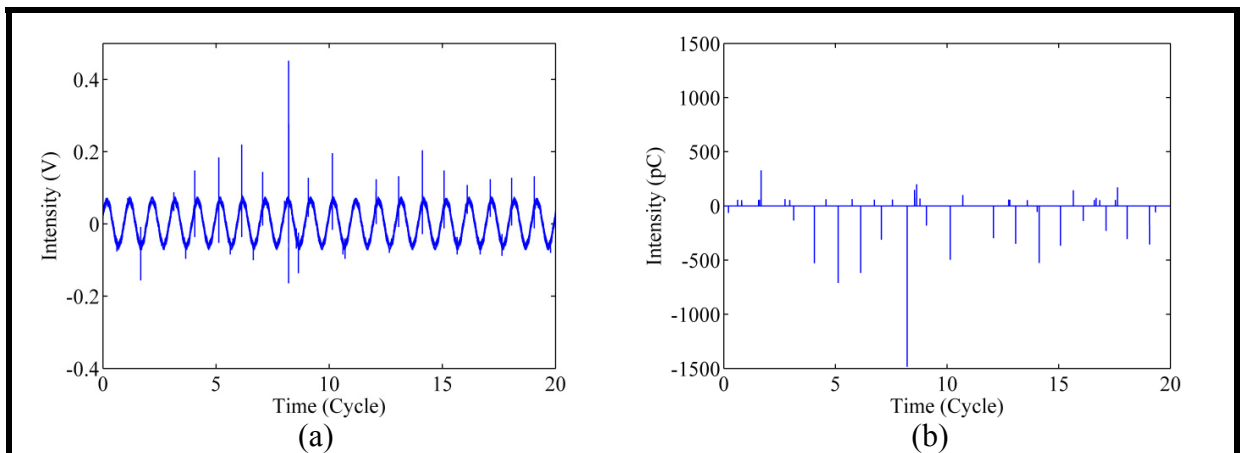


Figure 4.21 Signaux à 3 kV a) Avant traitement b) Après traitement

4.2.4 Construction du diagramme de résolution dans la phase DRPDP

Les diagrammes DRPDP permettent de tracer l'amplitude des impulsions en fonction de leur position dans la phase. Ce genre de représentation est d'une grande utilité pour le diagnostic de DP. En effet, les digrammes DRPDP permettent d'identifier les types et les signatures des DP. Dans la littérature des DP, on trouve deux types de digramme DRPDP. Les premiers sont les diagrammes à deux dimensions représentant les impulsions de décharges dans l'espace **phase-intensité** sans tenir compte de leurs fréquences d'occurrence. Les seconds sont les diagrammes tridimensionnels, qui en plus de tenir compte des deux premiers paramètres, la position de phase et l'amplitude des DP, intègrent un troisième paramètre qui est le nombre de décharges par position de phase et par intensité de décharge. Pour représenter le troisième paramètre, deux techniques existent : la première ajoute un troisième axe pour aboutir à une représentation 3D, la deuxième se contente d'une représentation 2D enrichie et utilise une palette de couleur pour identifier les différentes fréquences de décharges (ce type de représentation peut être nommé comme 2D½).

Dans le cadre de notre thèse, nous avons développé des algorithmes pour afficher les signaux des DP issues des capteurs piézoélectriques dans les différents diagrammes DRPDP. La Figure 4.22 résume le processus de leur obtention.

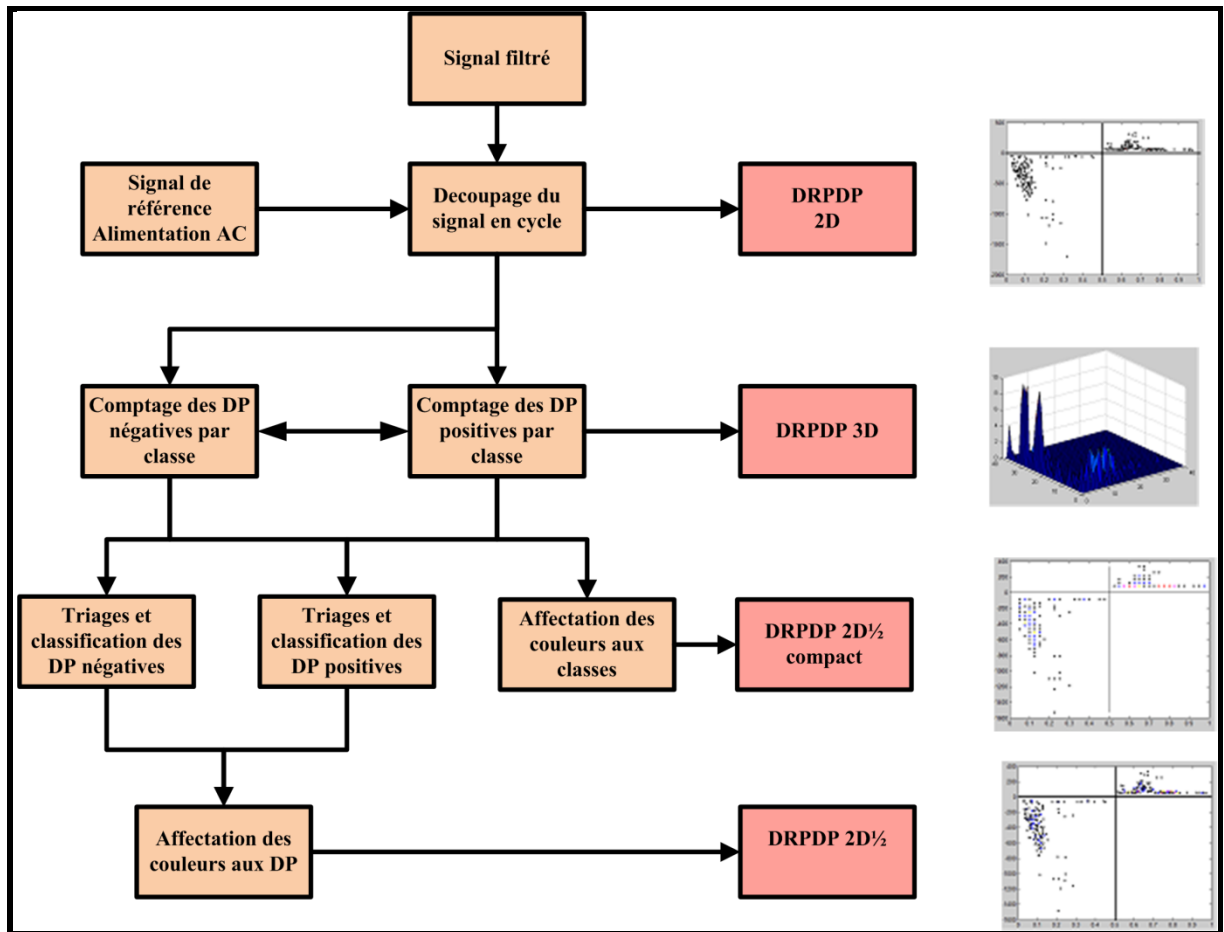


Figure 4.22 Algorithme du processus d'obtention des DRPDP

Pour tracer le DRPDP de type 2D, les données issues du capteur sont filtrées puis traitées afin de séparer les décharges de chaque cycle à part et ensuite les afficher sur une même période du signal d'alimentation haute tension tel qu'illustré à la Figure 4.23a.

À la suite de ce traitement, les données subissent une opération de comptage des DP qui permet de les classer en fonction de leurs positions de phase et de leurs amplitudes. À ce stade, le diagramme de type 3D comme celui représenté à la Figure 4.23b peut être affiché. En affectant à chaque classe de DP une couleur et un point, le DRPDP de type 2D½ compact peut aussi être tracé (voir Figure 4.23c). D'autre part, une opération de triage et d'indexation des DP de même classe permet d'afficher les DP dans un diagramme DRPDP de type 2D½.

Dans ce dernier type, toutes les DP de chaque classe sont tracées avec la même couleur. La Figure 4.23d montre un exemple de ce type de graphique.

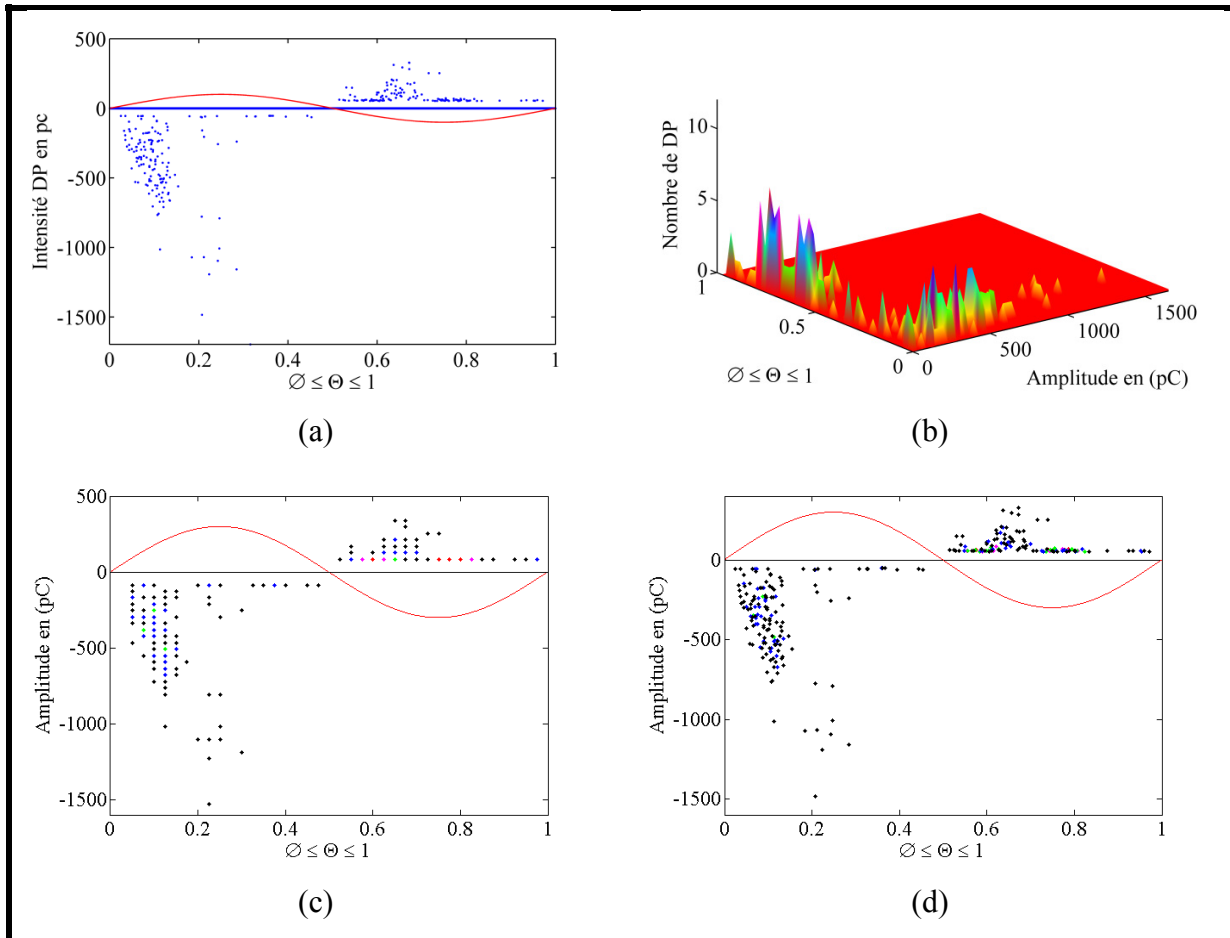


Figure 4.23 Les différents diagrammes de résolution dans la phase
a) DRPDP 2D b) DRPDP 3D c) DRPDP 2D $\frac{1}{2}$ compacte d) DRPDP 2D $\frac{1}{2}$

4.2.5 Construction du diagramme d'analyse d'amplitude des impulsions AAI

Ce diagramme trace le taux des impulsions de décharges (nombre par seconde) en fonction des classes d'amplitude. Il a été introduit dans le domaine des décharges partielles par Bartnikas dans les années 60 (Bartnikas et Levi, 1969). Ce diagramme donne une indication formelle sur le taux de répétition des impulsions.

Nous avons développé le code informatique nécessaire pour compter le nombre d'impulsions positives et négatives par seconde et de les catégoriser par la suite en fonction des classes d'intensité. Une interpolation non linéaire par une fonction de type ax^b est appliquée aux nuages de points obtenus. La Figure 4.24 montre un exemple de courbes AAI (décharges positives et négatives) tracées pour une tension de 3 kV.

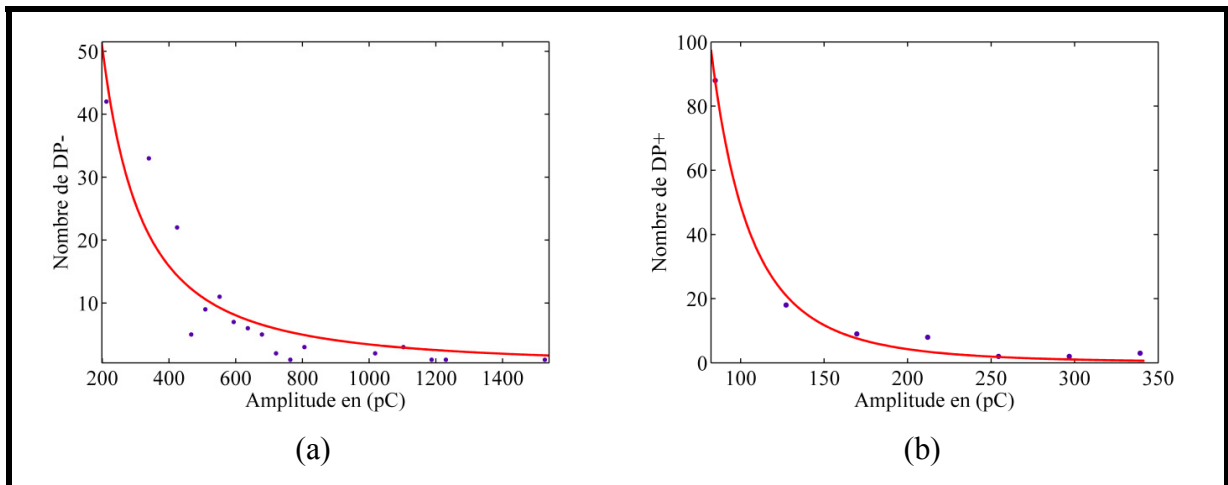


Figure 4.24 Diagramme d'analyse d'amplitude AAI a) DP négatives b) DP positives

4.3 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'avoir une idée sur l'ordre de grandeur des contraintes électriques susceptibles d'être présentes dans le banc d'essai. Nous avons aussi pris connaissance des différents outils d'analyse et de représentation de DP. Les résultats de ce chapitre seront directement exploités dans le chapitre suivant qui sera consacré à la validation des mesures prises par les capteurs piézoélectriques.

CHAPITRE 5

ANALYSE MÉTROLOGIQUE DES NOUVEAUX CAPTEURS PIÉZOÉLECTRIQUES

Pour confirmer la capacité des capteurs piézoélectriques à détecter les DP, il convient de confronter les mesures de décharges issues de ces capteurs à celles issues d'un système commercial et reconnu comme conforme à la norme internationale sur la mesure des DP (IEC, 2000). Le but de cette opération est de valider la compatibilité des deux mesures, et par conséquent, prouver que les mesures effectuées par les nouveaux capteurs sont conformes d'un point de vue métrologique.

Dans ce chapitre, nous exposerons les résultats de validation des mesures des nouveaux capteurs. Notre référence (étalon) sera des mesures prises par un système conventionnel d'Omicron®, doté d'un coupleur capacitif de 1 nF. La corrélation entre les deux types de mesures est présentée et validée dans ce chapitre.

5.1 Paramètres d'expérimentation

La comparaison des deux méthodes sera produite principalement à l'aide des diagrammes temporels, de résolution dans la phase et d'analyse d'amplitude. Comme la méthode électrique détecte des impulsions transitoires et rapides dues au transfert de charge occasionné par les événements de DP, il est impératif, si l'on veut avoir des diagrammes représentant sensiblement les mêmes DP, de capter les signaux de haute fréquence et aussi d'avoir la même référence de déclenchement d'enregistrement (*triggering signal*).

5.1.1 Mode d'acquisition et base de temps

Pour pouvoir enregistrer des signaux sur une période correspondante à 60 Hz, ce qui est relativement très grand par rapport à la période des impulsions électriques de décharges (de l'ordre de quelques ns), et aussi en même temps détecter les événements transitoires rapides

des DP, nous utilisons la fonction d'acquisition détection de crête de l'oscilloscope Tektronix® TDS3014 (sa fréquence d'échantillonnage peut atteindre 1,25 GHz) et une base de temps de l'ordre de 2 ms par division.

