



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de **Master en électromécanique industrielle**

Thème

Détection les décharges partielles par les ondes acoustiques
dans les transformateurs de puissance

Réalisé par :

- HAMMOUCHE Saber
- ROUMMANI Noureddine

Présenté le 25 Juin 2023 devant le jury composé de :

M ^{me} TALHI Mama	(Encadreur)
M ^{me} Djelghoom Farida (MAA)	(Président)
M ^{me} LABAIR Hakima (MCB)	(Examinatrice)

Année universitaire : 2022/2023

Remerciements

Nous exprimons notre profonde gratitude à Allah le Tout-Puissant pour nous avoir accordé le courage, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous souhaitons également exprimer notre reconnaissance envers nos familles, en particulier nos parents, qui nous ont permis de poursuivre nos études jusqu'à ce jour et qui nous ont soutenus moralement et financièrement, en particulier pendant la rédaction de ce mémoire.

En premier lieu, nous tenons à remercier chaleureusement notre encadrante, Madame Talhi Mama, pour ses précieux conseils et son assistance tout au long de cette période de travail.

Nous exprimons également nos sincères remerciements aux membres du jury d'avoir accepté d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Résumé

Ce PFE est concentrée sur la détection et la localisation des décharges partielles dans les transformateurs de puissance, en mettant en évidence leur impact sur l'isolation et la fiabilité de ces dispositifs essentiels pour les réseaux électriques. À travers l'utilisation de simulations avancées réalisées avec le logiciel COMSOL, des modèles de comportement des décharges partielles ont été développés pour analyser leur distribution et leur propagation. En utilisant ces modèles, une méthode de détection précise a été développée, en tenant compte de l'optimisation de l'emplacement des capteurs pour une localisation plus précise. L'application pratique de cette méthode a été réalisée à travers le développement d'un logiciel convivial qui recommande les emplacements de mesure optimaux. Les résultats obtenus ont démontré une amélioration significative de la précision de la localisation des décharges partielles.

ملخص

ركزت أطروحة البحث هذه على كشف وتوطين التصريفات الجزئية في محولات الطاقة لتحسين موثوقيتها وأدائها. بدأت الدراسة بتحليل متعمق للمحولات وأهمية عملها بشكل صحيح ، مع إبراز العيوب الرئيسية وأنماط الحماية. بعد ذلك تم إجراء دراسة تفصيلية عن التفريغ الجزئي ودراسة العوامل المساهمة في حدوثها وانتشارها وتأثيرها على عزل المحولات. ، تم تطوير نماذج سلوك التفريغ الجزئي لتحليل COMSOL باستخدام عمليات المحاكاة التي أجريت باستخدام برنامج توزيعها. بناءً على هذه النتائج ، تم تطوير طريقة الكشف والتوطين بدقة ، باستخدام تطبيق برمجي للتوصية بمواقع القياس المثلى. لقد ثبت أن تحسين وضع المستشعر أمر بالغ الأهمية في تحسين دقة توطين التفريغ الجزئي

Abstract

This research thesis focused on the detection and localization of partial discharges in power transformers, in order to improve their reliability and performance. The study began with an in-depth analysis of the transformers and the importance of their proper functioning, highlighting the main faults and modes of protection. Then, a detailed study on partial discharges was carried out, examining the factors contributing to their occurrence and propagation, as well as their impact on the insulation of transformers. Using simulations carried out with the COMSOL software, partial discharge behavior models were developed to analyze their distribution. Based on these results, a precise detection and localization method was developed, using a software application to recommend the optimal measurement locations. Optimization of sensor placement has been shown to be crucial in improving the accuracy of partial discharge localization

Table des matières

Introduction générale.....	10
Chapitre 1 : Généralités sur les transformateurs de puissance.....	12
1.1 . Introduction :	13
1.2 Définition.....	13
1.3 Principe de fonctionnement :	13
1.4 Historique :	14
1.5 Construction interne d'un transformateur de puissance :	15
1.5.1 Partie active :	15
1.5.2 Isolation :	18
1.5.3 Huile :	19
1.5.4 Isolation papier :	19
1.5.5 La Cuve :	19
1.5.6 Traversées :	20
1.5.7 Le système de refroidissement :	21
1.6 Composants associés au transformateur de puissance :	21
1.7 Couplage du transformateur :	22
1.8 Types des transformateurs :	23
1.9 Défaut :	23
1.10 Protection de transformateur :	25
1.11 Techniques de diagnostic des transformateurs	26
1.12 Conclusion.....	27
Chapitre 2 : Généralités sur les décharges partielle	28
2.1 Introduction	29
2.2 Historique	29
2.3 Définition.....	29

Table des matières

2.4	Les causes.....	30
2.5	Classification des décharges partielles	31
2.5.1	Les décharges « internes ».....	31
2.5.2	Les décharges de « surface »	31
2.5.3	Les décharges « couronnes »	31
2.5.4	Les arborescences.....	32
2.6	Caractérisation électrique des décharges partielles	32
2.6.1	La fréquence f.....	32
2.6.2	La durée T	33
2.6.3	L'amplitude	33
2.6.4	La forme d'onde.....	33
2.7	Grandeurs de impulsions de décharge partielle.....	33
2.7.1	Charge apparente q.....	33
2.7.2	Taux de répétition des impulsions n.....	33
2.7.3	Fréquence de répétition des impulsions N.....	34
2.7.4	Angle de phase Φ_i et temps t_i d'apparition d'une impulsion DP	34
2.7.5	Courant de décharge moyen I.....	34
2.7.6	Puissance de décharge P.....	34
2.8	Effet des décharges partielles dans la dégradation des matériaux isolants.....	35
2.9	Objectif de la mesure des décharges partielles	37
2.10	Interprétation des mesures	37
2.11	Méthodes de détection et de mesure des décharges partielles.....	38
2.11.1	La méthode acoustique	38
2.11.2	La méthode chimique	38
2.11.3	Détection optique.....	39
2.11.4	Détection électromagnétique	39

Table des matières

2.11.5	Détection électrique.....	40
2.12	Localisation des défauts dans les transformateurs.....	40
2.13	Conclusion.....	41
	Chapitre 3 : simulation et détection de décharge partielles	42
3.1	Introduction	43
3.2	Présentation du logiciel COMSOL Multi-physiques :	43
3.2.1	Les avantages :	44
3.2.2	Les inconvénients :	44
3.2.3	Description de l'interface COMSOL :.....	44
3.3	Objectif de ce chapitre.....	45
3.4	Modèle de simulation COMSOL.....	46
3.4.1	Modèle mathématique	46
3.4.2	Model de la cuve du transformateur	47
3.4.3	Matériaux :	48
3.4.4	Conditions aux limites.....	50
3.4.5	Maillage.....	50
3.5	Les résultats :.....	51
3.5.1	La propagation de l'onde acoustique	52
3.5.2	Les signaux.....	53
3.5.3	Les calculs	54
3.5.4	Les résultats de détection.....	56
3.6	Conclusion.....	58
	Chapitre 4 : Création d'un logiciel pour la localisation précise des décharges partielles	59
4.1	Introduction	60
4.2	Cahier des charges.....	60

Table des matières

4.2.1	Objectifs du logiciel :	60
4.2.2	Spécifications techniques :	61
4.3	Étapes de développement :	62
4.3.1	Conception de l'architecture logicielle	62
4.3.2	Implémentation et programmation	62
4.3.3	Tests et validation.....	62
4.4	Les outils	62
4.4.1	Langage de programmation C++.....	62
4.4.2	Le framework Qt :	63
4.4.3	CMake	64
4.4.4	GitHub.....	64
4.5	Architecture et composants de l'application	64
4.5.1	Interface graphique :	64
4.5.2	Les pages de logiciel	66
4.6	Algorithme.....	69
4.6.1	Méthode de localisation :	69
4.6.2	Méthode de localisation :	70
4.7	Validation :	71
4.8	Conclusion.....	72
	Conclusion générale :	74
	Annexes.....	76
	Bibliographie.....	78

1.1 Liste des figures :

Figure 1.1 : Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur	14
Figure 1.2: Circuit magnétique triphasé type cuirassé.	16
Figure 1.3 : Circuit magnétique triphasé	17
Figure 1.4 : Enroulement.....	18
Figure 1.5 : Enroulement en couche et en galettes.....	18
Figure 1.6 : La cuve d'un transformateur de puissance.	20
Figure 1.7: Traversé porcelaine et condensateur.....	21
Figure 1.8 : composants constituant un transformateur de puissance.	22
Figure 1.9 : décharges partielles.....	24
Figure 2.1: Décharge partielle	30
Figure 2.2: les défauts dans un isolant	31
Figure 2.3: types de décharges partielles selon la classification de Kreuger.	32
Figure 2.4 : Processus de dégradation provoqué par les DP, d'après [8].....	36
Figure 2.5 cycle de vie de l'équipemen.....	37
Figure 2.6 : schéma électrique d'un système de détection électrique.	40
Figure 2.7 : Technique de localiser les défauts dans les transformateurs [12].....	41
Figure 3.1: COMSOL Multiphysics.....	43
Figure 3.2 : L'interface de COMSOL	45
Figure 3.3: Signal acoustique de décharge partielle.....	47
Figure 3.4: Géométrie du modèle de réservoir de transformateur	48
Figure 3.5: les matériaux du modèle de transformateur	50
Figure 3.6.a : Signal de pression acoustique mesuré par capteur 1 (0,20).....	53
Figure 2.6.b : Signal de pression acoustique mesuré par capteur 2 (10, 0)	53

Figure 2.6.c : Signal de pression acoustique mesuré par capteur 3 (30, 0)	53
Figure 4.1: La barre d'outils	65
Figure 4.2: Barre de Menu	65
Figure 4.3: Widget de Gestion des Fichiers	66
Figure 4.4: la page d'insertion propriété de transformateur.....	66
Figure 4.5: Page d'insertion de données.	67
Figure 4.6 : La page d'affichage des résultats.....	69

1.2 Liste des tableaux :

Tableau 2.1 : Caractéristiques des phénomènes de rupture, dégradation et vieillissement	36
Tableau 3.1 : propriétés des matériaux.....	48
Tableau 3.2 : Répartition de la pression acoustique dans un modèle de transformateur	52
Tableau 3.3 : Les positions des trois capteurs pour les deux simulations.....	56
Tableau 3.4 : La temps d'arrivée pour les trois capteurs	57
Tableau 3.5 : Localisation calculée de la source PD.....	57
Tableau 4.1 : la différence entre les positions calculée Manuellement et par logiciel.....	71
Tableau 4.2 : Une étude comparative pour évaluer la précision et de la fiabilité de logiciel pour la détermination des coordonnées des décharges partielles.	72

Introduction générale

Les transformateurs de puissance jouent un rôle essentiel dans les réseaux électriques, en permettant la transmission efficace de l'énergie électrique. Toutefois, ils sont exposés à diverses défaillances et détériorations qui peuvent nuire à leur performance et à leur durée de vie. Les décharges partielles sont l'un des problèmes les plus préoccupants, car elles peuvent endommager l'isolation des transformateurs et provoquer des pannes potentielles.

Cette étude approfondie a pour objectif de détecter et de localiser les décharges partielles dans les transformateurs de puissance, en utilisant à la fois une méthode de simulation et une réalisation de logiciel. Le travail de recherche se compose de quatre chapitres, qui traitent chacun d'un aspect spécifique du sujet.

Le premier chapitre donne une vue d'ensemble des transformateurs de puissance, en soulignant leur importance, leur structure et les défis qu'ils rencontrent dans différents environnements de fonctionnement. Nous passons également en revue les pannes courantes et les méthodes de protection utilisées pour assurer leur bon fonctionnement.

Le deuxième chapitre approfondit le concept des décharges partielles, en examinant leurs causes et leur impact sur l'isolation des transformateurs. Nous identifions les différents types de contaminants qui favorisent les décharges partielles, en mettant en évidence les effets négatifs qu'ils peuvent avoir sur les performances et la durée de vie des transformateurs.

En nous basant sur ces connaissances, le troisième chapitre présente l'application du logiciel COMSOL pour simuler les décharges partielles à l'intérieur des transformateurs de puissance. En élaborant des modèles de simulation détaillés et en analysant les schémas de distribution des décharges partielles, nous cherchons à améliorer notre compréhension de leur comportement et à étudier l'effet de la variation de l'emplacement des points de mesure.

Le quatrième chapitre se concentre sur la mise en pratique des connaissances acquises. Nous décrivons le développement et la mise en œuvre d'une application logicielle conviviale, basée sur les données de chapitre 3, qui permet de localiser avec précision les décharges partielles

dans les transformateurs. Cette solution vise à simplifier et optimisé le processus de détection en automatisant les calculs et en réduisant les erreurs potentielles.

Toute ce mémoire approfondi fournit des informations précieuses sur la détection et la localisation des décharges partielles dans les transformateurs de puissance. Les résultats obtenus ont le potentiel d'améliorer la fiabilité, les performances et la durée de vie des transformateurs, contribuant ainsi à l'efficacité et à la stabilité des réseaux électriques.

Chapitre 1 :

Généralités sur les

transformateurs de

puissance

1.1 . Introduction :

Un transformateur de puissance est un composant électrique haute-tension essentiel dans l'exploitation des réseaux électriques, il a été en service pendant des nombreuses années sous différents environnement, conditions électriques et mécaniques. L'apparition d'un défaut dans le système provoque la circulation de forts courants de court-circuit dans le transformateur, induisant des champs parasites dans celui-ci. Ces champs parasites produisent des forces axiales et radiales sur les enroulements du transformateur. La structure mécanique et les enroulements du transformateur sont donc soumis à de fortes sollicitations mécaniques. Un transformateur peut aussi être soumis à des contraintes pendant son transport et son installation ainsi que par suite des variations cycliques de la température ambiante. Les contraintes imposées aux transformateurs de puissance peuvent entraîner des déformations mécaniques ou des défauts dans leurs enroulements et leurs noyaux magnétiques [1].

1.2 Définition

Sa définition selon la commission électrotechnique internationale est la suivante : « Appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et courant de valeurs généralement différentes, à la même fréquence, dans le but de transmettre de la puissance électrique » [2].

Ils jouent un rôle essentiel dans le transport de l'énergie électrique à distance, en transformant les valeurs de la tension et de l'intensité à des valeurs qui rendent abordable techniquement et économiquement le transport depuis les centres de production aux centres d'utilisation [3].

1.3 Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'un transformateur est basé sur le phénomène de l'induction électromagnétique. Quand une tension U_1 variable, est appliquée entre les bornes de l'enroulement primaire, elle y engendre un courant i_1 variable.

La force magnétomotrice variable $N_1 i_1$ va magnétiser le circuit magnétique en y produisant un champ magnétique et un flux variable. Comme indique sur la figure 1.1

Les deux enroulements, primaire et secondaire, qui se trouvent placés sur ce circuit magnétique et qui sont traversés par ce flux variable, sont donc le siège de forces électromotrices induites.

Comme le flux magnétique est alternatif, la f.e.m induite au secondaire est aussi alternative et sa fréquence est égale à la fréquence du courant circulant dans l'enroulement primaire [4].

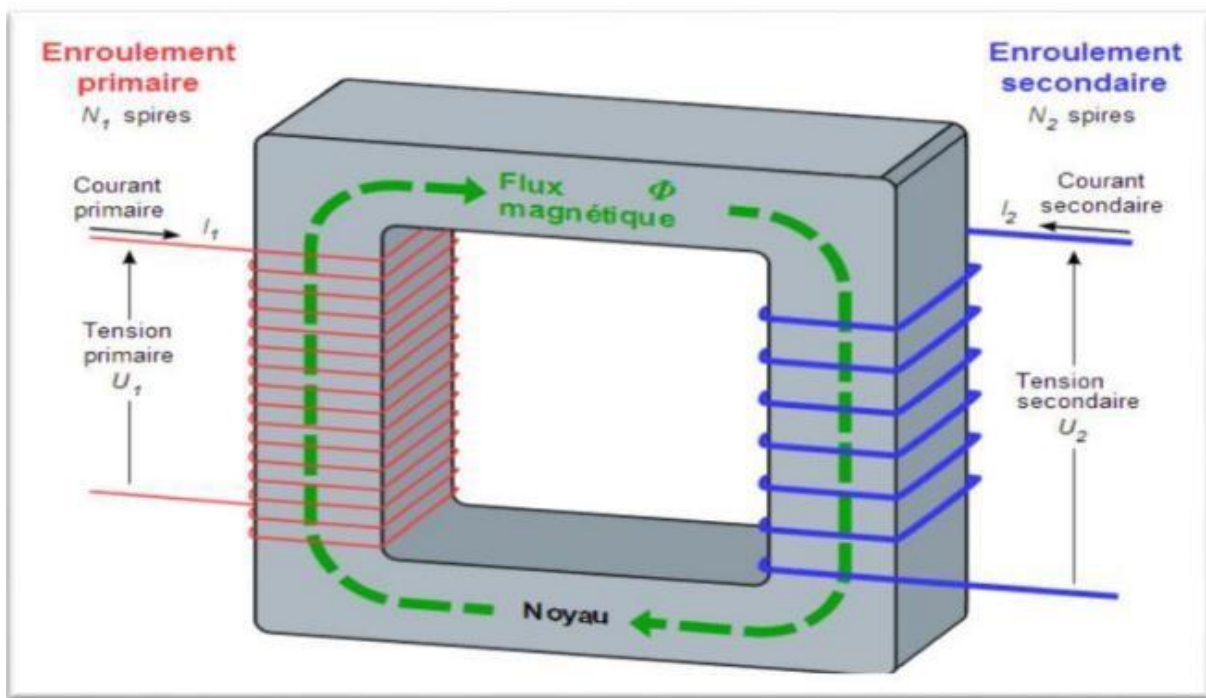


Figure 1.1 : Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur

1.4 Historique :

Le principe de l'induction électromagnétique est découvert indépendamment par Michael Faraday et Joseph Henry en 1831. Mais Faraday ayant publié le premier ses résultats expérimentaux, le crédit de la découverte lui revient.