La fonction de détection de crête de Tektronix® permet de mettre en valeur dans un signal les parasites et les pointes d'impulsions rapides de l'ordre de 1 ns, même si la base de temps est réglée sur une faible valeur. Le mode 'détection de crête' utilise les amplitudes minimales et maximales de deux intervalles consécutifs pour représenter un signal. La Figure 5.1 explique schématiquement le principe de ce mode.

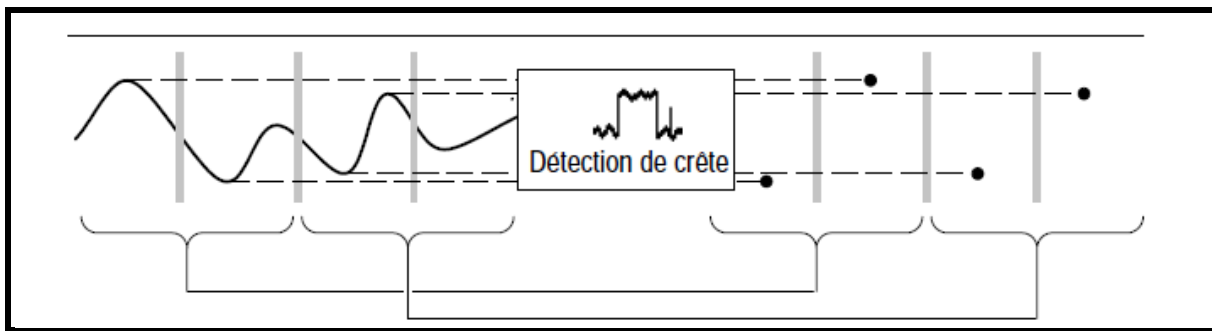


Figure 5.1 Principe du mode détection de crête (Tektronix®)

Le signal AC d'alimentation est pris comme source de déclenchement d'enregistrement et aussi comme référence pour le traçage des diagrammes DRPDP.

5.1.2 Essai à vide

Des essais à vide ont été effectués pour déterminer le seuil de filtrage du bruit de fond (*Noise Threshold*) qui sera utilisé par la suite dans les programmes de traitement de signal par ondelettes. Les différents essais ont enregistré des bruits aléatoires répartis le long des signaux. La Figure 5.2 montre deux exemples de signaux enregistrés à vide.

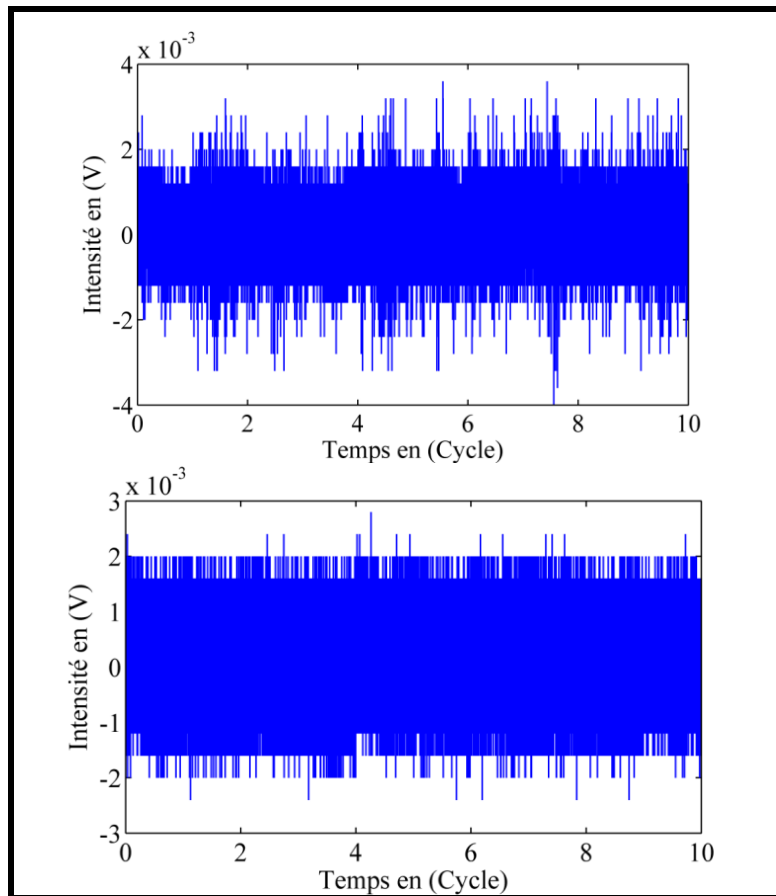


Figure 5.2 Signaux enregistrés à vide

Pour soustraire le maximum de bruit et de signaux indésirables, un seuil égal à 1,5 fois l'amplitude maximale est appliqué. Il est à noter que nous recommandons que le test à vide soit effectué avant chaque essai.

5.2 Validation descriptive

Une première validation est faite de façon descriptive en traçant à partir des résultats issus des deux méthodes les diagrammes temporels, les diagrammes de parité, les diagrammes de résolution dans la phase et aussi les diagrammes de fréquence versus intensité des décharges.

5.2.1 Diagrammes temporels

Les différentes mesures prises montrent que les impulsions de décharges commencent à se manifester presque au même seuil de tension, pour les deux systèmes de mesure (coupleur capacitif et piézoélectrique). Ce seuil dépend en plus des conditions de mesures (température, humidité,...), de la distance séparant la pointe du plan de masse. La Figure 5.3 et Figure 5.4 montrent des décharges apparaissant sur les deux systèmes pour un seuil de tension de 2,45 kV.

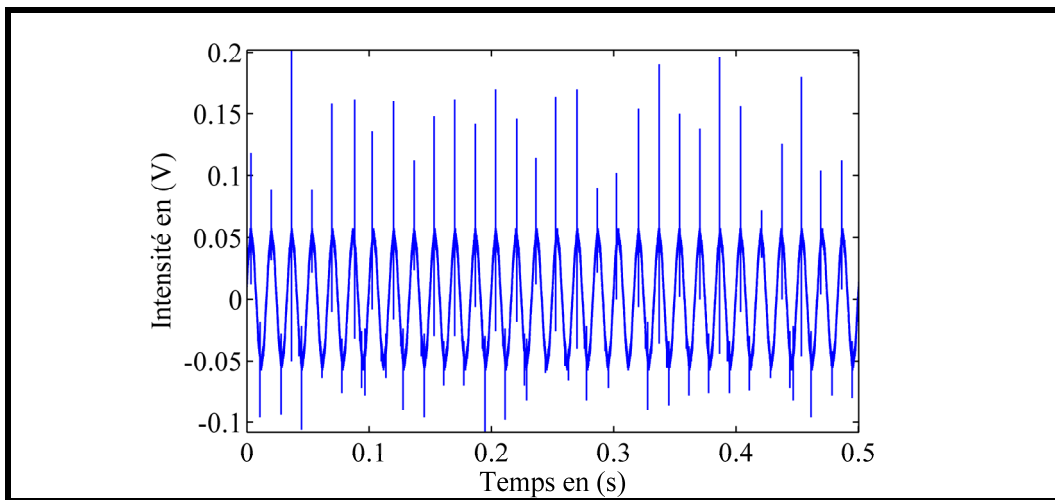


Figure 5.3 Signal brut de DP mesuré par un capteur piézoélectrique à 2.45 kV

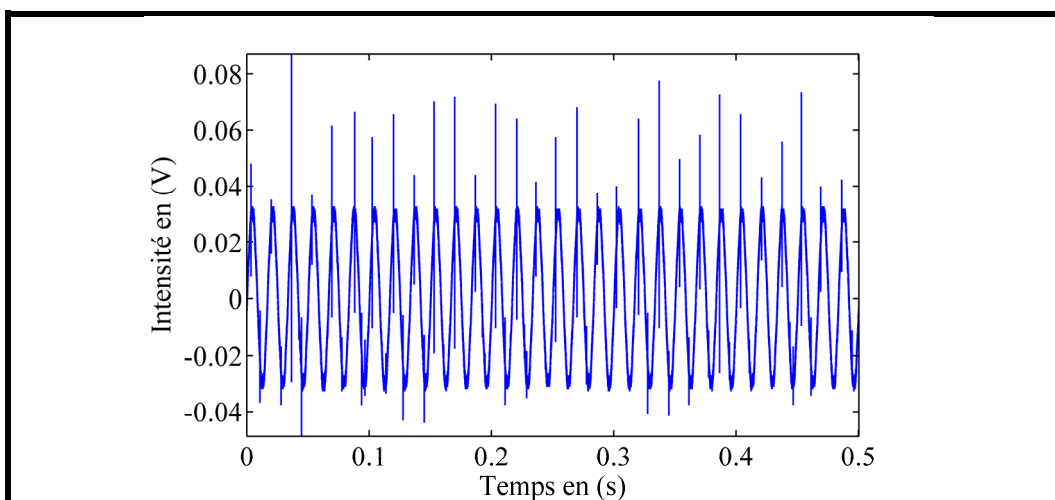


Figure 5.4 Signal brut de DP mesuré par le coupleur capacitif à 2.45 kV

La Figure 5.5 montre quelques signaux typiques tels que détectés simultanément par un capteur piézoélectrique et le coupleur capacitif, lorsque des DP se produisent à l'intérieur du banc d'essai. La première paire est prise à 3 kV, la deuxième à 3,6 kV et la dernière à 4,43 kV. Les signaux positionnés à droite correspondent au capteur piézoélectrique et ceux à gauche correspondent au coupleur capacitif.

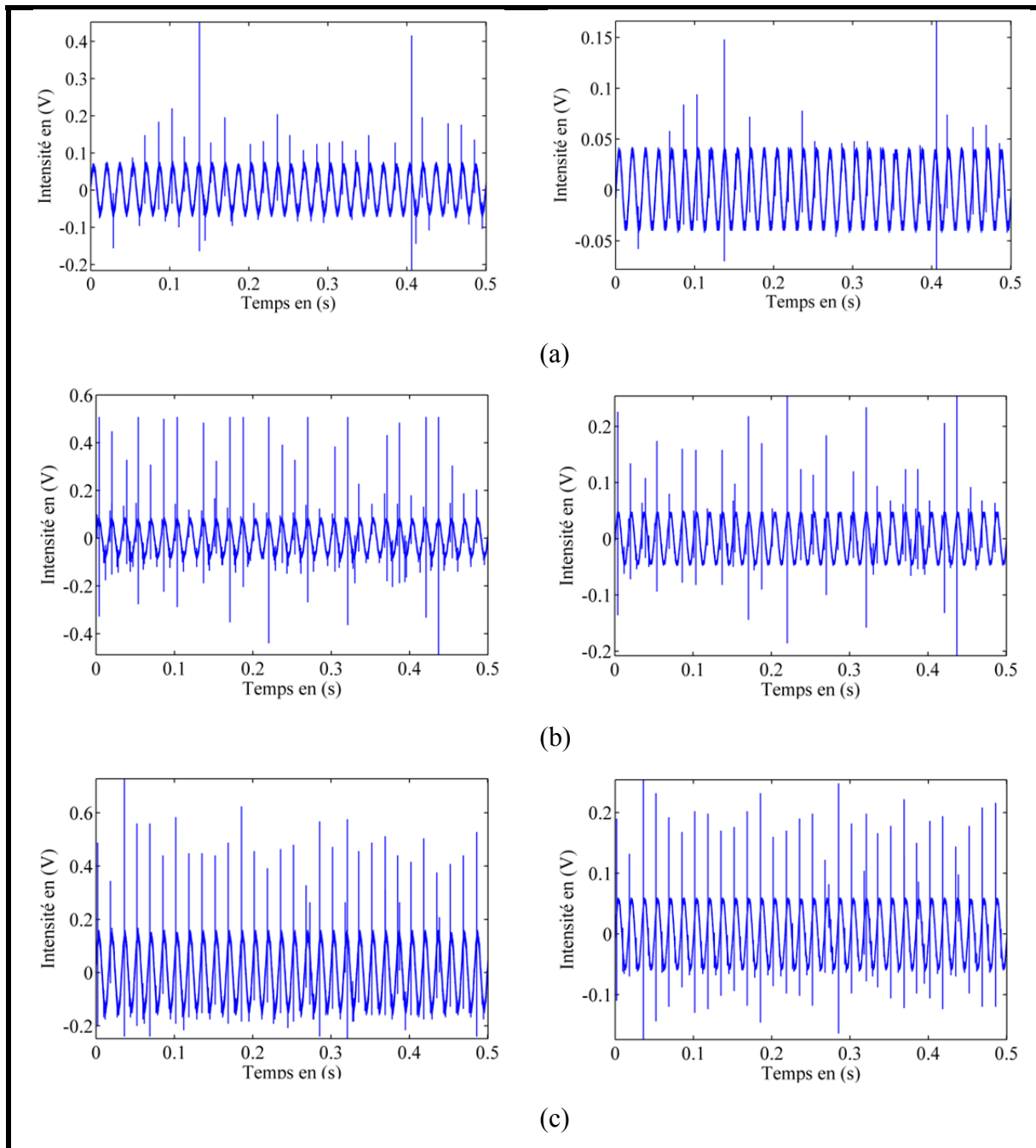


Figure 5.5 Des DP détectées simultanément par le capteur piézoélectrique (colonne gauche) et le coupleur capacitif (colonne droite) aux tensions : a) 3,0 kV b) 3,6 kV c) 4,4 kV

À la suite d'un premier examen, on peut constater que les signaux bruts tels que détectés par les deux méthodes présentent une grande ressemblance.

La Figure 5.6 illustre une version de ces signaux après l'opération de traitement numérique de filtrage et isolation des impulsions de DP.

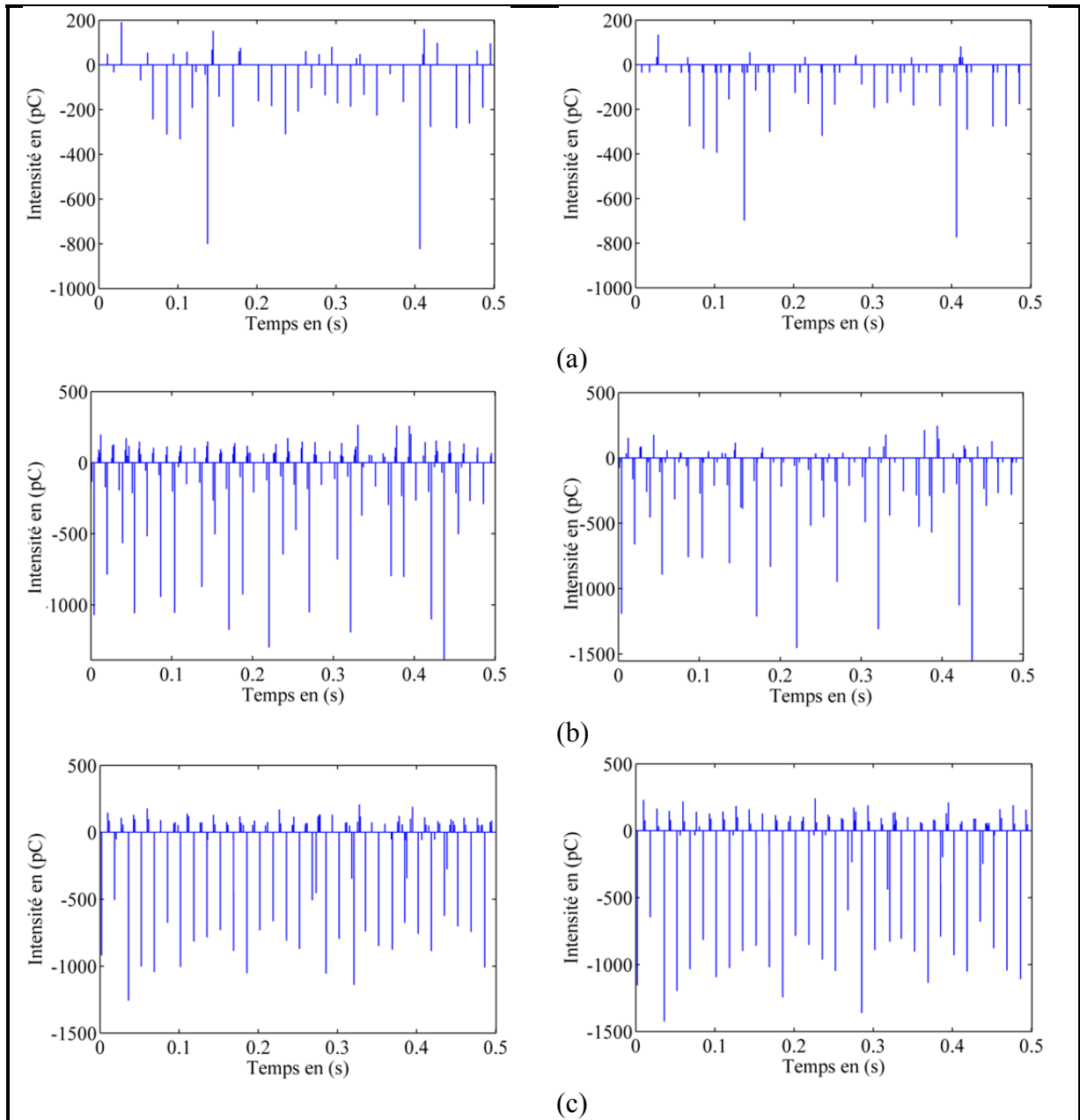


Figure 5.6 Signaux filtrés des DP détectés par le capteur piézoélectrique (colonne gauche) et le coupleur capacitif (colonne droite) aux tensions : a) 3,0 kV b) 3,6 kV c) 4,43 kV

Les signaux filtrés de DP mesurés par les deux méthodes confirment encore cette ressemblance visuelle.