Dans les années 1870, des générateurs électriques en courant alternatif apparaissent. On se rend compte qu'en l'utilisant dans une bobine d'induction le système d'ouverture du circuit devient inutile. Le premier système à circuit magnétique en fer est exposé par Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs à Londres en 1882, qui le dénomment générateur secondaire. En automne 1884,

la société Ganz, venu à la conclusion que les circuits magnétiques ouverts ne sont pas la solution pour les usages pratiques et pour réguler la tension, Toujours en automne 1884, la société Ganz réalise le premier transformateur à haut rendement et le livre le 16 septembre 1884 [5].

En 1889, le russe Mikhaïl Dolivo-Dobrovolski construit le premier transformateur triphasé chez AEG, une société allemande.

1.5 Construction interne d'un transformateur de puissance :

1.5.1 Partie active :

La partie active est définie comme le circuit magnétique et les enroulements.

1.5.1.1 Circuit magnétique :

Le noyau se compose d'un empilage de tôles ferromagnétique de haute perméabilité et à grains orientés, isolées électriquement entre elles. Il doit être conçu de façon à réduire les pertes par courant de Foucault et par hystérésis qui se produisent lors de la variation périodique du flux magnétique.

Le rôle du noyau est de guider le flux magnétique entre le primaire et le secondaire. La densité du flux doit être aussi haute que possible sans que le noyau entre en saturation. Cela permet de réduire la taille du transformateur et ainsi son prix. Le champ magnétique a typiquement une valeur comprise entre 1,6 et 1,8 tesla [6].

Deux grandes familles de circuits magnétiques existent : en colonnes et cuirassé.

La première est la plus répandue : les enroulements y sont placés autour du circuit magnétique. Les parties métalliques verticales sont appelées colonnes, celles horizontales culasse. Pour les transformateurs triphasés la construction plus courante est celle à 3 colonnes. Les culasses et les colonnes ont alors même section. Le flux doit trouver un chemin de retour hors des enroulements de culasse à culasse, il y a donc formation d'un flux de fuite externe important. Une solution consiste à placer aux côtés des 3 colonnes bobinées 2 colonnes non bobinées servant de chemin de retour pour le flux. Dans ce cas, la section des culasses est la moitié de celle des colonnes, le flux se divisant en deux parties égales en sortant des colonnes. Cela

permet de réduire la hauteur totale du circuit magnétique, pour cette raison cette solution est très répandue pour les gros transformateurs.

Les circuits cuirassés entourent au contraire les enroulements. Ceux à colonnes ont l'avantage d'être plus simple à construire et à refroidir ainsi qu'à réparer, les seconds permettent de réaliser des transformateurs avec une faible impédance de court-circuit. En outre, à cause de la meilleure protection magnétique produit par le montage cuirassé, celui-ci est utilisé dans le cas où la tension est faible et le courant très élevé, typiquement dans les fours à arc électrique.

Ceux à colonnes sont toutefois largement majoritaires dans le monde [7].

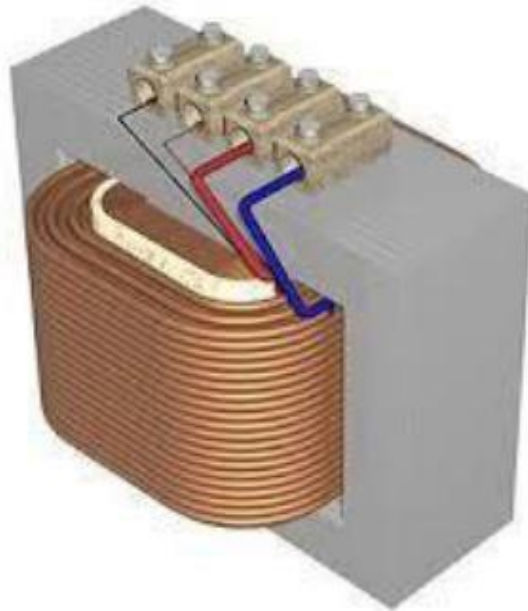


Figure 1.2: Circuit magnétique triphasé type cuirassé.



Figure 1.3 : Circuit magnétique triphasé

1.5.1.2 Les Enroulements :

Un enroulement de transformateur est l'« ensemble des spires formant un circuit associé à l'une des tensions pour lesquelles le transformateur a été établi ». En d'autre terme il s'agit d'une bobine électrique placée autour du noyau magnétique d'un transformateur. Traditionnellement on appelle l'enroulement qui reçoit la puissance active de la source d'alimentation en service « enroulement primaire » et celui qui délivre la puissance active à une charge, « enroulement secondaire ». Un autre enroulement du transformateur, ayant habituellement une puissance assignée inférieure à celle de l'enroulement secondaire, est alors souvent appelé « enroulement tertiaire ». Pour plus de clarté, il convient d'employer les termes enroulements haute tension (HT), moyenne tension (MT) et basse tension (BT) qui ne prêtent pas à confusion étant classés en fonction de leur niveau de tension [8].

Le rapport du nombre de spires entre primaire, secondaire et tertiaire détermine le rapport de conversion des tensions et des courants. Les enroulements sont quasiment toujours réalisés en cuivre, bien qu'on trouve également de l'aluminium pour des raisons de coût dans les transformateurs de faible puissance.



Figure 1.4 : Enroulement.

On distingue deux types de bobinages :



Figure 1.5 : Enroulement en couche et en galettes.

1.5.2 Isolation :

L'isolation diélectrique, qu'elle soit solide ou liquide, doit permettre au transformateur de résister à la fois à la tension alternative en régime permanent et aux surtensions transitoires sans décharge électrique. Pour ce faire, elle doit homogénéiser le champ électrique dans le transformateur. L'isolation solide est constituée principalement de cellulose, celle liquide est normalement constituée d'huile [9].

1.5.3 Huile :

Les transformateurs de puissance sont traditionnellement remplis d'huile minérale spécifique. Elle permet l'isolation diélectrique des enroulements entre eux ainsi que le refroidissement du transformateur. Elle a en effet une rigidité diélectrique nettement supérieure à l'air. L'huile est un bon conducteur thermique, et sa circulation au travers de radiateurs permet d'évacuer la chaleur produite par les bobines et le circuit magnétique du transformateur. Elle doit posséder un haut niveau d'isolation diélectrique et un haut point d'inflammation pour permettre une exploitation en toute sécurité [10].

Pour éviter de graves conséquences écologiques en cas de fuite d'huile, un bac de rétention est installé sous les transformateurs.

1.5.4 Isolation papier :

L'isolation papier est réalisée à l'aide de couches de papier superposées, imprégnées d'huile puis séchées. Les pores du papier atteignent alors une grande rigidité diélectrique, des pertes diélectriques faibles et une constante diélectrique proche de celle de l'huile. Il est à noter que le papier associé à l'huile a de bien meilleures propriétés diélectriques que le papier ou l'huile séparément. La présence d'humidité dans l'isolation est très néfaste pour ses propriétés. Cette isolation est ensuite disposée dans le transformateur entre les enroulements et la cuve en suivant la technique des barrières, c'est-à-dire que de fines couches d'isolation sont alternées avec de l'huile.

L'isolation papier a la propriété de pouvoir absorber une grande quantité d'humidité. Cela détériore ses propriétés diélectriques et augmente considérablement son volume.

L'isolation doit donc être séchée avant d'être placée dans la cuve [11]

1.5.5 La Cuve :

Les cuves des transformateurs sont faites de tôles d'acier (comme indique sur la figure 1.6).

Elles doivent pouvoir résister aux forces exercées lors du transport du transformateur. Leur couvercle est amovible et scellé grâce à des boulons ou une soudure. la cuve est testée sous vide

pour contrôler ce point. Par ailleurs, pour résister aux conditions extérieures les cuves sont peintes à l'aide d'un revêtement résistant à la corrosion [11].

Par ailleurs pour les transformateurs de forte puissance, le flux de fuite devient assez important, pour éviter un échauffement trop important des enroulements ou de la cuve, liés au courant de Foucault s'induisant en leurs seins, des écrans sont placés à l'intérieur des parois de la cuve. Ceux-ci conduisent le flux et évitent ainsi son passage dans les autres parties et ainsi leur échauffement par courant de Foucault. Comme pour les circuits magnétiques, afin d'éviter la circulation du courant, il est important qu'ils ne soient mis à la terre qu'en un point.