5.2.2 Diagramme de parité

La Figure 5.7 montre les diagrammes de parité dans lesquelles sont tracés les résultats issus du capteur piézoélectrique en fonction des résultats donnés par le système à coupleur capacitif, pour les tensions de 2,45 kV, 3 kV, 3,6 kV et 4,4 kV.

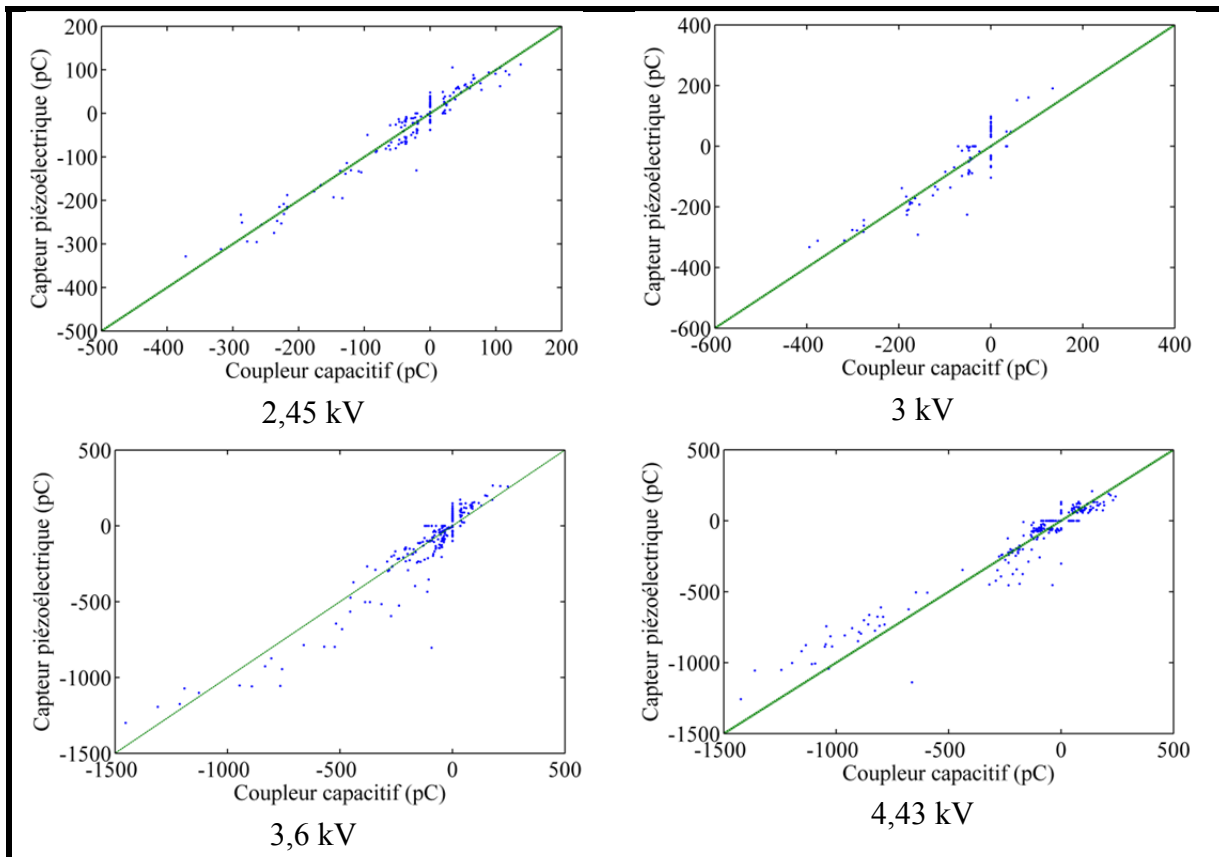


Figure 5.7 Mesures issues du capteur BIT/PZT en fonction de celles du coupleur capacitif pour les tensions de 2.45 kV, 3 kV, 3,6 kV et 4,43 kV respectivement

On constate que l'ensemble des points s'aligne globalement autour d'une ligne droite à 45°, ce qui montre *a priori* une bonne corrélation entre les deux systèmes de mesure. Nous remarquons aussi que pour les grandes intensités, les points ont tendance à se décaler légèrement de cette droite. Nous estimons que ce décalage est dû à un problème d'étalonnage (calibration). En effet, la marge d'intensité permise par le calibrateur [-50 pC 50 pC] est assez limitée et ne couvre que partiellement notre intervalle de mesure.

5.2.3 Diagramme de résolution dans la phase DRPDP.

Une comparaison des résolutions dans la phase, des mesures prises par cette nouvelle génération de capteurs et celles prises par le coupleur capacitif a été effectuée par le moyen des diagrammes DRPDP qui permettent de tracer l'amplitude des impulsions en fonction de la position de phase AC.

Les données enregistrées sont traitées par un algorithme (voir chapitre 4) afin de séparer les décharges de chaque cycle à part et ensuite de les afficher sur une même période du signal d'alimentation haute tension. Le taux de décharge par classe d'intensité et de phase est aussi calculé. La Figure 5.8 et la Figure 5.9 présentent les diagrammes DRPDP 3D et DRPDP 2D^{1/2} des essais effectués à 2,45 kV, 3 kV, 3,6 kV et 4,43 kV. Les diagrammes correspondants au capteur piézoélectrique sont mis dans la colonne de gauche et ceux correspondant au coupleur capacitif sont mis dans la colonne de droite. Tel qu'illustré dans les deux groupes de figures, on constate bien que les décharges surviennent presque aux mêmes positions dans la phase et ont relativement les mêmes taux de décharges.

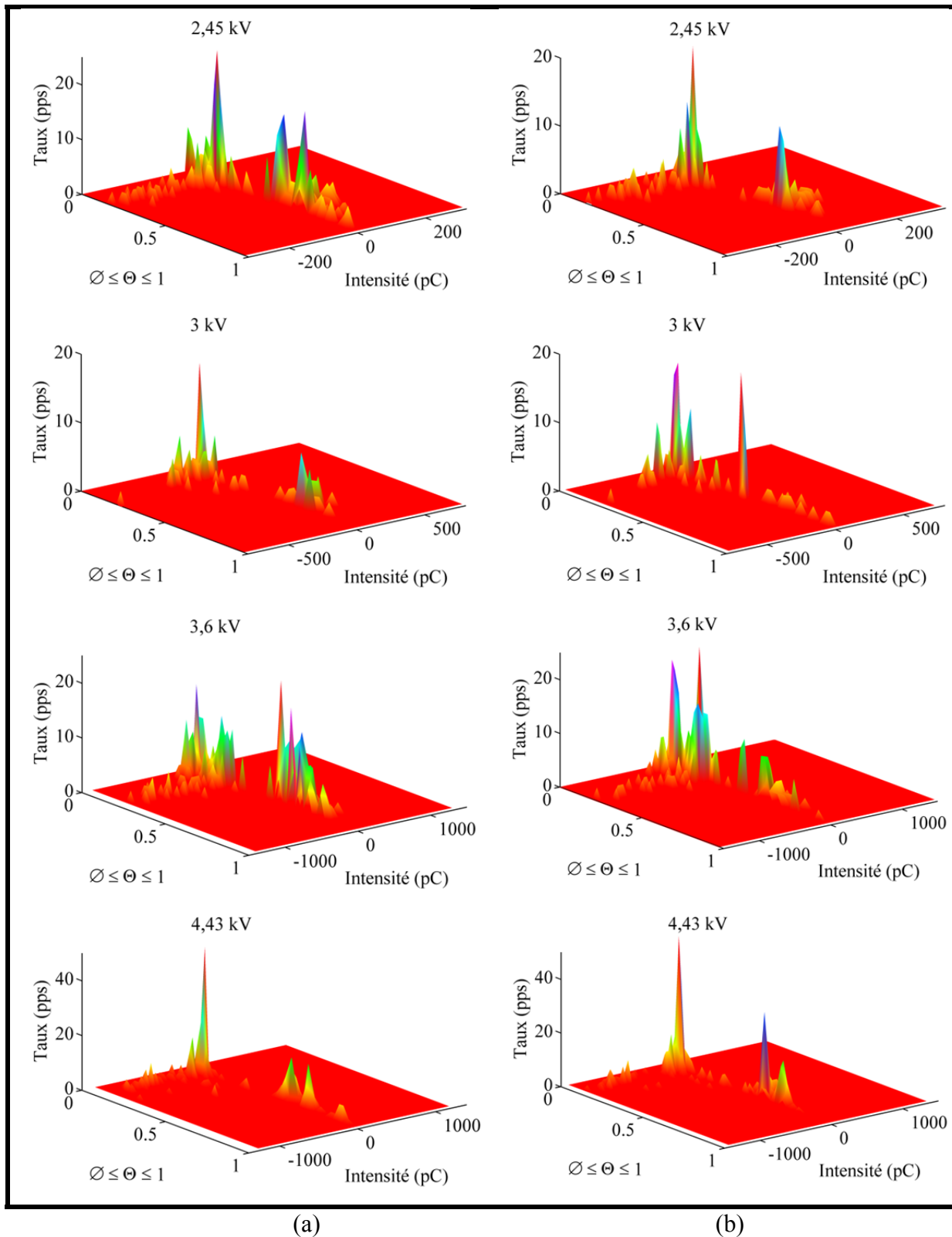
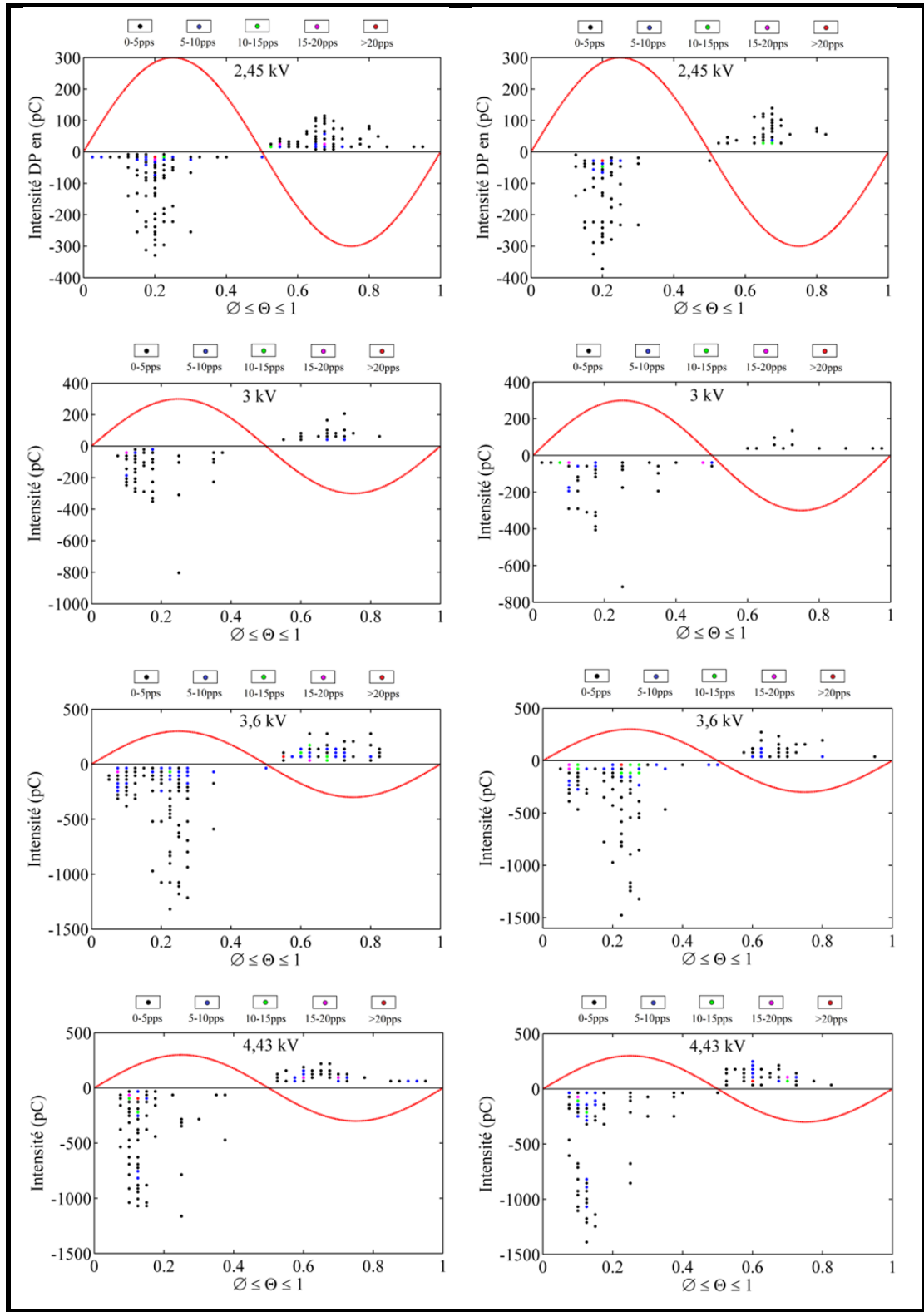


Figure 5.8 DRPDP 3D a) Piézoélectrique BIT/PZT b) Coupleur capacitif



(a) (b)
Figure 5.9 DRPDP 2D $\frac{1}{2}$ a) Piézoélectrique BIT/PZT b) Coupleur capacitif

5.2.4 Diagramme d'analyse d'amplitude des impulsions AAI.

Ce diagramme trace le taux (nombre par seconde) des impulsions de décharges en fonction des classes d'amplitude. Il donne une importante indication sur le taux de répétition des impulsions.

Un algorithme a été développé pour compter le nombre d'impulsions positives et négatives et ensuite pour les catégoriser en fonction des classes d'intensité. Une interpolation non linéaire par une fonction de type ax^b est appliquée aux nuages de points obtenus. La Figure 5.10 montre les courbes AAI (pour les deux méthodes) des décharges positives et négatives, tracées deux à deux pour les tensions de 2,45 kV, 3 kV, 3,6 kV et 4,43 kV.

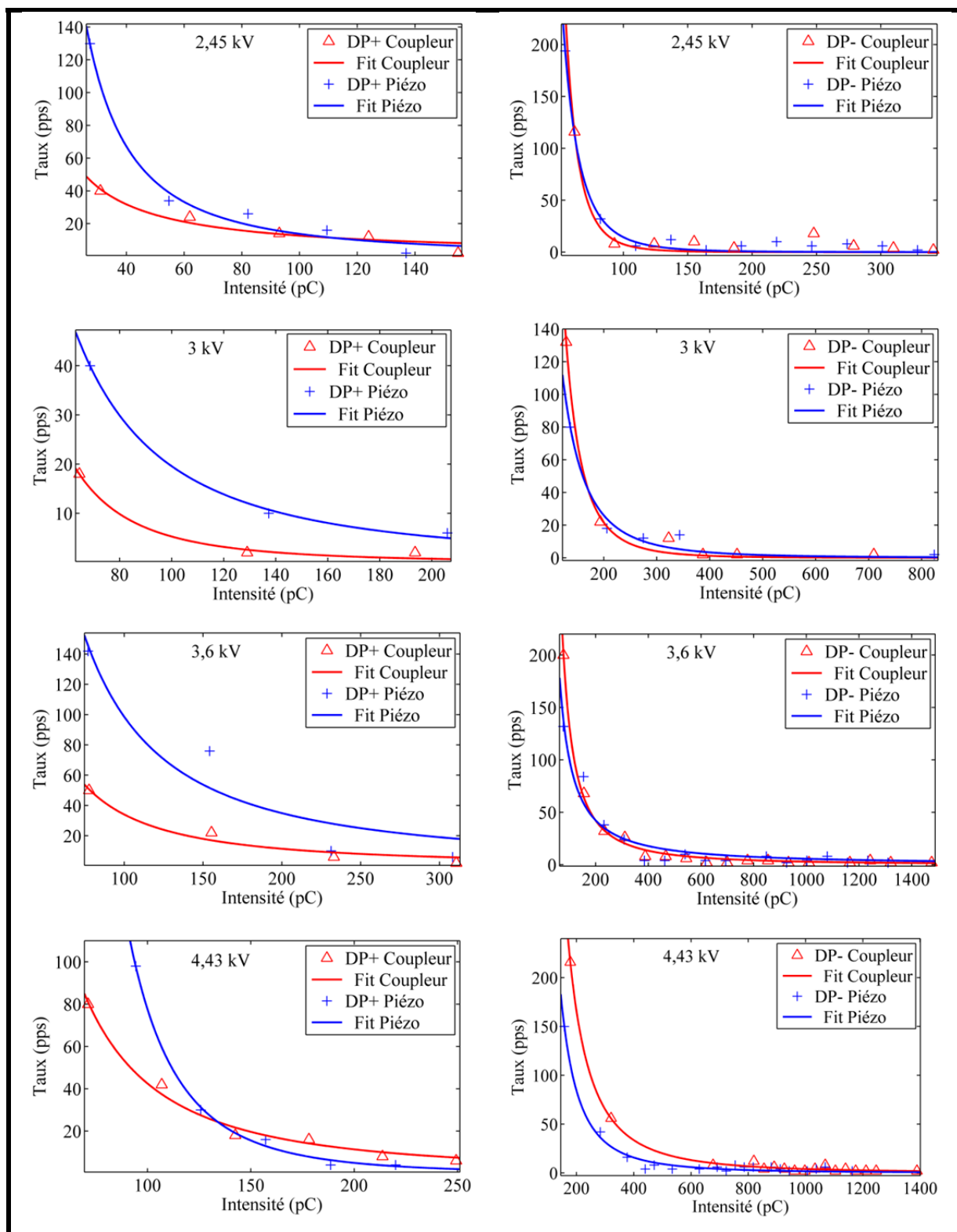


Figure 5.10 Diagrammes AAI des deux méthodes, pour les impulsions positives (gauche) et les impulsions négatives (droite)

Sur l'ensemble des graphiques, on peut voir clairement que les courbes approximant le nombre de décharges par classe en fonction des classes d'intensité pour les deux polarités sont sensiblement semblables (la polarité considérée et celle des impulsions et non de la ligne AC).

5.2.5 Analyse du biais

L'analyse du biais consiste à effectuer un test de Student pour comparer la moyenne de deux ensembles de données, distributions X_i et Y_i dans notre cas, ces deux distributions représentent les deux signaux numériques des DP enregistrés par chacun des deux systèmes. On évalue si la moyenne de la distribution des différences $d_i = Y_i - X_i$ est significativement différente du zéro. Le test est effectué par le calcul de la statistique de Student,

$$T_1 = \frac{\bar{d}}{s_d} \quad (5.1)$$

Avec \bar{d} qui représente la moyenne empirique des différences d_i de N mesures et s_d est l'estimateur de l'écart-type de l'échantillon. Le test est effectué en comparant la statistique T_1 à la valeur $t_{N-1, \frac{\alpha}{2}}$ lue pour un seuil de signification $\alpha/2$ dans la table de Student à $N - 1$ degré de liberté. Si $|T_1| > t_{N-1, \frac{\alpha}{2}}$ la méthode de mesure par la nouvelle génération de capteur piézoélectrique BIT/PZT sera invalidée au seuil de signification α . En d'autres termes, le biais sera statistiquement significatif. Le Tableau 5.1 ci-dessous résume les résultats de l'application de ce test sur les mesures avec quatre niveaux de tension.

Tableau 5.1 Analyse du biais

V (kV)	N	\bar{d} (pC)	s_d (pC)	α	$t_{N-1, \frac{\alpha}{2}}$	$ T_1 $
2,45	256	-0,078	21,47	0,05	1,96	0,004
3,00	140	10,600	45,66	0,05	1,97	0,232
3,60	334	6,730	83,81	0,05	1,96	0,080
4,43	286	10,390	86,99	0,05	1,96	0,119

La statistique $|T_1|$ étant très inférieure aux critères de Student $t_{N-1, \frac{\alpha}{2}}$, il n'est donc pas possible de conclure à l'existence d'une différence significative entre les mesures des deux systèmes. Nous concluons avec l'absence de tout biais significatif.

5.2.6 Analyse du niveau de corrélation

Ce test consiste à estimer si le niveau de corrélation entre deux variables X_i et Y_i est statistiquement significatif ou pas selon une probabilité d'erreur établie *a priori*. Une fois le coefficient de corrélation d'Anderson r est estimé par la formule,

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \bar{X} \bar{Y}}{n S_x S_y} \quad (5.2)$$

Nous évaluons si ce dernier est, statistiquement, significatif par le calcul de la statistique T_2 définie par (Jean-Noël, 2003) :

$$T_2 = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{N-2}}} \quad (5.3)$$

L'hypothèse H_0 de ce test est qu'il n'existe pas de corrélation entre les deux variables. Le test est effectué en comparant la statistique T_2 à la valeur $t_{N-2, \frac{\alpha}{2}}$ lue pour un seuil de

signification $\alpha/2$ dans la table de Student à $N - 2$ degré de liberté. Si $|T_2| > t_{N-2, \frac{\alpha}{2}}$ alors il faut rejeter l'hypothèse de la non-existence de dépendance linéaire entre la méthode de mesure par la nouvelle génération de capteur piézoélectrique et la méthode utilisant le coupleur capacitif. Si r est proche de 1, l'existence en moyenne d'une bonne corrélation entre les deux systèmes ne peut être écartée.

Le Tableau 5.2 montre les coefficients de corrélation déterminés pour les quatre essais ainsi que les statistiques T_2 .

Tableau 5.2 Coefficient de corrélation

V (kV)	N	r	α	$t_{N-2, \frac{\alpha}{2}}$	$ T_2 $
2,45	256	0,96	0,05	1,96	54,73
3,00	140	0,94	0,05	1,97	33,19
3,36	334	0,94	0,05	1,96	53,11
4,43	286	0,96	0,05	1,96	61,57

Comme on le remarque bien, les quatre coefficients de corrélation sont très proches de 1, ce qui prouve de plus la bonne cohérence entre les deux mesures. Également, la statistique $|T_2| > t_{N-2, \frac{\alpha}{2}}$ montre bien que les quatre coefficients de corrélation sont significativement différents de zéro. Nous ne pouvons pas donc rejeter l'hypothèse d'une réelle corrélation entre les deux systèmes de mesure.

5.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré que la nouvelle technologie de capteur piézoélectrique BIT/PZTHTUT présente un potentiel intéressant pour être adaptée à la mesure des décharges partielles. Les résultats expérimentaux obtenus sont comparables à ceux utilisant un coupleur capacitif standard. Outre leurs caractéristiques inhérentes citées précédemment, ces capteurs offrent une excellente alternative économique pour être employés dans la détection des décharges partielles.

CHAPITRE 6

ÉTUDES DE LOCALISATION DES DÉCHARGES

La localisation spatiale des foyers de DP peut être aussi importante que leur détection. Elle est d'un grand intérêt pour les opérations de maintenance des équipements électriques de puissance. Dans cette partie, nous exposerons le potentiel de cette nouvelle technologie à apporter des réponses à ce sujet en utilisant leur capacité à détecter les ondes acoustiques émises par une source de DP.

6.1 Localisation par émission acoustique

Comme mentionnés précédemment, les techniques acoustiques sont reconnues et employées dans l'analyse des défaillances et en contrôle non destructif. Plus spécifiquement, dans l'analyse des DP, elles sont employées massivement dans la détection et la localisation des sources de décharges dans les équipements électriques de haute tension tels que les machines tournantes et les transformateurs (Chien-Yi *et al.*, 2011; Venkatesh *et al.*, 2011).

La technique acoustique est basée sur la détection du signal mécanique (vibration) émis par la DP et qui agit comme une sorte de source ponctuelle d'ondes acoustiques, se propageant ainsi à travers l'isolation. Par conséquent, elle peut être détectées sur les parois de l'objet testé en utilisant des capteurs appropriés tels que les piézo-électriques et les microphones.

6.1.1 Équations physiques d'une source monopole

La propagation de la pression $p(x, y, z, t)$ d'une onde acoustique dans un milieu intermédiaire est décrite par les équations aux dérivées partielles suivantes (De Silva, 2007b) :

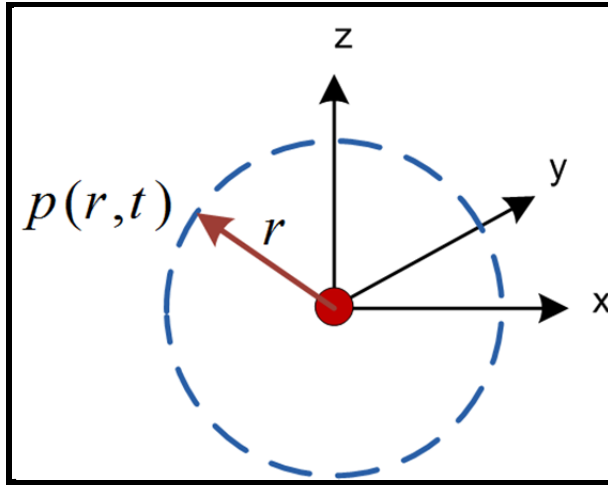


Figure 6.1 Champ sphérique d'un monopole

$$\Delta p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (6.1)$$

Où

$$\Delta \equiv \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \quad (6.2)$$

Et c est la vitesse du son dans le milieu considéré [ms^{-1}].

Si les pertes d'énergie par frottement visqueux sont prises en compte, l'équation devient :

$$\Delta p + \frac{4\eta}{3c^2} \frac{\partial \nabla^2 p}{\partial t} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (6.3)$$

η : est le coefficient de viscosité cinématique [m^2s^{-1}].

Si le mouvement de l'onde n'a aucune direction privilégiée et si la région de la source est compacte, le champ de propagation sera donc de forme sphérique en fonction de la

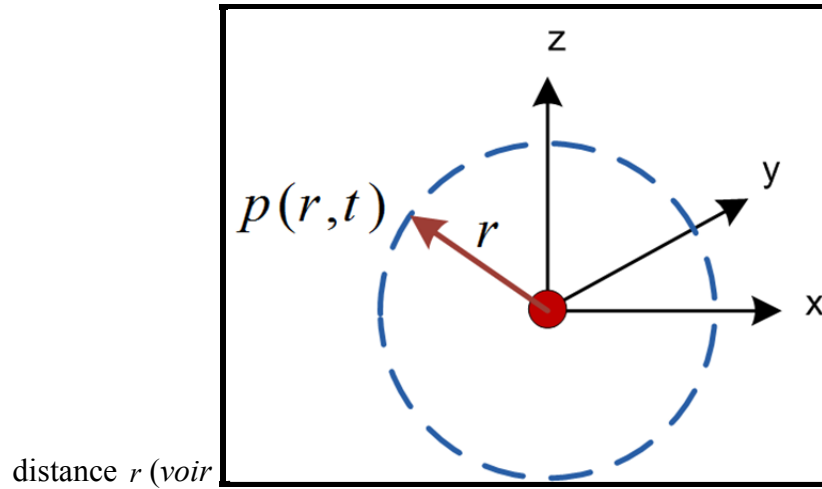


Figure 6.1). Son équation en coordonnées polaires s'écrit comme :

$$\frac{4\eta}{3c^2} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2(rp)}{\partial r^2} \right) + \left(\frac{\partial^2(rp)}{\partial r^2} \right) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2(rp)}{\partial t^2} = 0 \quad (6.4)$$

La solution analytique explicite pour cette équation différentielle serait :

$$p(r, t) = \frac{A}{r} e^{-\alpha r} e^{j(\alpha t - \beta r)} \quad (6.5)$$

Avec :

$$k = \mp \frac{\omega/c}{\sqrt{1 + j \frac{4\delta}{3}}} = \mp (\beta - j\alpha) \quad (6.6)$$

Et

$$\delta = \frac{\omega\eta}{c^2} \quad (6.7)$$

Où, α est le coefficient d'absorption du milieu de propagation [dBm⁻¹].

L'intensité acoustique I et la puissance totale P_t peuvent être exprimées par les formules suivantes :

$$I = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (6.8)$$

$$P_t = (4\pi r^2) I \quad (6.9)$$

On voit bien que l'intensité acoustique est inversement proportionnelle au produit $r^2 e^{\alpha r}$.

6.2 Méthodes de localisation des foyers des décharges partielles

La possibilité de détermination de l'endroit de la décharge est, sans doute, le plus important avantage de la méthode acoustique. Le principe de localisation peut être basé soit sur la mesure du temps d'arrivée du signal aux capteurs (Felizardo *et al.*, 2009; Kil *et al.*, 2009; Xiaodi *et al.*, 2008), soit sur la mesure de l'intensité de l'énergie du signal acoustique.

Nous nous limiterons dans cette partie à développer la première méthode se basant sur le temps de vol de l'onde acoustique. La seconde méthode sera présentée en Annexe II.

Pour avoir une solution au problème de localisation spatiale du foyer de la DP, un minimum de quatre (4) capteurs est requis puisque le système à résoudre contiendra quatre inconnues, l'instant du départ de l'onde à la source t_0 et les coordonnées (x, y, z) du foyer de la décharge, la Figure 6.2 montre le schéma de principe.

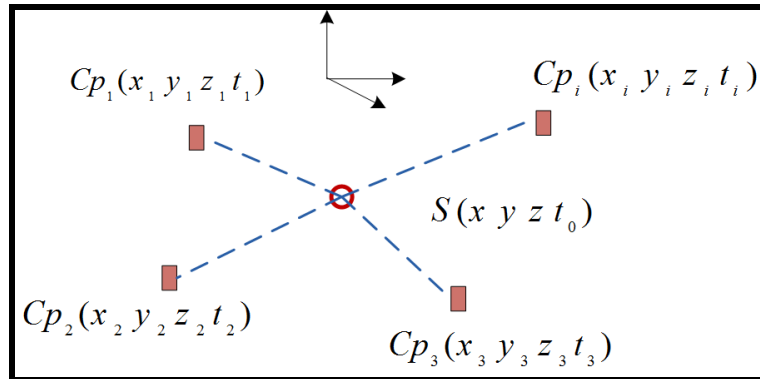


Figure 6.2 Schéma de principe

Soit r_i la distance entre un capteur i et le point source (s) de coordonnées x, y, z correspond au rayon de la sphère i d'équation :

$$r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \quad (6.10)$$

Soit c la vitesse du son dans le fluide considéré. Si on admet un mouvement uniforme, la distance r_i parcourue par l'onde jusqu'au capteur serait donnée par :

$$r_i = c(t_i - t_0) \quad (6.11)$$

t_i : Instant d'arrivée de l'onde au capteur i

t_0 : Instant de départ à partir de la source

Pour éliminer l'inconnue t_0 , nous calculons la différence de distance $d_{i,j}$ par rapport au premier capteur j qui reçoit le signal.

$$d_{i,j} = r_i - r_j = ct_{i,j} \quad (6.12)$$

Avec $t_{i,j}$ est la différence des temps de vol t_i et t_j .

La différence des carrés des distances r_i et la distance r_j donne :

$$r_i^2 - r_j^2 = h_i - h_j + 2x(x_j - x_i) + 2y(y_j - y_i) + 2z(z_j - z_i) \quad (6.13)$$

Avec :

$$d_{i,j} = r_i - r_j = ct_{i,j} \quad (6.14)$$

$$h_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 \quad (6.15)$$

Pour la simplification des écritures, nous notons les différences $x_i - x_j$, $y_i - y_j$ et $z_i - z_j$ par $x_{i,j}$, $y_{i,j}$ et $z_{i,j}$. En combinant les équations (6.12) et (6.13), nous obtenons :

$$x_{i,j}x + y_{i,j}y + z_{i,j}z = \frac{1}{2}(h_i - h_j - d_{i,j}^2) - d_{i,j}r_j \quad (6.16)$$

L'équation (6.16) appliquée dans le cas d'un quadruplet de capteurs j, i, k, f définit un système d'équations linéaires permettant de résoudre les coordonnées x, y, z de la source en fonction de la distance r_j .