Figure 1.6 : La cuve d'un transformateur de puissance.

1.5.6 Traversées :

Les traversées isolantes ont pour but d'assurer la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaire et secondaire voir figure 1.7, d'une part, et les lignes d'arrivée et de départ, d'autre part, à travers le couvercle, d'où le nom de traversées. Leurs fonctions sont principalement l'isolement du champ électrique et une fixation étanche et robuste sur le couvercle. Il existe plusieurs types de traversée. Pour les tensions jusqu'à quelques dizaines de kV le corps des traversées est généralement constitué d'un bloc unique de porcelaine, qui est un matériau isolant [12].



Figure 1.7: Traversé porcelaine et condensateur

1.5.7 Le système de refroidissement :

Les pertes des enroulements, principalement par effet Joule, mais également par courant de Foucault, oblige à les refroidir. L'évacuation de la chaleur par conduction, convection et radiation. Idéalement l'huile doit être en mouvement par rapport à tous les conducteurs afin que la chaleur soit transmise par convection depuis ces derniers vers les premiers. [12]

Le système de refroidissement d'un transformateur a pour but de maintenir les températures des enroulements et de l'isolant (huile par exemple) à des niveaux acceptables. Le choix du mode de refroidissement se fait en particulier en fonction des paramètres suivants :

- Pertes à évacuer
- Température ambiante extérieure
- Contraintes de bruit
- Contraintes dimensionnelles limitant la taille du transformateur □ et bien sûr le coût.

1.6 Composants associés au transformateur de puissance :

En plus de son noyau magnétique, de ses enroulements et de son isolation, un transformateur dispose de nombreux composants secondaires. Certains sont indispensables comme un dispositif permettant la dilatation de l'huile, d'autres ne le sont pas comme le changeur de prises.

Ceux présentés ici correspondent à un transformateur de puissance « classique » voir figure 1.8.

On peut y ajouter l'huile, l'isolation papier et le système de refroidissement qui ne sont pas représentés.

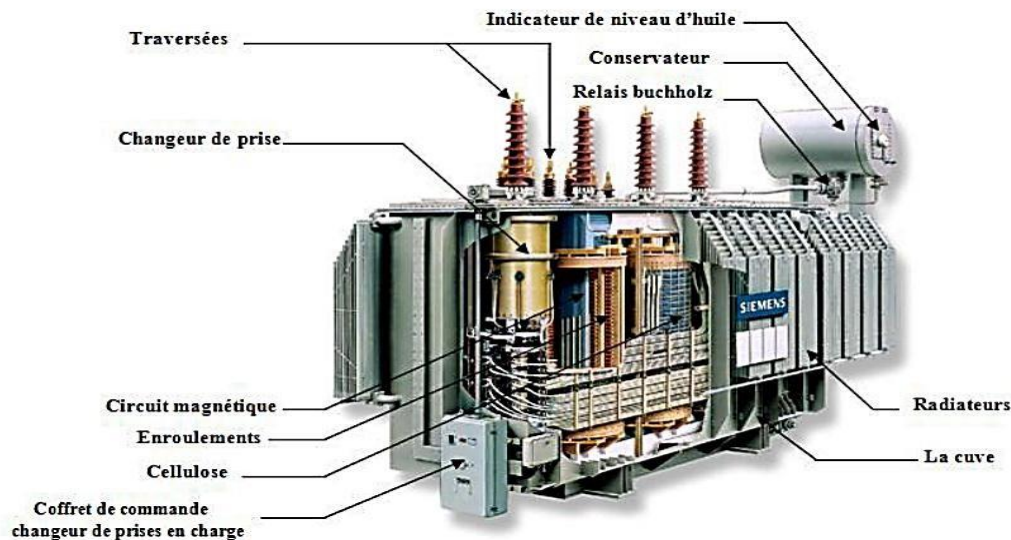


Figure 1.8 : composants constituant un transformateur de puissance.

1.7 Couplage du transformateur :

Les transformateurs triphasés disposent au minimum de trois enroulements au primaire et trois au secondaire, il est nécessaire de les coupler entre eux pour connecter ou obtenir des réseaux triphasés. [13]

Pour un transformateur triphasé, les enroulements peuvent être connectés de trois manières différentes :

- En étoile, représenté par la lettre Y.
- En triangle, représenté par la lettre D ou Δ .
- En zig-zag, représenté par la lettre Z.
- Le couplage en étoile au primaire et au secondaire (Yy) est utilisé surtout pour les transformateurs de très haute tension.
- Le couplage en étoile au primaire et en triangle au secondaire (Yd) est utilisé pour connecter les générateurs de centrales électriques et de machines industrielles.

- Dans les réseaux de distribution électrique un couplage étoile au primaire et zigzag au secondaire (Yz) est courant.

1.8 Types des transformateurs :

Il existe différents types de transformateurs, mais nous nous intéresserons à l'étude des transformateurs de puissances de réseaux électriques car ils présentent le plus grand intérêt dans le développement de l'interconnexion des réseaux.

1.9 Défaut :

Les défauts dans les transformateurs sont de quatre types : les surcharges, les courts-circuits, les défauts à la masse et les sur fluxages.

Nous passerons rapidement en revue dans cette analyse, les défauts que l'on rencontre couramment sur les transformateurs, leurs causes, leurs conséquences.

Dans le premier cas, l'intensité traversant le transformateur devient trop grande, ce qui conduit à une augmentation de la température interne du transformateur ce qui est nuisible à la durée de vie.

Les courts-circuits sont eux de deux types : interne et externe. Les premiers sont dus à des arcs entre les enroulements, ils entraînent une dégradation rapide de l'huile et la formation de gaz qui peuvent mener à des incendies ou à l'explosion du transformateur. Les seconds entraînent principalement une forte contrainte mécanique sur les enroulements et peuvent s'ils sont prolongés mener à un court-circuit interne.

Les défauts à la masse sont comparables aux courts-circuits internes avec une connexion entre le bobinage et le noyau ou la cuve.

Un autre défaut à éliminer est le sur fluxage, c'est-à-dire une hausse du flux magnétique dans le noyau de fer du transformateur. Il est causé soit par une surtension, soit par une baisse de la tension.

Les décharges partielles sont des décharges disruptives localisées d'une petite partie d'un système d'isolement électrique solide ou liquide sous l'effet d'une forte contrainte de tension. [14]

Les décharges partielles peuvent être provoquées par :

- Une cavité non imprégnée d'huile.
- Une contamination (particule métallique).
- Une conception non optimale (choix du matériau, de sa disposition...).
- Un dommage mécanique (guipage mou, déformation d'une cornière...).
- Une mauvaise réalisation (arêtes, effet de pointe, traitement insuffisant...).

Le champ électrique dans la cavité est 2 à 5 fois supérieur à celui dans le matériau il se produit un micro-claquage dans la cavité.

Cette décharge peut :

S'éteindre si les parois de la cavité se charbonne et si le matériau est sain. Se développer en détruisant le matériau ce qui affaiblit sa tenue diélectrique et peut conduire à un claquage comme indiqué sur la figure 1.9.

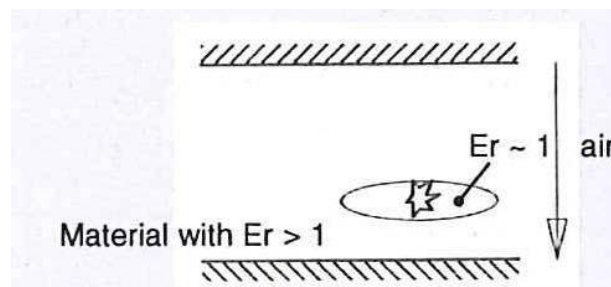


Figure 1.9 : décharges partielles.

Dans tous les cas, si un défaut est détecté, il convient de déconnecter au plus vite le transformateur. Concrètement un relais envoie un ordre d'ouverture (de déclenchement) au disjoncteur relié au transformateur.

1.10 Protection de transformateur :

Pour la protection contre les surcharges, des protections à maximum de courant de phase temporisées ou des protections à image thermique sont utilisées. Un capteur de débit d'huile permet de s'assurer de la bonne circulation de l'huile dans le circuit de refroidissement.

Pour les courts-circuits, des relais Buchholz sont utilisés dans le cas des transformateurs respirants. Pour les transformateurs hermétiques, des détecteurs de gaz et de pression sont utilisés. Par ailleurs une protection différentielle mesure, par l'intermédiaire des transformateurs de courant comme toutes les protections liées au courant, la différence entre les courants entrants dans le transformateur et ceux en sortant et protège le transformateur contre les courts-circuits entre phases. Ces protections peuvent être également capables de détecter les défauts entre spires. Par ailleurs, une protection à maximum de courant de phase instantanée protège des courts-circuits violents au primaire. Pour éviter un déclenchement abusif lors de la connexion du transformateur à cause des courants d'enclenchement, un système mesurant en général la 2^e harmonique, caractéristique de la saturation du noyau magnétique, « bloque » (empêche le déclenchement) les protections différentielles et de maximum de courant.