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{i,j} & y_{i,j} & z_{i,j} \\ x_{k,j} & y_{k,j} & z_{k,j} \\ x_{f,j} & y_{f,j} & z_{f,j} \end{pmatrix}^{-1} \times \left[\frac{1}{2} \begin{pmatrix} h_i - h_j - d_{i,j}^2 \\ h_k - h_j - d_{k,j}^2 \\ h_f - h_j - d_{f,j}^2 \end{pmatrix} - r_j \begin{pmatrix} d_{i,j} \\ d_{k,j} \\ d_{f,j} \end{pmatrix} \right] \quad (6.17)$$

La substitution de cette solution $(x, y, z)_{r_j}$ dans l'équation (6.10) pour $i = j$ donne une équation quadratique en r_j . La racine positive est réintroduite dans le système (6.17) pour obtenir une solution finale des coordonnées x, y, z de la source.

Dans le cas de n capteurs, le système (6.17) devient surdéterminé, le nombre d'équations est supérieur au nombre des inconnues. Dans de telles situations, une solution itérative au sens des moindres carrés peut être obtenue (ou encore par autre algorithme qui minimise une fonction objective).

6.3 Expérimentation

Des événements de décharges dus à une configuration bulle d'air dans un diélectrique (huile) sont enregistrés par quatre capteurs positionnés comme le montre la Figure 6.3.

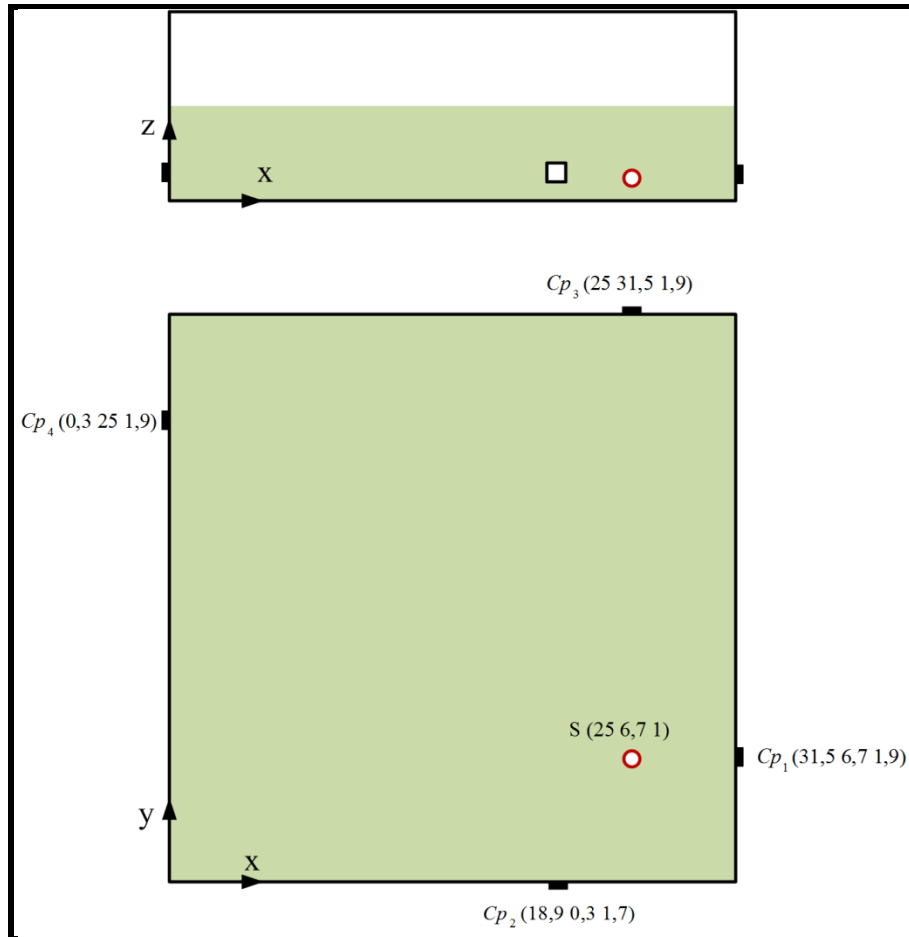


Figure 6.3 Disposition géométrique des capteurs et de la source

Pour couvrir la gamme de fréquence des ondes acoustiques, les paramètres de mesure et de post-traitement suivant sont adoptés :

- Pas de temps par division : $\Delta t = 100\mu s$,
- Fréquence d'échantillonnage : $f_e = 10\text{MHz}$,
- Type d'ondelette : Db8,
- Niveau max de décomposition : 10.

Comme attendu, les signaux bruts enregistrés par les quatre capteurs montrent que ces derniers ont une large bande passante, allant jusqu'au MHz.

Pour étudier le signal dans la gamme des fréquences des émissions acoustiques, une décomposition avec ondelette Db8 jusqu'au 10e niveau permet de restreindre les fréquences du signal à celles incluses dans l'intervalle d'intérêt [20 kHz - 200 kHz]. La Figure 6.4 montre la réponse fréquentielle des quatre capteurs dans cette gamme.

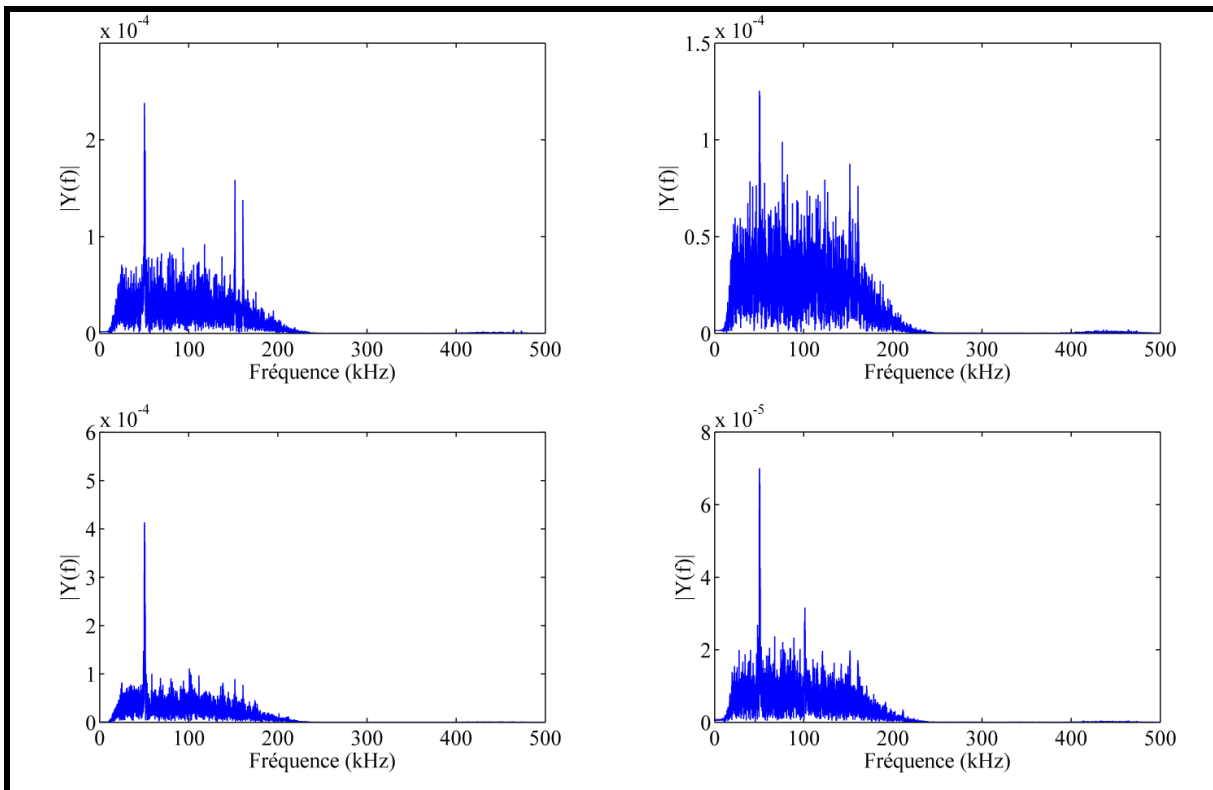


Figure 6.4 Réponse fréquentielle des quatre capteurs dans l'intervalle de [20 kHz 200 kHz]

Les quatre figures dévoilent que l'énergie maximale de la réponse fréquentielle de ces capteurs se situe aux alentours de 50 kHz. Par conséquent, pour l'étude de localisation du foyer de décharge, on s'intéresse uniquement à cette fréquence. Une filtration et une reconstruction du signal à partir du détail 7 de la précédente décomposition par ondelette permettent d'extraire cette zone de fréquence comme le montre la Figure 6.5.

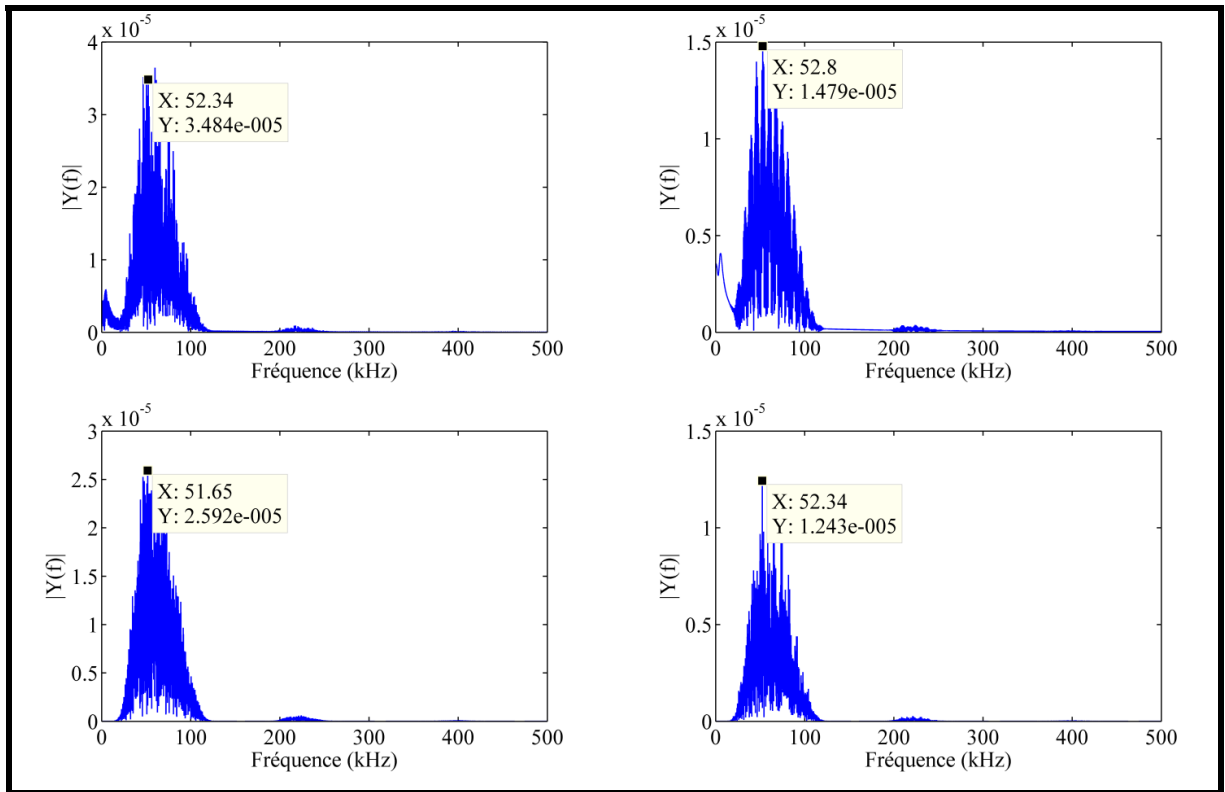


Figure 6.5 Spectre fréquentiel du détail niveau 7

6.3.1 Calcul des coordonnées de la source

Pour valider la méthode de localisation élaborée précédemment, la source de décharge est placée dans une position de coordonnées (x, y, z) préétablie et les différences des temps de vol $t_{i,1}$ par rapport au capteur 1 sont déterminées expérimentalement. Le Tableau 6.1 présente les différentes coordonnées des quatre capteurs utilisés et de la source.

Tableau 6.1 Positions des capteurs et de la source

	Coordonnée X (cm)	Coordonnée Y (cm)	Coordonnée Z (cm)
Capteur 1	31,5	6,7	1,9
Capteur 2	18,9	0,0	1,7
Capteur 3	25,0	31,5	1,9
Capteur 4	0,0	25,0	1,9
Source	25,0	6,7	1,0

Puisque les différentes coordonnées z correspondantes aux capteurs et à la source sont approximativement proches, on peut considérer la situation comme étant un problème à deux dimensions.

6.3.2 Détermination des instants d'arrivées des signaux

La Figure 6.6 montre un exemple de signaux enregistrés simultanément par les quatre capteurs correspondant au détail du niveau 7 et après filtration du bruit de fond. Sur les quatre figures, on constate une impulsion de grande intensité suivie d'une autre de plus faible intensité. La première impulsion arrive presque au même instant aux différents capteurs, on postule que ça correspond à une composante de l'onde électromagnétique. Nous émettons l'hypothèse que la deuxième impulsion est une onde acoustique.

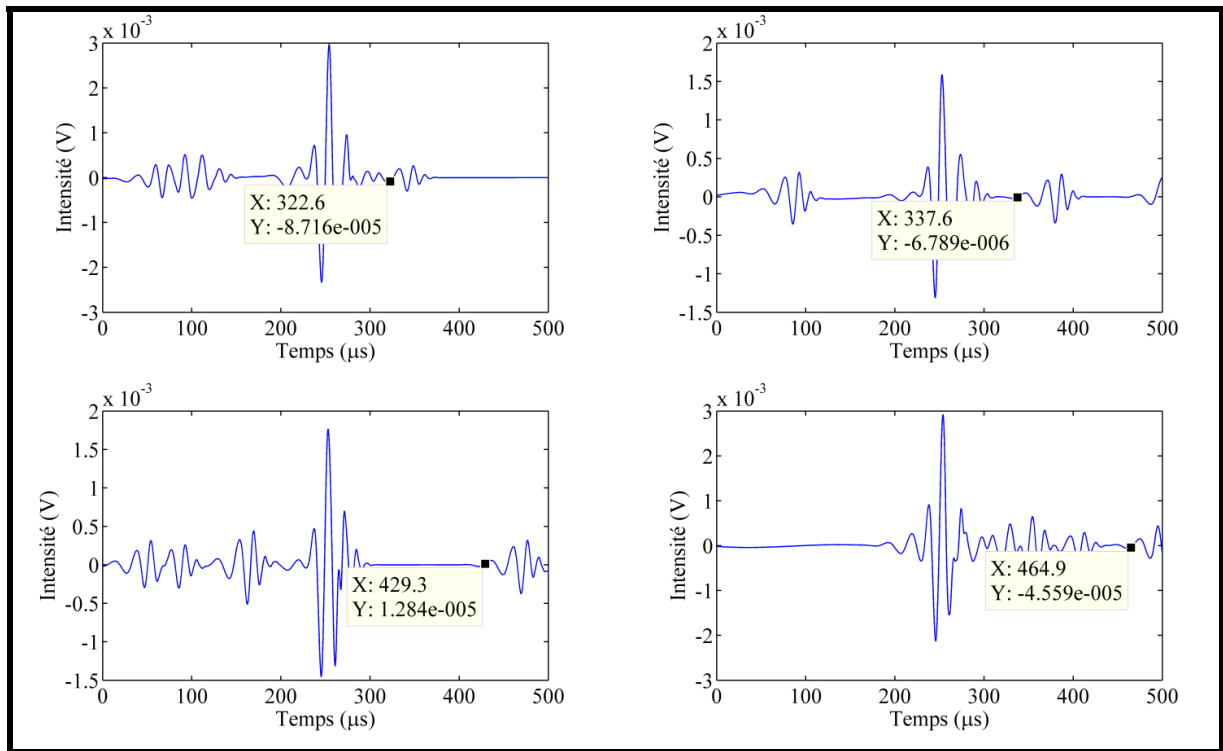


Figure 6.6 Exemple de signaux des quatre capteurs avec les instants d'arrivée

Le Tableau 6.2 résume les différents résultats du test et donne des valeurs approximatives de la vitesse du son.

Tableau 6.2 Mesures des temps $t_{i,1}$ et estimation de la vitesse du son

Capteur	Distance r_i	Temps d'arrivée		$d_{i,1}$ (cm)	Vitesse estimée (ms ⁻¹)
	(cm)	t_i (μs)	$t_{i,1}$ (μs)		
1	6,6	322,6			
2	9,0	337,6	15,0	2,4	~1600
3	24,8	429,3	106,7	18,2	~1706
4	30,8	464,9	142,3	24,2	~1701

Le Tableau 6.3 présente les résultats du calcul de la position du foyer de la décharge par l'algorithme déterminé précédemment. La valeur de la vitesse du son utilisée comme référence est $c = 1500 \text{ ms}^{-1}$. La position de la source est déterminée approximativement avec une erreur de 2 cm.