Pour les défauts de masse, la première solution est de mesurer le courant homopolaire. Une autre solution, dite protection de terre restreinte, compare le courant dans la connexion au neutre et la somme des courants dans les phases. On peut la ranger avec les protections différentielles. On peut également isoler la cuve du transformateur de la masse, et mesurer le courant dans la connexion reliant la cuve et la masse : on parle alors de protection masse-cuve. Si ce courant devient trop important, le transformateur déclenche, cette protection est donc fondamentalement une protection à maximum de courant.

Pour détecter le sur fluxage, la mesure de la 5^e harmonique du courant est en général utilisée. Le flux est directement proportionnel au rapport tension sur fréquence, si le phénomène devient trop fort, il faut déconnecter le transformateur. De manière similaire une protection contre les surtensions, les sous-tensions ou les sous fréquences peuvent être utilisées.

Pour la détection des décharges partielles plusieurs méthodes qui ont été communément connues pour la mesure sont : méthode de détection optique, méthode de détection acoustique, méthode de détection électrique (cette partie est détaillée au chapitre 2).

1.11 Techniques de diagnostic des transformateurs

Les quatre grandes familles de diagnostics avec leurs abréviations usuelles sont les suivantes : l'analyse des gaz dissous (DGA), l'analyse fréquentielle (FRA), la mesure des décharges partielles (DP) et méthodes impliquant des mécanismes de polarisation/relaxation (PDC). Elles ont chacune des fonctions distinctes et complémentaires.[16]]

L'analyse des gaz dissous, sous-entendu dans l'huile, est une méthode qui permet à partir de l'évaluation des proportions des différents gaz dissous dans l'huile de détecter la présence : de décharges partielles, de décharges électriques ou de surchauffes dans le transformateur. Elle est réalisée par prélèvements ponctuels d'huile sur les transformateurs, ou par un système de surveillance en ligne qui réalise alors l'analyse de manière régulière.

L'analyse furanique qu'on peut y associer consiste à rechercher dans l'huile la présence de furane, témoignant d'une dégradation de l'isolation et tout particulièrement du degré de polymérisation de la cellulose, une valeur en dessous de 150 est considérée comme critique pour le transformateur.

L'analyse fréquentielle consiste à déterminer la réponse fréquentielle du transformateur sur une plage de fréquences allant de 1 kHz, à cause de la non-linéarité du noyau magnétique, jusqu'à 1 MHz, à cause du bruit environnant. Pour définir l'ensemble du spectre, les méthodes par balayage ou par impulsions peuvent être utilisées. La seconde utilise par la suite une transformation de Fourier rapide. Elle a l'avantage d'être plus rapide, mais est moins précise que la méthode par balayage. L'analyse des fonctions de transfert des différentes phases s'effectue en les comparant entre elles et/ou à une mesure antérieure permet de détecter la présence de défauts mécaniques dans les enroulements, à savoir : une déformation mécanique ou un défaut d'isolation entre deux spires.[15]

La mesure des décharges partielles permet de détecter des défauts dans l'isolation et de les localiser.

Les méthodes mettant en jeu les courants de polarisation et de dépolarisation consistent à polariser puis à dépolariser l'isolation afin d'en déduire son humidité. En effet, cette dernière influe sur les constantes de temps de charge et de décharge dans le cas où on assimile les phénomènes de polarisation à des charges et des décharges d'un condensateur (circuit RC).

1.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur les transformateurs de puissance, nous avons aussi donné un aperçu sur les principaux éléments qui les constituent, leur rôle et leur importance dans cette machine statique. A la fin de ce chapitre, les différents défauts et modes de protection du transformateur ont été introduits pour mieux cerner son fonctionnement.

Le prochain chapitre sera consacré à l'un des défauts, les décharges partielles, généralités et leur influence sur les transformateurs de puissance.

Chapitre 2 :

Généralités sur les décharges partielles

2.1 Introduction

La présence de décharges partielles constitue un problème pour la fiabilité de l'isolation dans les enroulements des transformateurs utilisés dans les centrales électriques. Ces enroulements sont fabriqués avec soin pour éviter toute contamination de l'isolant de l'enroulement, mais une petite quantité de contaminants est toujours présente pendant la fabrication. Les contaminants peuvent être solides, liquides ou gazeux.

Les transformateurs de tension moyenne et haute peuvent souffrir d'une dégradation de l'isolation en raison de décharges partielles, ce qui réduit considérablement leur durée de vie. L'isolation est un élément fondamental et intégral des transformateurs, y compris l'isolation solide globale, l'isolation entre les spires, l'isolation de la traverse, l'isolation du disque ou du changeur de prises. Tout vide ou fissure présente lors de la fabrication peut avoir un impact considérable sur la durée de vie du transformateur. [17]

2.2 Historique

L'importance des études de PD a été réalisée dans les années 1940 [17]. Des travaux initiaux sur la détection, la mesure ainsi que la localisation des phénomènes de DP ont été réalisés et un grand nombre de techniques de mesure efficaces ont été introduites. Plus tard, avec des données de DP acquises adéquates, divers schémas d'interprétation ont été introduits, impliquant différentes échelles de temps. La revue de la littérature suivante est donc divisée en deux parties, la première partie étant axée sur les techniques de mesure de la DP et la seconde consacrée à l'analyse des données de la DP.

2.3 Définition

Selon la norme (IEC 270), la définition complète de la décharge partielle (PD) est :

« Une décharge électrique localisée qui ne traverse que partiellement l'isolation entre les conducteurs, et qui est généralement de faible ampleur et de courte durée. Les décharges partielles peuvent être causées par des anomalies dans la structure, la qualité ou les propriétés des matériaux d'isolation ou par des facteurs environnementaux tels que la température ou l'humidité. Les décharges partielles peuvent causer la dégradation progressive de l'isolation et des matériaux associés, ce qui peut entraîner des défauts de l'équipement électrique ou même

des défaillances. La mesure et l'analyse des décharges partielles sont importantes pour garantir la sécurité et la fiabilité du fonctionnement des équipements électriques. »

La figure 2.1 montre deux décharges partielles dans l'isolant (papier dans ce cas) nous notons que les décharges ont démarré en anomalies dans l'isolant.



Figure 2.1: Décharge partielle

2.4 Les causes

La décharge partielle (DP) peut être causée par une variété de facteurs, tels que la présence d'impuretés, de fissures ou de vide dans l'isolant d'enroulement d'un transformateur de puissance (figure 2.2). Les impuretés peuvent être sous forme solide, liquide ou gazeuse, et peuvent être introduites pendant le processus de fabrication. Les zones faibles créées par ces impuretés peuvent devenir des points de départ pour la DP lorsqu'ils sont soumis à des tensions élevées. De plus, le vieillissement et les variations environnementales peuvent également augmenter le risque de DP. Il est donc important de surveiller et de mesurer régulièrement les décharges partielles pour prévenir la défaillance de l'isolant et garantir un fonctionnement fiable du transformateur pendant toute sa durée de service.

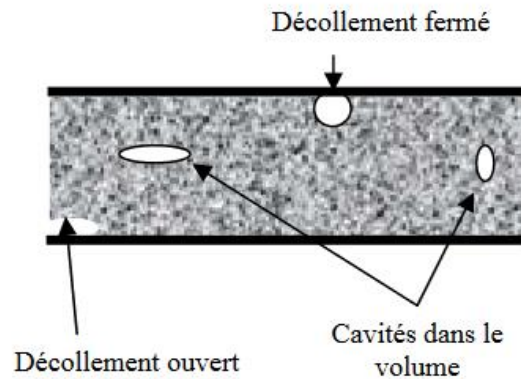


Figure 2.2: les défauts dans un isolant

2.5 Classification des décharges partielles

Parmi les nombreux travaux de classification des décharges partielles, Kreuger a développé une méthode qui consiste à classer les décharges partielles en fonction de leurs localisations et de l'amplitude de la charge qu'elles injectent [18]. Cette méthode aura permis de définir 4 principaux types de décharges :

2.5.1 Les décharges « internes »

Elles apparaîtront dans des zones bien définies, où la rigidité diélectrique du matériau sera faible, typiquement dans des vacuoles d'air au sein d'un isolant solide.

2.5.2 Les décharges de « surface »

Ce sont les décharges qui se produisent lorsqu'un isolant solide est placé dans un gaz isolant en contact d'un conducteur, et qui se développent sur la surface de l'isolant solide. Elles s'amorcent au niveau d'un « point triple » (interface gaz/métal/isolant solide) par renforcement local du champ électrique.

2.5.3 Les décharges « couronnes »

Ce sont des décharges qui apparaissent dans une situation de forte hétérogénéité du champ électrique, typiquement en présence d'un système pointe/plan, où le champ électrique sera très important au niveau de la pointe et beaucoup plus faible au niveau du plan. La décharge

évoluera dans une zone restreinte de l'intervalle gazeux. Ces décharges sont également appelées décharges corona.

2.5.4 Les arborescences

La décharge apparaîtra dans une zone de faiblesse d'isolation et se propagera par la suite dans l'isolant en formant des arborescences. Les ramifications seront le siège de décharges [19].

Sur la figure 2.3 sont représentés ces 4 types de décharges partielles.

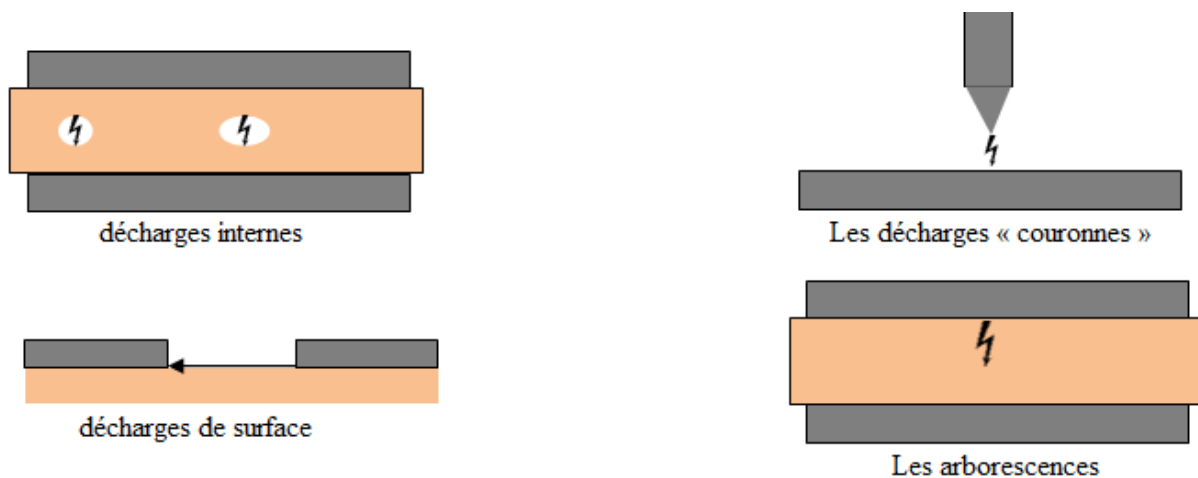


Figure 2.3: types de décharges partielles selon la classification de Kreuger.

2.6 Caractérisation électrique des décharges partielles

La caractérisation électrique des décharges partielles consiste en l'analyse et la description des propriétés électriques des décharges partielles qui se produisent dans les matériaux isolants. Cette analyse comprend la mesure de diverses caractéristiques telles que la fréquence, la durée, l'amplitude et la forme d'onde des décharges. Cette information est cruciale pour comprendre le comportement des décharges partielles et leur impact sur la qualité de l'isolation.

2.6.1 La fréquence f

La fréquence est le nombre de périodes par unité de temps ce qui correspond à l'inverse de la période : $f=1/T$ ou f est la fréquence en Hertz (Hz ou s^{-1}) et T la période en seconde (s)

La fréquence des décharges partielles peut en dire long sur le type de décharge et la santé de l'isolation. Chaque type de décharge a une fréquence spécifique, la connaître et la mesurer nous permettra de la localiser.

2.6.2 *La durée T*

La durée des décharges partielles nous aider à déterminer la gravité de la défaillance de l'isolation. Des décharges plus longues peuvent signifier un dommage plus grave à l'isolation, tandis que des décharges plus courtes peuvent indiquer une défaillance moins grave [20].

2.6.3 *L'amplitude*

L'amplitude des décharges partielles peut également être utilisée pour évaluer l'état de l'isolation. Des amplitudes plus élevées peuvent être associées à une dégradation plus avancée de l'isolation, tandis que des amplitudes plus faibles peuvent être associées à une meilleure qualité de l'isolation.

2.6.4 *La forme d'onde*

Enfin, la forme d'onde des décharges partielles est utilisée pour en apprendre davantage sur la façon dont les décharges se développent et évoluent au fil du temps. Cette information peut aider à mieux comprendre les mécanismes sous-jacents à la défaillance de l'isolation et à élaborer des stratégies pour la prévenir.

2.7 Grandeurs de impulsions de décharge partielle

2.7.1 *Charge apparente q*

La charge d'une impulsion de DP est la charge qui, si elle était injectée en très peu de temps entre les bornes de l'objet à tester dans un circuit de test spécifié, donnerait la même lecture sur l'instrument de mesure que l'impulsion de courant de DP elle-même. La charge apparente est généralement exprimée en picocoulombs (pC) [17].

2.7.2 *Taux de répétition des impulsions n*

Rapport entre le nombre total d'impulsions DP enregistrées dans un intervalle de temps sélectionné et la durée de cet intervalle de temps.

2.7.3 *Fréquence de répétition des impulsions N*

Nombre d'impulsions de décharge partielle par seconde, dans le cas d'impulsions équidistantes.

2.7.4 *Angle de phase Φ_i et temps t_i d'apparition d'une impulsion DP*

La relation de l'angle de phase est :

$$\Phi_i = 360 (t_i/T) \dots (1)$$

Où t_i est le temps mesuré entre la transition positive précédente de la tension d'essai à zéro et l'impulsion de décharge partielle et T est la période de la tension d'essai L'angle de phase est exprimé en degrés ($^\circ$).

2.7.5 *Courant de décharge moyen I*

derived quantity and the sum of the absolute values of individual apparent charge magnitudes q_i during a chosen reference time interval T_{ref} divided by this time interval:

$$I = \frac{1}{T_{ref}} (|q_1| + |q_2| + |q_3| + \dots + |q_i|) \dots (2)$$

The average discharge current is generally expressed in coulombs per second (C/s) or in amperes (A).

2.7.6 *Puissance de décharge P*

Quantité dérivée qui est la puissance d'impulsion moyenne introduite dans les bornes de l'objet à tester en raison des amplitudes de charge apparentes q_i pendant un intervalle de temps de référence choisi T_{ref} :

$$P = \frac{1}{T_{ref}} (q_1 u_1 + q_2 u_2 + q_3 u_3 + \dots + q_i u_i) \dots (3)$$

Où u_1, u_2, \dots, u_i sont des valeurs instantanées de la tension d'essai aux instants d'apparition t_i des grandeurs de charge apparente individuelles q_i . Le signe des valeurs individuelles doit être respecté La puissance de décharge est généralement exprimée en watts (W).

2.8 Effet des décharges partielles dans la dégradation des matériaux isolants

La caractérisation électrique des décharges partielles (DP) est un aspect important de la compréhension de la dégradation et de la rupture diélectrique des isolants. Les défauts dans l'isolant peuvent entraîner l'apparition de DP, qui peuvent altérer les parois des cavités et contribuer à leur croissance, ce qui est considéré comme un processus de dégradation du matériau diélectrique. La rupture diélectrique, également appelée "claquage", peut être causée par les DP. Cependant, les mécanismes de vieillissement électrique dans les polymères sans défauts initiaux restent à identifier.

Les charges d'espace peuvent être liées à la formation de nano-cavités dans les isolants et les symptômes du vieillissement électrique [21]. Les nano-cavités peuvent déformer électromécaniquement le matériau et augmenter sa conductivité. Les impacts des charges d'espace et les recombinaisons de charges électriquement opposées peuvent aussi entraîner une reconfiguration de la structure moléculaire et la formation de nano-cavités qui peuvent s'élargir pour entretenir les DP [22]. Le vieillissement électrique peut donc mener à la dégradation du diélectrique et à l'apparition de DP. Les DP peuvent alors former un chemin préférentiel pour la propagation d'une arborescence électrique susceptible de provoquer la rupture diélectrique finale de l'isolant par percolation. Les différents processus peuvent se produire conjointement pendant la durée de vie de l'isolant.

La dégradation électrique se produit sur une période de temps plus courte que la durée de vie du câble, allant de quelques heures à quelques années [23]. Les principales sources de dégradation électrique des polymères utilisés dans les équipements haute tension sont les décharges partielles (DP), les arbres électriques et les arbres aquatiques. Si un DP n'entraîne pas immédiatement une défaillance de l'équipement, il provoque une dégradation au niveau microscopique, ce qui peut conduire à sa défaillance éventuelle après un certain niveau d'activité. Le mécanisme de dégradation provoqué par l'activité de décharge partielle est caractérisé par différentes étapes (Figure 2.4).