Tableau 6.3 Résultats du calcul de la position de la source

	Coordonnée X (cm)	Coordonnée Y (cm)	$\Delta r = \sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2)}$ (cm)
Position réelle de la source	25,0	6,7	
Calcul 1	24,3	8,1	1,5
Calcul 2	24,1	8,6	1,6
Calcul 3	23,7	7,7	2,3
Calcul 4	23,4	8,4	1,8
Position moyenne calculée	23,87	8,2	1,9

6.4 Conclusion

En plus du potentiel de détection des DP que nous avons démontré dans le chapitre 5, vient s'ajouter une possibilité intrinsèque à cette nouvelle technologie qui est le pouvoir d'estimer la localisation de la source de décharge par l'acquisition du signal acoustique. Ce chapitre a présenté les premiers résultats expérimentaux sur la localisation, et nous pouvons les qualifier de prometteurs.

Également, les essais ont confirmé que ce type de capteur est aussi capable de détecter les signaux électromagnétiques émis par les DP et que, par conséquent, peuvent servir dans la localisation des foyers des DP (nous référons le lecteur à l'Annexe III).

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

La détection des décharges partielles dans les équipements électriques de haute tension est devenue un outil fiable pour les industriels dans leurs programmes de maintenance prédictive et un domaine d'innovation très attractif pour les chercheurs qui désirent développer des outils de diagnostic et de surveillance afin d'avoir des réponses sur la fiabilité et la disponibilité des systèmes d'isolation.

C'est dans cette mouvance que vient s'ajouter notre modeste contribution qui consiste à '*apprivoiser*' une nouvelle technologie de capteur piézoélectrique et à développer son application à la problématique des décharges partielles.

A priori, cette nouvelle génération de capteurs offre des caractéristiques attrayantes :

- Large bande de réponses fréquentielles (jusqu'à 20 MHz),
- Miniature et flexible (pouvant se coller à des surfaces de formes complexes),
- Température opératoire atteignant les 400 °C,
- Une constante diélectrique élevée ($\epsilon_r \approx 90$),
- Coût de revient très économique.

Dans cette thèse, nous avons montré que cette nouvelle technologie de capteur piézoélectrique BIT/PZTHTUT présente un potentiel intéressant pour être appliqué à la mesure des décharges partielles.

L'analyse statistique des performances métrologiques a démontré que les mesures issues de notre système de mesure et qui est basé sur cette technologie sont maîtrisées et stables. Le niveau d'erreur du biais et de fidélité sont respectivement de l'ordre de 0,3 mV et de ± 1 mV (95%). Ces valeurs sont conformes avec la norme reconnue sur la mesure des DP et qui tolère jusqu'à $\pm 10\%$ de la plus grande valeur mesurée.

Les tests expérimentaux de décharges avec des configurations pointe-plan dans l'air et dans l'huile ont démontré que les signatures de décharges obtenues sont comparables à ceux de la méthode conventionnelle d'Omicron® avec un coupleur capacitif de 1 nF. Cette dernière méthode est largement reconnue dans l'industrie. Une bonne corrélation entre les deux systèmes de mesure a été approuvée. Les résultats de cette partie ont fait l'objet d'un article scientifique qui a été soumis au Journal «*Measurements*» d'Elsevier.

En plus du potentiel de détection des DP, des mesures dans la gamme des fréquences des émissions acoustique ont dévoilé des résultats intéressants quant à la localisation des foyers de décharges.

Du côté post-traitement des signaux bruts, un ensemble d'algorithmes ont été développés dans cette thèse pour l'acquisition, le traitement et l'affichage des signaux à travers des diagrammes standards tels que les diagrammes de résolution dans la phase, les diagrammes d'analyse d'amplitude et les diagrammes temporels. Pour la localisation du foyer de décharge, un algorithme a été aussi présenté et validé.

Outre leurs caractéristiques inhérentes citées ci-dessus, ces capteurs offrent une excellente alternative économique pour être employés dans la détection des décharges partielles *in situ* et en temps réel. En installant plusieurs capteurs, ces derniers permettent d'envisager la localisation des sources de décharges et d'améliorer la robustesse métrologique de la méthode, ce qui est d'une très grande importance pour les applications industrielles. Nous considérons que la maîtrise des différents aspects de cette technologie aura sans doute un important impact bénéfique et innovateur sur les outils d'assistance en maintenance préventive des installations électriques.

Les contraintes temporelles nous ont obligés à mettre fin à notre recherche afin de soutenir une thèse. Toutefois, une recherche sera-t-elle terminée ? Nous croyons que non. Pour de futures recherches, nous recommandons les suivantes pistes que nous pensons intéressantes :

- Vu la conception et la morphologie de ces capteurs, qui peuvent être considérés comme des antennes résonnantes capables de recevoir les signaux électromagnétiques émis par les sources de DP, il sera intéressant d'investiguer ce potentiel, surtout pour la localisation des lieux de décharges. En lien avec ce point, nous recommandons l'augmentation des dimensions du banc d'essai et l'utilisation de boîtier métallique au lieu du PMMA pour mieux simuler un transformateur et avoir des résultats encore plus significatifs.
- Toutes les méthodes de localisation des foyers de décharges se basent sur le calcul des temps de vol des ondes acoustiques ou électromagnétiques, nous postulons que la mesure de l'énergie acoustique peut faire l'objet d'un autre moyen pour la localisation des charges en utilisant la propriété d'inversement proportionnalité de cette énergie par rapport à la distance. Nous suggérons pour réussir cette étude que les capteurs utilisés soient parfaitement identiques sinon bien calibrés.
- Dans le domaine du filtrage des signaux, les outils basés sur les ondelettes ont attiré l'attention de plusieurs chercheurs. Dans cet axe, nous recommandons le développement d'une nouvelle ondelette mère qui pourra représenter une impulsion de décharge d'une manière plus précise que les ondelettes déjà existantes. Cela améliorera l'efficacité des algorithmes de post-traitement et de localisation.

ANNEXE I

MESURES DE CALIBRATION

Tableau-A I-1 Échantillons des mesures de calibration

Charge (pC)	Impulsion1 (mV)	Impulsion2 (mV)	Impulsion3 (mV)	Impulsion4 (mV)	Impulsion5 (mV)	Mpic_max (mV)
-50	-0,018	-0,0176	-0,0176	-0,0172	-0,0164	-0,01736
	-0,0184	-0,018	-0,0168	-0,0168	-0,016	-0,0172
	-0,0196	-0,0188	-0,018	-0,0168	-0,0144	-0,01752
	-0,0176	-0,0172	-0,0168	-0,0168	-0,0156	-0,0168
	-0,0188	-0,0168	-0,0164	-0,016	-0,016	-0,0168
	-0,0192	-0,0192	-0,0188	-0,0188	-0,0176	-0,01872
	-0,0184	-0,0176	-0,0176	-0,0176	-0,0168	-0,0176
	-0,0184	-0,018	-0,0172	-0,0172	-0,0156	-0,01728
	-0,0184	-0,0176	-0,0168	-0,0164	-0,0164	-0,01712
	-0,0196	-0,0196	-0,0188	-0,0164	-0,0164	-0,01816
	-0,0188	-0,0168	-0,0164	-0,016	-0,0156	-0,01672
	-0,0184	-0,0172	-0,0164	-0,0156	-0,0156	-0,01664
	-0,0176	-0,0172	-0,0172	-0,0164	-0,0164	-0,01696
	-0,0196	-0,0184	-0,0184	-0,018	-0,0172	-0,01832
	-0,0188	-0,0184	-0,0176	-0,0172	-0,0164	-0,01768
	-0,0192	-0,0184	-0,0176	-0,0176	-0,016	-0,01776
	-0,0196	-0,018	-0,0172	-0,0168	-0,0164	-0,0176
	-0,0188	-0,018	-0,0176	-0,0172	-0,0164	-0,0176
	-0,018	-0,018	-0,0176	-0,0176	-0,0156	-0,01736
	-0,018	-0,0176	-0,0176	-0,016	-0,0166	-0,01716
Charge (pC)	Impulsion1 (mV)	Impulsion2 (mV)	Impulsion3 (mV)	Impulsion4 (mV)	Impulsion5 (mV)	Mpic_max (mV)
-20	0,0084	0,0076	0,0068	0,0068	0,006	0,00712
	0,0072	0,0064	0,006	0,0056	0,0056	0,00616
	0,0088	0,0072	0,0072	0,0068	0,0064	0,00728
	0,008	0,0072	0,0068	0,0064	0,0056	0,0068
	0,0084	0,008	0,0076	0,006	0,0052	0,00704
	0,0072	0,0068	0,0068	0,0064	0,0052	0,00648
	0,006	0,0056	0,0056	0,0052	0,0052	0,00552
	0,0076	0,0064	0,0064	0,006	0,0044	0,00616
	0,0076	0,0072	0,0064	0,006	0,0052	0,00648

	0,0072	0,0064	0,006	0,0056	0,0048	0,006
	0,0076	0,0068	0,0068	0,0064	0,0048	0,00648
	0,0084	0,0072	0,0064	0,0064	0,006	0,00688
	0,0072	0,0056	0,0056	0,0056	0,0048	0,00576
	0,0084	0,0072	0,0064	0,0056	0,0044	0,0064
	0,0076	0,0068	0,0068	0,0064	0,006	0,00672
	0,0092	0,0072	0,0064	0,006	0,0056	0,00688
	0,0072	0,0064	0,0056	0,0052	0,0048	0,00584
	0,008	0,0076	0,0068	0,0064	0,006	0,00696
	0,0076	0,0064	0,006	0,0052	0,0052	0,00608
	0,0084	0,0072	0,0056	0,0052	0,0052	0,00632

Charge (pC)	Impulsion1 (mV)	Impulsion2 (mV)	Impulsion3 (mV)	Impulsion4 (mV)	Impulsion5 (mV)	Mpic_max (mV)
20	0,0084	0,0076	0,0068	0,0068	0,006	0,00712
	0,0072	0,0064	0,006	0,0056	0,0056	0,00616
	0,0088	0,0072	0,0072	0,0068	0,0064	0,00728
	0,008	0,0072	0,0068	0,0064	0,0056	0,0068
	0,0084	0,008	0,0076	0,006	0,0052	0,00704
	0,0072	0,0068	0,0068	0,0064	0,0052	0,00648
	0,006	0,0056	0,0056	0,0052	0,0052	0,00552
	0,0076	0,0064	0,0064	0,006	0,0044	0,00616
	0,0076	0,0072	0,0064	0,006	0,0052	0,00648
	0,0072	0,0064	0,006	0,0056	0,0048	0,006
	0,0076	0,0068	0,0068	0,0064	0,0048	0,00648
	0,0084	0,0072	0,0064	0,0064	0,006	0,00688
	0,0072	0,0056	0,0056	0,0056	0,0048	0,00576
	0,0084	0,0072	0,0064	0,0056	0,0044	0,0064
	0,0076	0,0068	0,0068	0,0064	0,006	0,00672
	0,0092	0,0072	0,0064	0,006	0,0056	0,00688
	0,0072	0,0064	0,0056	0,0052	0,0048	0,00584
	0,008	0,0076	0,0068	0,0064	0,006	0,00696
	0,0076	0,0064	0,006	0,0052	0,0052	0,00608
	0,0084	0,0072	0,0056	0,0052	0,0052	0,00632

Charge (pC)	Impulsion1 (mV)	Impulsion2 (mV)	Impulsion3 (mV)	Impulsion4 (mV)	Impulsion5 (mV)	Mpic_max (mV)
50	0,0192	0,0176	0,0172	0,0168	0,0168	0,01752
	0,0212	0,0184	0,0184	0,0176	0,016	0,01832
	0,0196	0,0188	0,0168	0,0164	0,0164	0,0176
	0,0192	0,0184	0,018	0,018	0,0156	0,01784

	0,018	0,0168	0,0168	0,0168	0,0164	0,01696
	0,0184	0,0172	0,0168	0,0168	0,016	0,01704
	0,0212	0,018	0,0172	0,0164	0,016	0,01776
	0,018	0,0176	0,0176	0,0172	0,0152	0,01712
	0,0204	0,0176	0,0176	0,0156	0,0152	0,01728
	0,0188	0,018	0,0176	0,0176	0,0176	0,01792
	0,0196	0,0192	0,018	0,0172	0,016	0,018
	0,0184	0,0176	0,0172	0,0156	0,0148	0,01672
	0,0204	0,0188	0,018	0,0168	0,0164	0,01808
	0,0184	0,0172	0,0168	0,0168	0,0164	0,01712
	0,0184	0,018	0,0156	0,0156	0,0148	0,01648
	0,0196	0,0192	0,0188	0,0176	0,0172	0,01848
	0,018	0,0172	0,0168	0,0152	0,0148	0,0164
	0,018	0,0176	0,0176	0,0164	0,0156	0,01704
	0,0176	0,0172	0,0164	0,0164	0,0156	0,01664
	0,0184	0,018	0,018	0,0176	0,0172	0,01784

ANNEXE II

LOCALISATION DE LA SOURCE DES DÉCHARGES PARTIELLES PAR LE MOYEN DU CALCUL DE L'ÉNERGIE ACOUSTIQUE

Pour identifier la localisation spatiale de la source dans l'espace tridimensionnel, un minimum de 4 capteurs est nécessaire pour identifier les coordonnées x, y, z de la source ainsi que le temps de la décharge.

Considérons qu'en chaque point de coordonnée x_i, y_i, z_i un capteur i mesurant l'intensité E_i de l'énergie du signal acoustique est installé. La distance r_i entre le capteur i et le point source de coordonnées x, y, z correspond au rayon de la sphère qui a pour équation :

$$r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 \quad (6.18)$$

Écrivons maintenant les distances euclidiennes des points j à chacun des 4 capteurs ($i = 1, \dots, 4$).

$$\begin{aligned} r_2^2 - r_1^2 &= 2x(x_1 - x_2) + (x_2^2 - x_1^2) + 2y(y_1 - y_2) + (y_2^2 - y_1^2) + 2z(z_1 - z_2) + (z_2^2 - z_1^2) \\ r_3^2 - r_1^2 &= 2x(x_1 - x_3) + (x_3^2 - x_1^2) + 2y(y_1 - y_3) + (y_3^2 - y_1^2) + 2z(z_1 - z_3) + (z_3^2 - z_1^2) \\ r_4^2 - r_1^2 &= 2x(x_1 - x_4) + (x_4^2 - x_1^2) + 2y(y_1 - y_4) + (y_4^2 - y_1^2) + 2z(z_1 - z_4) + (z_4^2 - z_1^2) \end{aligned} \quad (6.19)$$

Sous forme matricielle ce système devient :

$$\begin{pmatrix} r_2^2 - r_1^2 \\ r_3^2 - r_1^2 \\ r_4^2 - r_1^2 \end{pmatrix} = 2 * \begin{bmatrix} x_{12} & y_{12} & z_{12} \\ x_{13} & y_{13} & z_{13} \\ x_{14} & y_{14} & z_{14} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_2^2 - d_1^2 \\ d_3^2 - d_1^2 \\ d_4^2 - d_1^2 \end{pmatrix} \quad (6.20)$$

Avec :

$$x_{ij} = x_i - x_j \quad (6.21)$$

Et

$$d_i^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 \quad (6.22)$$

Les lois de la physique nous indiquent que la chute de l'énergie E_i est inversement proportionnelle au carré de la distance, alors on peut écrire, si E_0 est la valeur mesurée à la source :

$$E_i = E_0 - \Delta E_i = E_0 - \alpha r_i^2 \quad (6.23)$$

Où α est un coefficient de proportionnalité.

En écrivant $E_j - U_i$ et en résolvant pour $r_j^2 - r_i^2$ on obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{pmatrix} r_2^2 - r_1^2 \\ r_3^2 - r_1^2 \\ r_4^2 - r_1^2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\alpha} \cdot \begin{pmatrix} E_1 - E_2 \\ E_1 - E_3 \\ E_1 - E_4 \end{pmatrix} \quad (6.24)$$

En remplaçant $r_j^2 - r_i^2$ par son équivalent dans le système d'équations précédent, la position de la source de la décharge peut être ainsi calculée.

Nous signalons au lecteur que cette formulation est adaptée à un ensemble de 4 capteurs. La solution dans ce cas est déterministe et unique. Si nous possédons plus que 4 capteurs, une solution peut être identifiée par la minimisation d'une fonction objective. À titre d'exemple, nous pouvons utiliser la méthode des moindres carrées (où on minimisera l'erreur quadratique entre les mesures et la prédiction) ou encore par la méthode de vraisemblance.