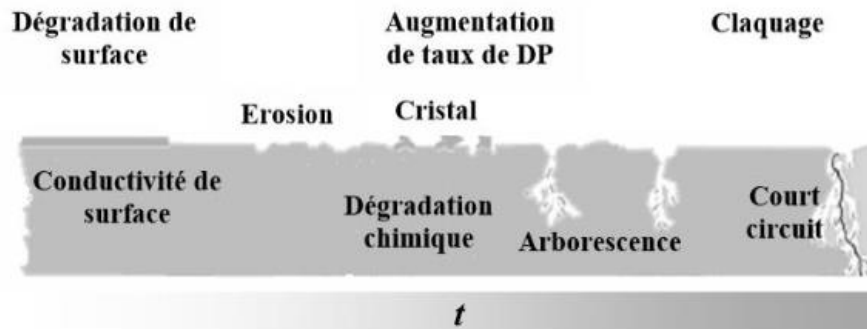


Figure 2.4 : Processus de dégradation provoqué par les DP, d'après [24].

Tableau 2.1 : Caractéristiques des phénomènes de rupture, dégradation et vieillissement, adapté de [25]

	Rupture	Dégradation	Vieillessement
<i>Effet</i>	Catastrophique : le matériau perd ses propriétés isolantes	Conduit à la rupture	Peut conduire à la dégradation
<i>Vitesse</i>	Très rapide $\gg 1s$	De quelques heures à plusieurs années, processus qui se renforce par lui même	Processus continu tout au long de la durée de vie de service
<i>Détection</i>	Observation directe, visible à l'œil nu : trou dans l'isolation	Observable directement par des techniques microscopiques	Difficile à observer et parfois à prouver
<i>Lieu</i>	Filament électrique continu entre les électrodes	Apparaît au niveau des défauts d'isolation	Se produit sur l'ensemble de l'isolation
<i>Taille</i>	$> mm$, comparable à l'épaisseur de l'isolant	$> \mu m$, mais pouvant former des structures plus larges	$> nm$, échelle moléculaire

2.9 Objectif de la mesure des décharges partielles

La mesure des décharges partielles (DP) est une méthode fiable et non intrusive qui peut être utilisée à tout moment pour diagnostiquer l'état de l'isolement des équipements électriques. La mesure de DP fournit des informations très précises pour aider à détecter efficacement les points faibles du système d'isolation.

Étant donné que l'activité de DP est souvent présente bien avant qu'un défaut d'isolement ne se produise, les gestionnaires d'équipement peuvent l'évaluer au fil du temps et prendre des décisions éclairées en matière de réparation ou de remplacement avant qu'une défaillance ne se produise. La détection des décharges partielles est donc essentielle pour assurer un fonctionnement fiable à long terme des équipements électriques.

L'intégrité de l'isolation des équipements moyenne et haute tension doit être confirmée par la mesure et l'analyse de DP lors du développement, de la fabrication, de la mise en service et, pour certains éléments, tout au long de la durée de vie de l'équipement, afin de garantir son bon état et son fonctionnement en toute sécurité, C'est ce que montre la figure 2.5.

Pendant l'exploitation, des décisions de maintenance stratégiques doivent être prises pour assurer une disponibilité maximale des équipements. La mesure et l'analyse périodiques de la DP fournissent les données nécessaires pour développer un plan de test ciblé et rentable tout en minimisant les temps d'arrêt inutiles pour maintenance.

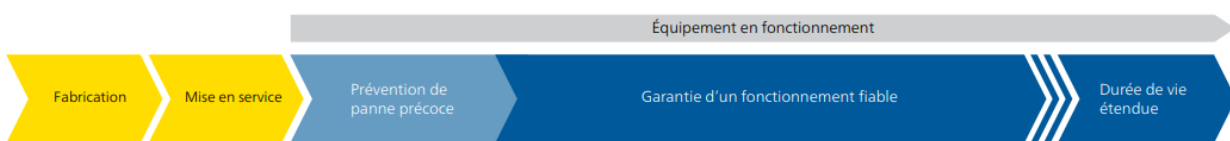


Figure 2.5 cycle de vie de l'équipement

2.10 Interprétation des mesures

Le diagnostic de l'isolation à l'aide de la mesure des décharges partielles est basé sur divers paramètres de mesure, dont les suivants :

- L'emplacement des décharges par rapport à la phase de la tension d'alimentation, comme avant les pics, sur les pics, ou près des zéros.
- La stabilité des décharges par rapport à la phase, telle que fixe, en mouvement régulier ou en mouvement aléatoire.
- La symétrie ou l'asymétrie des décharges apparaissant sur des cycles positifs et négatifs.
- Les variations de l'amplitude des décharges, qui peuvent dépendre de l'amplitude de la tension d'essai ou de la durée d'application de la tension. [26]

2.11 Méthodes de détection et de mesure des décharges partielles

2.11.1 La méthode acoustique

La méthode acoustique consiste à mesurer les ondes de pression acoustiques générées lors des activités de décharge partielle dans les transformateurs. Ces ondes de pression sont le résultat d'impacts moléculaires dans la zone de décharge. Lorsque les décharges se produisent dans des matériaux liquides, les explosions de bulles provoquent des variations de pression locales qui se combinent pour former des ondes acoustiques. Dans les matériaux solides, de petites explosions peuvent également entraîner des variations de la pression locale et la génération d'ondes acoustiques. La vitesse des ondes acoustiques dans l'huile de transformateur est affectée par la température de l'huile, les températures élevées entraînant une vitesse d'onde plus lente. La propagation des ondes acoustiques est sujette à l'atténuation, à la réflexion et au transfert de chaleur, ce qui rend la détection et l'interprétation des signaux acoustiques provenant de sources de décharge partielle complexes et souvent inexacts. La surveillance acoustique peut être effectuée à l'aide de capteurs acoustiques sur les parois des cuves de transformateurs ou à l'aide de capteurs à interféromètre à fibre optique à l'intérieur du transformateur pour détecter les DP. Cependant, les mesures ne sont pas toujours étalonnées efficacement.[26]

2.11.2 La méthode chimique

La méthode chimique (analyse des gaz dissous) consiste à analyser les gaz dissous dans l'huile d'un transformateur pour détecter les décharges partielles. Les décharges partielles entraînent une modification de la composition chimique de l'huile, qui se manifeste par des gaz générés par le défaut et des produits de dégradation de l'isolation. Les échantillons d'huile à analyser doivent être prélevés dans des conditions de laboratoire et l'analyse est complexe. L'analyse des gaz dissous est une technique simple et abordable pour la surveillance en ligne, et la

composition des gaz générés peut indiquer le niveau d'activité de décharge partielle dans le transformateur. Cependant, cette méthode ne fournit qu'une mesure globale de l'activité de décharge partielle, avec peu ou pas d'informations sur sa nature, son intensité, son étendue ou sa localisation.

2.11.3 Détection optique

Les décharges partielles sont accompagnées d'émissions de lumière ultraviolette et visible ; ce type de détection est basé sur la détection de ces émissions lumineuses. La détection des signaux lumineux émis par les DP peut être réalisée à l'aide d'un tube photomultiplicateur et d'une caméra rapide associée à un intensificateur d'image.

Cette technique présente de nombreux avantages par rapport aux autres méthodes, elle est beaucoup plus sensible et permet de détecter les décharges partielles sous des régimes de tension transitoires pour lesquels les mesures sont extrêmement difficiles. Cependant, elle ne permet pas de quantifier facilement les décharges détectées en termes de charges, par exemple. Enfin, cette technique ne permet pas de détecter les décharges partielles internes.

2.11.4 Détection électromagnétique

Les événements de décharge partielle émettent des ondes électromagnétiques lorsqu'ils se produisent. La signature électromagnétique de la décharge partielle a des composantes de fréquence radio, allant de 100 kHz à des centaines de MHz. Une façon de détecter ces décharges est d'utiliser des antennes UHF. L'avantage de l'utilisation d'antennes, en particulier dans le cas des enroulements de machines électriques, est que cette mesure est non intrusive, ce qui la rend adaptée à la surveillance en ligne. Cependant, il est difficile de quantifier l'activité de décharge en utilisant ce dispositif. D'autre part, l'emplacement des décharges partielles peut être déterminé grâce à l'utilisation d'antennes UHF directionnelles.

Ce type de détection est particulièrement utile dans le cas des alimentations électriques produisant du bruit à haute fréquence, comme les onduleurs commandés par MLI. Avec les méthodes de détection électrique traditionnelles, la commutation des composants électroniques peut masquer le signal de décharge partielle.