ANNEXE III

EXEMPLE DE MESURE DE DP DANS LA GAMME DES UHF

Les figures de cette annexe illustrent des signaux de DP produits à partir d'une configuration bulle d'air dans un diélectrique (huile). Les signaux sont enregistrés par les capteurs piézoélectriques dans la gamme des UHF. Les paramètres de mesure et de post-traitement suivant sont appliqués :

- Pas de temps par division : $\Delta t = 200 \text{ ps}$
- Fréquence d'échantillonnage : $f_e = 5 \text{ G ech.s}^{-1}$
- Type d'ondelette : Db4
- Niveau max de décomposition : 12

Les Figure-A III-1 et la Figure-A III-2 représentent le signal d'une impulsion de DP avant et après post-traitement de filtrage. Cette impulsion a la forme d'une onde amortie qui persiste moins de $2 \mu\text{s}$ et qui a un temps de montée de quelques nanosecondes.

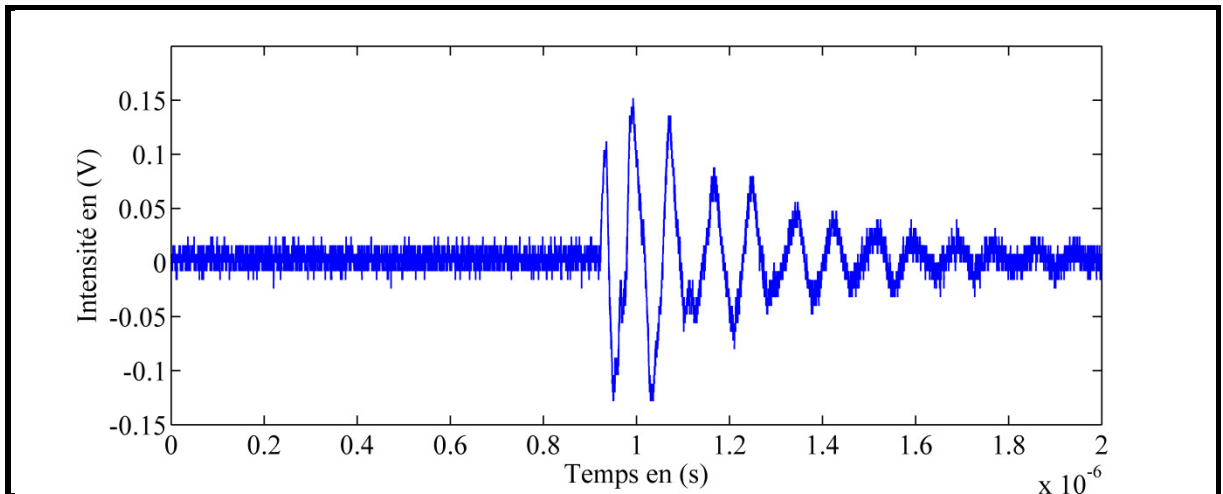


Figure-A III-1 Signal brut d'une impulsion de DP

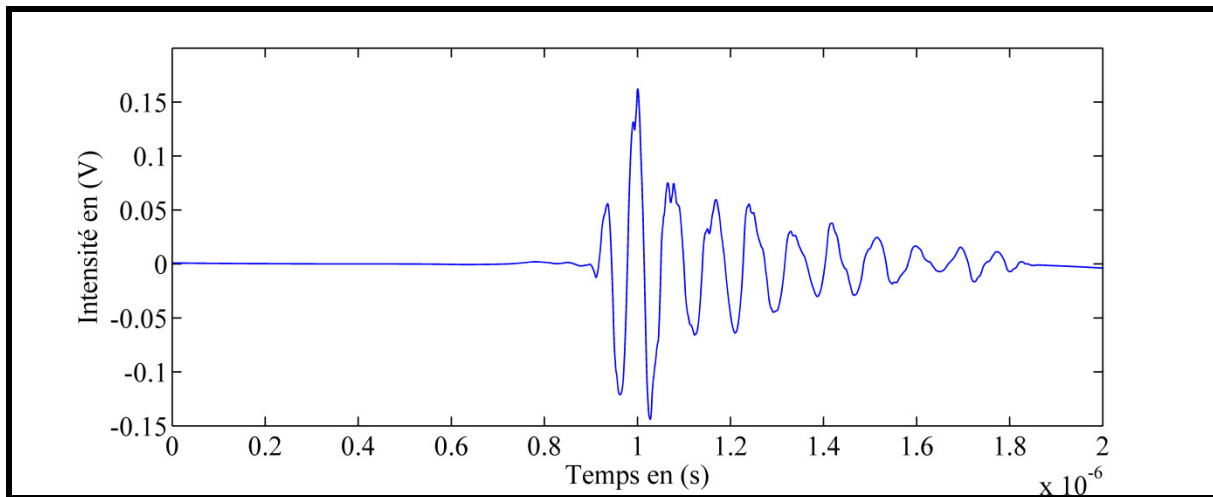


Figure-A III-2 Signal filtré d'une impulsion de DP

La Figure-A III-4 représente des signaux de DP enregistrés simultanément par quatre capteurs piézoélectriques selon la disposition de la Figure-A III-3. À première vue, nous constatons que les quatre signaux surviennent presque au même instant. Un agrandissement autour de la zone de début des signaux montre qu'il existe effectivement un déphasage difficilement décelable (*voir* Figure-A III-5). Ceci est essentiellement dû au fait que les dimensions de notre banc d'essai sont assez petites.

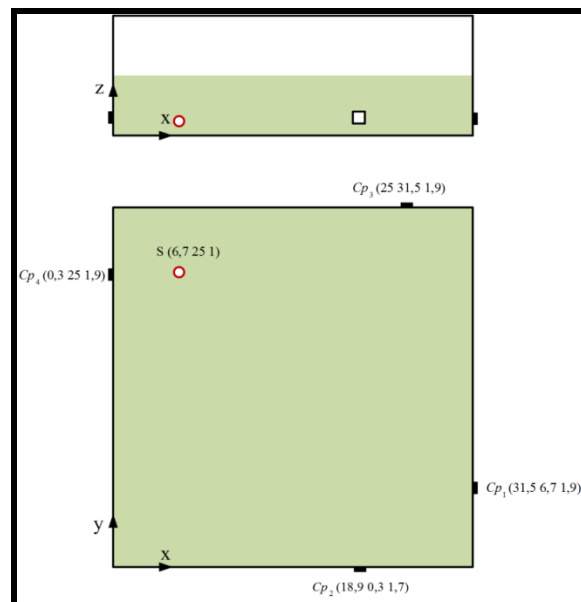


Figure-A III-3 Disposition géométrique des capteurs et de la source

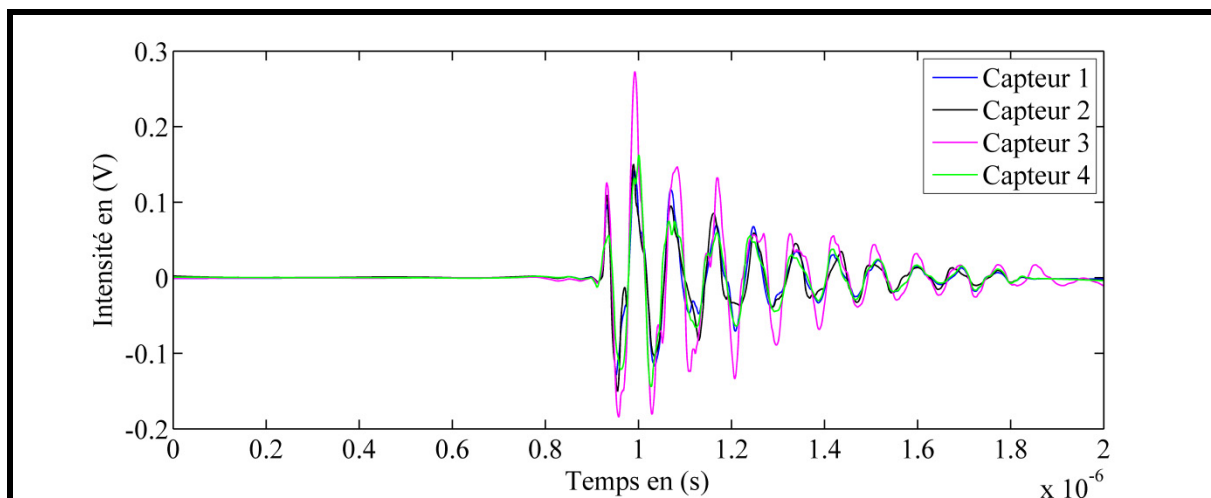


Figure-A III-4 Signaux de DP enregistrés simultanément par quatre capteurs

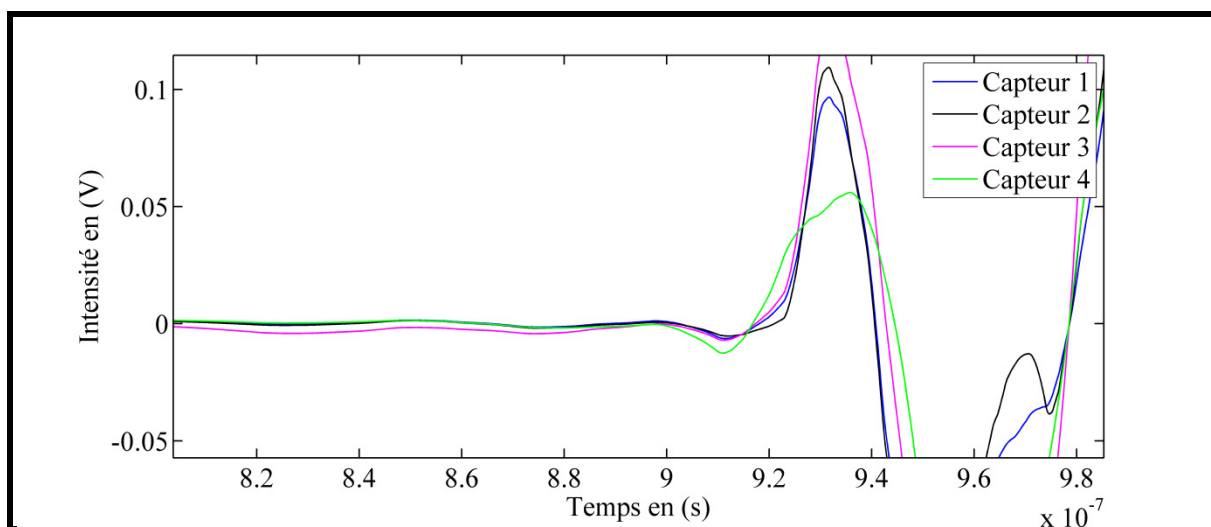


Figure-A III-5 Agrandissement autour de la zone de début des quatre signaux

BIBLIOGRAPHIE

ABB. (Varennnes, QC).

Abry, P. 1997. *Ondelettes et turbulences: multirésolutions, algorithmes de décomposition, invariance d'échelle et signaux de pression*. Diderot éd.

Veillez sélectionner un type de document autre que « Generic » afin de faire afficher la référence bibliographique.

Alireza, Akbari, Akbari Asghar, A. Setayeshmehr, H. Borsi et E. Gockenbach. 2004. « Software Modules for Monitoring and Diagnosis of Power Transformers ». In *19th International Power System Conference*. (Tahran, Iran).

Allen, N. L., M. Abdel-Salam et I. Cotton. 2007. « Effects of temperature and pressure change on positive corona and sparkover under direct voltage in short airgaps ». *Science, Measurement & Technology, IET*, vol. 1, n° 4, p. 210-215.

Bartnikas, R. 2002. « Partial discharges their mechanism detection and measurement ». *Dielectrics and Electrical Insulation IEEE Transactions on*, vol. 9, n° 5, p. 763-808.

Bartnikas, R. 2005. « A comment concerning the rise times of partial discharge pulses ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 12, n° 2, p. 196-202.

Bartnikas, R., et John H. E. Levi. 1969. « A Simple Pulse-Height Analyzer for Partial-Discharge-Rate Measurements ». *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 18, n° 4, p. 341-345.

Bartnikas, R., et J. McMahon. 1979. *Corona Measurement and Interpretation*, 1. Coll. « Engineering Dielectrics », volume 1. Baltimore: American society for testing and materials.

Bartnikas, R., et K. Srivastava. 2003. « DISSIPATION FACTOR, PARTIAL-DISCHARGE, AND ELECTRICAL AGING TESTS ON POWER CABLES ». In *Power and communication: Theory and Applications*. p. 331-426. Wiley-IEEE Press.

Baumann, T., B. Fruth, F. Stucki et H. R. Zeller. 1989. « Field-enhancing defects in polymeric insulators causing dielectric aging ». *IEEE transactions on electrical insulation*, vol. 24, n° 6, p. 1071-6.

Blackburn, T. R., Z. Liu, R. Morrow et B. T. Phung. 2000. « Partial discharges development in a void and its effect on the material surface ». In *Properties and Applications of Dielectric Materials, 2000. Proceedings of the 6th International Conference on*. (2000) Vol. 1, p. 280-285 vol.1.

- Blaise, G. 1993. « The space charge physics and the breakdown process ». In *Proceedings of IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. (New York, NY, USA), p. 98-103. Coll. « IEEE 1993 Annual Report. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No.93CH3269-8) »: IEEE. <<http://dx.doi.org/10.1109/CEIDP.1993.378990>>.
- Boczar, T., S. Borucki, A. Cichon et D. Zmarzy. 2009. « Application possibilities of artificial neural networks for recognizing partial discharges measured by the acoustic emission method ». *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16, n° 1, p. 214-223.
- Boggs, S. A. 1990a. « Partial discharge. III. Cavity-induced PD in solid dielectrics ». *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 6, n° 6, p. 11-16.
- Boggs, S. A. 1990b. « Partial discharge: overview and signal generation ». *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 6, n° 4, p. 33-9.
- Boggs, S. A., et G. C. Stone. 1982. « Fundamental Limitations in the Measurement of Corona and Partial Discharge ». *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. EI-17, n° 2, p. 143-150.
- Busch, R., F. Pohlmann et K. Muller. 2001. « The influence of several environmental conditions on the partial discharge characteristics and on the lifetime of magnet wires under inverter pulse operation ». In *Proc. of 2001 Int. Symp. on Electrical Insulating Materials*. (2001), p. 645-648.
- Chen, Li-Jung, Ta-Peng Tsao et Yu-Hsun Lin. 2005. « New diagnosis approach to epoxy resin transformer partial discharge using acoustic technology ». *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, n° 4, p. 2501-2508.
- Chien-Yi, Chen, Su Ching-Chau, Wang Jia-Bin, Tai Cheng-Chi, Chen Jiann-Fuh et Yen Shih-Shong. 2011. « An operating procedure for the detection, identification, and location of partial discharge in cast-resin dry-type transformers ». In *Lightning (APL), 2011 7th Asia-Pacific International Conference on*. (1-4 Nov. 2011), p. 581-585.
- Dakin, T. W., et P. J. Malinaric. 1960. « A Capacitance Bridge Method for Measuring Integrated Corona-Charge Transfer and Power Loss per Cycle ». *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 79, n° 3, p. 648-652.
- Daubechies, I. 1990. « The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis ». *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 36, n° 5, p. 961-1005.
- David, E. 2009. « Propriétés diélectriques statiques ». In *Cours Sys862*.

- De Silva, C. W. 2007a. *Vibration damping control and design*. Vancouver, Canada: CRC Press.
- De Silva, C.W. 2007b. *Vibration Damping, Control, and Design*. Taylor & Francis.
- Denat, A. 2005. « High field conduction and prebreakdown phenomena in dielectric liquids ». *Dielectric Liquids, 2005. ICDL 2005. 2005 IEEE International Conference on*. 26 June-1 July 2005, p. 57-62.
- Duval, M. 1989. « Dissolved gas analysis: It can save your transformer ». *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 5, n° 6, p. 22-27.
- Felizardo, M., R. C. Martins, T. A. Girard, A. R. Ramos et J. G. Marques. 2009. « Acoustic spatial localization of events in superheated droplet detectors ». *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A (Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment)*, vol. 599, n° 1, p. 93-9.
- Fenger, M., et G. C. Stone. 2005. « Investigations into the effect of humidity on stator winding partial discharges ». *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, n° Compendex, p. 341-346.
- Findlay, D. A., R. G. Brearley et C. C. Louttit. 1959. « Evaluation of the Internal Insulation of Generator Coils Based on Power-Factor Measurements ». *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 78, n° 3, p. 268-274.
- Fugal, D. L. 2009. *Conceptual wavelets in digital signal processing: an in-depth, practical approach for the non-mathematician*. Space & Signals Technical Pub.
- Gardiol, F. 2002. *Électromagnétisme*. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Gorur, G. Raju. 2003a. « Fundamental Aspects of Gaseous Breakdown ». In *(Dielectrics in Electric Fields)*, sous la dir. de Dekker, Marcel. New York CRC Press. <<http://dx.doi.org/10.1201/9780203912270.ch8>>. Consulté le 2011/02/24.
- Gorur, G. Raju. 2003b. « Polarization and Static Dielectric Constant ». In *Dielectrics in Electric Fields*. CRC Press. <<http://dx.doi.org/10.1201/9780203912270.ch2>>. Consulté le 2012/05/29.
- Haddad, A., et D.F. Warne. 2004. *Advances in high voltage engineering*, 40. London, UK: Institution of engineering and technology.

- Hampton, B. F., et R. J. Meats. 1988. « Diagnostic measurements at UHF in gas insulated substations ». *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, vol. 135, n° 2, p. 137-145.
- Hibma, T., et H. R. Zeller. 1986. « Direct measurement of space-charge injection from a needle electrode into dielectrics ». *Journal of Applied Physics*, vol. 59, n° 5, p. 1614-20.
- Hong-Tzer, Yang, et Liao Chiung-Chou. 1999. « Adaptive fuzzy diagnosis system for dissolved gas analysis of power transformers ». *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, n° 4, p. 1342-50.
- <http://solvinginc.com/transformers.htm>.
- IEC. 2000. *International standard High-voltage test techniques - partial discharge measurements*. IEC 60270, 99 p.
- Isaac, Hernandez-Fajardo, Evangelatos Georgios, Kougioumtzoglou Ioannis et Ming Xin. 2008. Connexions Project. <<http://cnx.org/content/m18931/latest/>>.
- Ishak, A. M., M. D. Judd et W. H. Siew. 2010. « A study of UHF partial discharge signal propagation in power transformers using FDTD modelling ». In *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International*. (Aug. 31 2010-Sept. 3 2010), p. 1-5.
- Jean-Noël, Baléo. 2003. « La validation des modèles ». In *Méthodologie expérimentale*. p. 342-361. Collectif Tec et Doc - Lavoisier.
- Jongen, R. A., P. Morshuis, S. Meijer et J. J. Smit. 2005a. In *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (IEEE Cat. No. 05CH37702), Identification of partial discharge defects in transformer oil*. (Piscataway, NJ, USA), p. 565-8. Coll. « 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (IEEE Cat. No. 05CH37702) »: IEEE.
- Jongen, R. A., P. Morshuis, S. Meijer et J. J. Smit. 2005b. « Identification of partial discharge defects in transformer oil ». In *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005. CEIDP '05. 2005 Annual Report Conference on*. (16-19 Oct. 2005), p. 565-568.
- Judd, M. D., G. P. Cleary et C. J. Bennoch. 2002. « Applying UHF partial discharge detection to power transformers ». *IEEE Power Engineering Review*, vol. 22, n° Copyright 2002, IEE, p. 57-9.

- Judd, M. D., O. Farish et B. F. Hampton. 1995. « Broadband couplers for UHF detection of partial discharge in gas-insulated substations ». *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings -*, vol. 142, n° 3, p. 237-243.
- Judd, M. D., O. Farish et B. F. Hampton. 1996. « The excitation of UHF signals by partial discharges in GIS ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 3, n° 2, p. 213-228.
- Judd, M. D., O. Farish, J. S. Pearson et B. F. Hampton. 2001. « Dielectric windows for UHF partial discharge detection ». *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 8, n° Compendex, p. 953-958.
- Judd, M. D., Yang Li et I. B. B. Hunter. 2005. « Partial discharge monitoring for power transformer using UHF sensors. Part 2: field experience ». *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 21, n° 3, p. 5-13.
- Kemp, I. J. 1995. « Partial discharge plant-monitoring technology: Present and future developments ». *IEE Proceedings: Science, Measurement and Technology*, vol. 142, n° 1, p. 4-10.
- Kemp, I. J. 1996. « Partial discharges in solid insulation ». In *HV Technology (Digest No. 1996/173), IEE Colloquium on Advances in*. (4 Oct 1996), p. 5/1-5/8.
- Kil, Gyung-Suk, Il-Kwon Kim, Dae-Won Park, Su-Yeon Choi et Chan-Yong Park. 2009. « Measurements and analysis of the acoustic signals produced by partial discharges in insulation oil ». *Current Applied Physics*, vol. 9, n° 2, p. 296-300.
- Kobayashi, M., et C. K. Jen. 2004. « Piezoelectric thick bismuth titanate/lead zirconate titanate composite film transducers for smart NDE of metals ». *Smart Materials and Structures*, vol. 13, n° Compendex, p. 951-956.
- Kobayashi, M., C. K. Jen, Y. Ono et J. F. Moisan. 2005. « Integratable high temperature ultrasonic transducers for NDT of metals and industrial process monitoring ». *CINDE Journal*, vol. 26, n° Copyright 2005, IEE, p. 5-10.
- Kreuger, F. H., E. Gulski et A. Krivda. 1993. « Classification of partial discharges ». *IEEE transactions on electrical insulation*, vol. 28, n° 6, p. 917-931.
- Kuffel, E., W.S. Zaengl et J. Kuffel. 2000. *High Voltage Engineering*, Second edition. New York: Butterworth-Heinemann.
- Kundu, Prasanta, N. K. Kishore et A. K. Sinha. 2008. « Behavior of acoustic partial discharge signal in oil-pressboard insulation system ». In. (Kharagpur, India). Coll. « IEEE Region 10 Colloquium and 3rd International Conference on Industrial and

- Information Systems, ICIIS 2008 »: Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society.
<<http://dx.doi.org/10.1109/ICIINFS.2008.4798353>>.
- Kuo, Cheng-Chien. 2009. « Artificial recognition system for defective types of transformers by acoustic emission ». *Expert Systems with Applications*, vol. 36, n° 7, p. 10304-10311.
- Kuppuswamy, Raja, et Patrick Coquelin. 2005. « Power transformer asset management on-line partial discharge measurement - A new approach ». In. (Nashville, TN, United states) Vol. 2005, p. 445-448. Coll. « Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP »: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <<http://dx.doi.org/10.1109/CEIDP.2005.1560716>>.
- Kurtz, M., D. Freeman, G. C. Stone, V. R. Mulhall et P. Lonseth. 1980. « DIAGNOSTIC TESTING OF GENERATOR INSULATION WITHOUT SERVICE INTERRUPTION ». In *International Conference on Large High Voltage Electric Systems (CIGRE), Proceedings of the 28th Session*. (Paris, Fr) Vol. 1, p. 11. 09. 1-11. 09. 8. Coll. « International Conference on Large High Voltage Electric Systems »: CIGRE.
- Kurtz, M., et G. C. Stone. 1979. « In-Service Partial Discharge Testing of Generator Insulation ». *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. EI-14, n° 2, p. 94-100.
- Kweon, Dong-Jin, Sang-Bum Chin, Hee-Ro Kwak, Jae-Chul Kim et Kyung-Bin Song. 2005. « The analysis of ultrasonic signals by partial discharge and noise from the transformer ». *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, n° 3, p. 1976-1983.
- Li, Min, Hong Zhao et Jian Zhang. 2007. « Fiber fabry-perot sensors based acoustic detection of partial discharges in power transformers ». In *Proceedings of the IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. (Bali, Indonesia), p. 254-257. Coll. « Proceedings of the IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials »: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <<http://dx.doi.org/10.1109/ICPADM.2006.284165>>.
- Luo, Hongxia, et Xuefeng Zhang. 2011. « A Method of Second Wavelet Transform Automated Threshold for Partial Discharge Signal Extraction ». In *Digital Manufacturing and Automation (ICDMA), 2011 Second International Conference on*. (5-7 Aug. 2011), p. 42-45.
- Mackenzie, E. A., J. Crossey, A. De Pablo et W. Ferguson. 2010. « On-line monitoring and diagnostics for power transformers ». In *Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on*. (6-9 June 2010), p. 1-5.

- Mallat, S. G. 1989. « A Theory for Multiresolution Signal Decomposition : The Wavelet Representation ». *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 11, n° 7, p. 674-693.
- Markalous, S., S. Tenbohlen et K. Feser. 2008. « Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals ». *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, n° 6, p. 1576-83.
- Mason, J. H. 1955. « Breakdown of Solid Dielectrics in Divergent Fields ». *Proceedings of the IEE - Part C: Monographs*, vol. 102, n° 2, p. 254-263.
- Massingue, F., S. Meijer, P. D. Agoris, J. J. Smit et J. Lopez-Roldan. 2006. In *Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (IEEE Cat. No. 06CH37794), Partial discharge pattern analysis of modeled insulation defects in transformer insulation*. (Piscataway, NJ, USA), p. 542-5. Coll. « Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (IEEE Cat. No. 06CH37794) »: IEEE.
- Meek, J. M. 1942. « The electric spark in air ». *Electrical Engineers - Part I: General, Journal of the Institution of*, vol. 89, n° 20, p. 335-356.
- MSA Work Group. 2002. *MEASUREMENT SYSTEMS ANALYSIS*. <www.iso9000.com>.
- Niemeyer, L. 1995. « A generalized approach to partial discharge modeling ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 2, n° 4, p. 510-528.
- Power & Energy Society. 2001. *IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation*. Std 286-2000. New York: IEEE 35 p.
- Power & Energy Society. 2007. *IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions From Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors*. Std C57.127-2007. New York: IEEE, 57 p.
- Power & Energy Society. 2009. *IEEE Standard for High-Voltage Switchgear (Above 1000 V) Test Techniques - Partial Discharge Measurements*. IEEE Std C37.301. New York, NY, USA: IEEE, USA, 74 p. <<http://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.2009.4804311>>.
- Power & Energy Society. 2010. *Recommended practice for partial discharge measurement in liquid-filled power transformers and shunt reactors*. Std C57.113-2010. New York: IEEE, 47 p.
- Rajani, Menon, S. Kolambekar, N. J. Buch et M. Ramamoorthy. 2001. « Correlation of acoustic emission method and electrical method for detection of partial discharges in

- transformers ». In *7th International Conference on Solid Dielectrics*. (Eindhoven, the Netherlands, 25-29 June 2001,). IEEE.
- Ramakrishnan, M., et D. Suresh. 2005. « An automated microcomputer based partial discharge measurement system ». In *Proceedings of International Symposium on Electrical Insulating Materials*. (Kitakyushu, Japan, 5-9 June 2005), p. 733-736.
- Reid, A. J., M. D. Judd, R. A. Fouracre, B. G. Stewart et D. M. Hepburn. 2011. « Simultaneous measurement of partial discharges using IEC60270 and radio-frequency techniques ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 18, n° 2, p. 444-455.
- Robert, M. Del Vecchio, Poulin Bertrand, Feghali Pierre T., Shah Dilipkumar M. et Rajendra Ahuja. 2010. « Voltage Breakdown and High-Voltage Design ». In *Transformer Design Principles*. p. 399-445. CRC Press.
<<http://dx.doi.org/10.1201/EBK1439805824-c13>>. Consulté le 2012/01/24.
- Rudd, S., S. D. J. McArthur et M. D. Judd. 2010. « A generic knowledge-based approach to the analysis of partial discharge data ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 17, n° 1, p. 149-156.
- Satish, L., et S. Zaengl Walter. 1994. « Artificial Neural Networks for Recognition of 3-d Partial Discharge Patterns ». *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* vol. 1, n° 2.
- Shimizu, N. 1979. *Treeing phenomena of polymeric materials at low temperature*.
- Shintemirov, A., W. Tang et Q. H. Wu. 2009. « Power transformer fault classification based on dissolved gas analysis by implementing bootstrap and genetic programming ». *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, vol. 39, n° 1, p. 69-79.
- Shugg, W. 1995a. « Dielectric Gases ». In *Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials*. p. 435-451. Wiley-IEEE Press.
- Shugg, W. 1995b. *Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials*. Coll. « Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials ». Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- Simons, J. S. 1980. « Diagnostic testing of high-voltage machine insulation. A review of ten years' experience in the field ». *Electric Power Applications, IEE Proceedings B*, vol. 127, n° 3, p. 139-154.
- Sokolov, V., Z. Berler et V. Rashkes. 1999. « Effective methods of assessment of insulation system conditions in power transformers: a view based on practical experience ». In

Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, 1999. Proceedings. (1999), p. 659-667.

Sokolov, V., V. Bulgakova et Z. Berler. 2001. « Assessment of power transformer insulation condition ». In. (Piscataway, NJ, USA), p. 605-13. Coll. « Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference (Cat. No.01CH37264) »: IEEE. <<http://dx.doi.org/10.1109/EEIC.2001.965766>>.

Stone, G., E. Boulter, I. Culbert et H. Dhirani. 2004. *ELECTRICAL INSULATION FOR ROTATING MACHINES*, Second Edition. Piscataway: Wiley-IEEE Press

Stone, G. C. 1991. « Partial discharge. VII. Practical techniques for measuring PD in operating equipment ». *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 7, n° 4, p. 9-19.

Stone, G. C. 2005. « Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 12, n° 5, p. 891-904.

Stone, G. C., H. G. Sedding, B. A. Lloyd et B. K. Gupta. 1988. « The ability of diagnostic tests to estimate the remaining life of stator insulation ». *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 3, n° 4, p. 833-41.

Su-Yeon, Choi, Park Dae-Won, Kim Il-Kwon, Park Chan-Yong et Kil Gyung-Suk. 2008. « Analysis of acoustic signals generated by partial discharges in insulation oil ». In. (Piscataway, NJ, USA), p. 525-8. Coll. « 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis »: IEEE. <<http://dx.doi.org/10.1109/CMD.2008.4580341>>.

Tang, J., et Y. Xie. 2011. « Partial discharge location based on time difference of energy accumulation curve of multiple signals ». *Electric Power Applications IET*, vol. 5, n° 1, p. 175-180.

Tang, Ju, Zhongrong Xu et Caixin Sun. 2009. « Investigation of suppressing PD white noise by compound information of complex wavelet transform ». *European Transactions on Electrical Power*, vol. 19, n° 2, p. 313-322.

Tavner, P.J. 2008. *Condition monitoring of rotating electrical machines*. Institution of Engineering and Technology.

Tektronix®. *Manuel de l'utilisateur TDS3000*.

Tenbohlen, S., D. Denissov, S. M. Hoek et S. M. Markalous. 2008. « Partial discharge measurement in the ultra high frequency (UHF) range ». *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, n° Compendex, p. 1544-1552.

- Tobazcon, R. 1994. « Prebreakdown phenomena in dielectric liquids ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 1, n° 6, p. 1132-1147.
- Townsend, J. . 1915. *Electricity in gases*. Clarendon Press.
- Venkatesh, A. S. P., M. G. Danikas et R. Sarathi. 2011. « Understanding of partial discharge activity in transformer oil under transient voltages adopting acoustic emission technique ». In *Industrial and Information Systems (ICIIS), 2011 6th IEEE International Conference on*. (16-19 Aug. 2011), p. 98-101.
- Wan, Yuan, Chuangli Gong, Zhipeng Wei et Pengcheng Deng. 2011. « Online PD Monitoring and Analysis for Step-up Transformers of Hydropower Plant ». In *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2011 Third International Conference on*. (6-7 Jan. 2011) Vol. 2, p. 762-767.
- Wang, M., A. J. Vandermaar et K. D. Srivastava. 2002. « Review of condition assessment of power transformers in service ». *IEEE Electrical Insulation Magazine*. En ligne. Vol. 18, n° 6, p. 12-25. In IEEE xplora. <<http://dx.doi.org/10.1109/MEI.2002.1161455>>.
- Wang, Yu. 2011. « A New Method for Partial Discharge Pattern Recognition of Electrical Transformers ». In *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2011 Third International Conference on*. (6-7 Jan. 2011) Vol. 1, p. 166-169.
- www.ndbtech.com. « Détecteur ultrasonique ». Québec, Canada.
- Xiaodi, Song, Zhou Chengke et D. M. Hepburn. 2008. « An algorithm for indentifying the arrival time of PD pulses for PD source location ». In. (Piscataway, NJ, USA), p. 379-82. Coll. « 2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena »: IEEE. <<http://dx.doi.org/10.1109/CEIDP.2008.4772780>>.
- Xiaolin, Chen, A. Cavallini et G. C. Montanari. 2008. « Improving high voltage transformer reliability through recognition of PD in paper/oil systems ». In *Int. Conf. On High Voltage Engineering and Application*. (Piscataway, NJ, USA), p. 544-8. IEEE. <<http://dx.doi.org/10.1109/ICHVE.2008.4773993>>.
- Yishan, Liang, Wang Zhenyuan et Liu Yilu. 2009. « Power transformer DGA data processing and alarming tool for on-line monitors ». In *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*. (Piscataway, NJ, USA). IEEE. <<http://dx.doi.org/10.1109/PSCE.2009.4840217>>.
- Zeller, H. R. 1987. « Breakdown and Prebreakdown Phenomena in Solid Dielectrics ». *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. EI-22, n° 2, p. 115-122.