2.11.5 Détection électrique

Cette méthode est illustrée à la figure 2.6, qui consiste à connecter un condensateur de couplage sans décharge en parallèle avec l'objet à tester (noté C test à la figure 2.6). Ce condensateur de couplage haute tension (noté Ck) a une valeur généralement comprise entre 80 pF et 1 nF. Le terme "haute tension" est utilisé car le condensateur ne doit pas subir de décharges partielles dans la gamme de tension utilisée pour les tests. Lorsque des charges sont déplacées par un événement de décharge partielle au niveau de l'objet à tester, une chute de tension est induite aux bornes de l'objet à tester. Cette chute de tension transitoire est compensée par le condensateur Ck. Cette chute de tension est mesurée à l'aide de l'impédance de mesure Zm

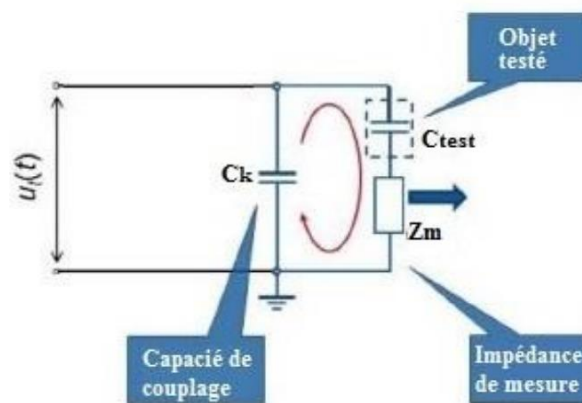


Figure 2.6 : schéma électrique d'un système de détection électrique.

2.12 Localisation des défauts dans les transformateurs

On a tenté ces dernières années de localiser les défauts potentiels des transformateurs de puissance en service en détectant les décharges partielles à l'aide de capteurs haute fréquence. Le principe adopté est celui du décalage temporel de l'instant de détection entre plusieurs capteurs répartis sur la cuve du transformateur (comme indiqué sur la figure 2.7). Ces décalages sont de l'ordre de quelques nanosecondes, ce qui correspond également à la durée d'une impulsion de type décharge partielle. Ainsi, des capteurs travaillant autour du gigahertz permettent de mesurer de tels signaux. Cependant, une localisation fiable des défauts basée sur ce principe se heurte à deux difficultés :

1. Le bruit haute fréquence que les capteurs reçoivent de diverses sources externes ou internes au transformateur.

2. La modélisation du chemin suivi par les signaux provenant des décharges partielles. Contrairement à ce que suggère la figure simplifiée, les signaux issus du défaut ne se propagent pas en ligne droite jusqu'au capteur : ils traversent différents composants du transformateur et peuvent être diffractés ou réfléchis sur certaines surfaces. De plus, les caractéristiques des matériaux dépendent de la température, qui évolue en fonction de l'état de charge du transformateur.

Cette technique fait actuellement l'objet de recherches avancées dans le cadre de la surveillance continue (monitoring) des composants du réseau électrique afin d'évaluer leur durée de vie restante et de planifier leur renouvellement de manière optimale

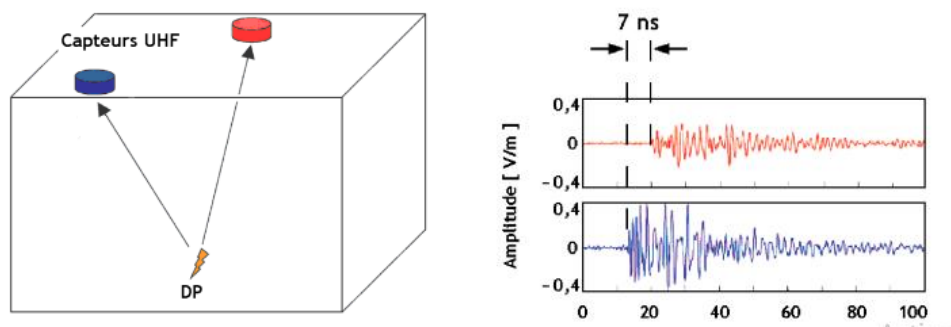


Figure 2.7 : Technique de localiser les défauts dans les transformateurs [27]

2.13 Conclusion

En conclusion, la décharge partielle est un aspect crucial dans l'énergie électrique, avec des conséquences potentielles dans la dégradation des matériaux isolants et la défaillance des équipements électriques. La mesure des décharges partielles est un objectif important pour évaluer la durée de vie des composants électriques et planifier leur renouvellement. Avec l'avancement des capteurs et des techniques à haute fréquence, la détection et la mesure des décharges partielles sont devenues plus réalisables et plus fiables. Cependant, la localisation des défauts dans les transformateurs reste un défi en raison du bruit à haute fréquence et du chemin de propagation complexe des signaux de décharge partielle.

Chapitre 3 :

simulation et
détection de
décharge partielles

3.1 Introduction

Ce chapitre vise à utiliser la simulation par COMSOL pour détecter avec précision la localisation des décharges partielles (DP) dans les transformateurs de puissance, ainsi que pour déterminer l'effet du changement d'emplacement des points de mesure. Les décharges partielles sont des phénomènes électriques localisés qui peuvent causer des dommages progressifs aux isolants des transformateurs. En utilisant COMSOL, nous serons en mesure de créer des modèles de simulation détaillés des transformateurs, en tenant compte de leur géométrie, des matériaux utilisés et des propriétés électriques. Nous pourrons ensuite analyser les schémas de distribution des décharges partielles à l'intérieur du transformateur et déterminer leur localisation précise. En variant les positions des points de mesure dans le modèle, nous pourrons également étudier l'effet du changement d'emplacement sur la détection des décharges partielles.

3.2 Présentation du logiciel COMSOL Multi-physiques :



Figure 3.1: COMSOL Multiphysics

Le logiciel COMSOL a été créé en 1986 par des étudiants de Germond DAHLQUIS, destiné à la simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis et qui permet de simuler de nombreux phénomènes physiques et applications en ingénierie. C'est un programme polyvalent en termes de :

Multi physiques, c'est-à-dire : touchant plusieurs domaines d'utilisation tels que Médecine, électromagnétisme, mécaniques des structures, électronique...etc.

2- Multiplateforme, c'est-à-dire : compatible avec plusieurs systèmes d'exploitation (mac. Unix...) [28].

Il existe plusieurs versions de ce logiciel, on cite :

COMSOL 5.3 • COMSOL 5.4 • COMSOL 5.5

Dans notre étude de la cellule solaire, nous avons utilisé la version 5.5 qui apporte un assez bon niveau de clarté à notre simulation.

3.2.1 Les avantages :

- Touche plusieurs domaines (électronique, électrotechnique, Médecine...).
- Étude 0D, 1D, 2D, 3D.
- Programmation directe.
- Utilise une interface graphique [28].

3.2.2 Les inconvénients :

- Nécessité de disposer d'un ordinateur puissant et performant (carte graphique, espace RAM...) [28].

3.2.3 Description de l'interface COMSOL :

Le logiciel COMSOL aide à organiser notre simulation en présentant un clair aperçu au modèle à tout moment. Il utilise la forme fonctionnelle, la structure et l'esthétique comme le moyen d'atteindre la simplicité pour la modélisation des réalités complexes [28].

Par exemple, des outils spécifiques à la tâche apparaissent sur le bureau à droite quand nous en avons besoin, montrant seulement ce qui est actuellement possible, ce qui élimine l'incertitude de la construction de modèles et apporte un certain ordre à nous simulation [28].

Le bureau est composé de plusieurs fenêtres, ce qui peut ou ne peut pas être affiché en fonction des besoins. Ces fenêtres comprennent le constructeur du modèle, Paramètres, graphiques, messages, Progrès, Aide et d'autres [28].

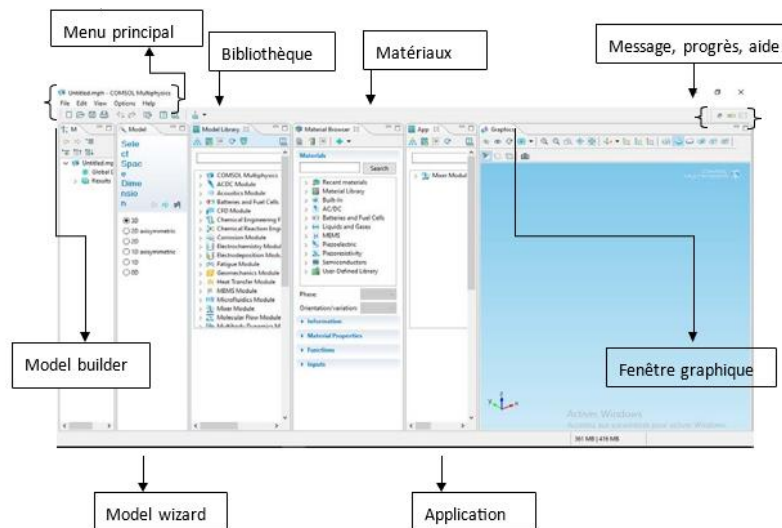


Figure 3.2 : L'interface de COMSOL

3.3 Objectif de ce chapitre

L'objectif de ce chapitre est de développer une méthode de simulation précise et efficace pour détecter et localiser les décharges partielles (DP) dans les transformateurs de puissance. Nous cherchons à atteindre les objectifs suivants :

- Développer un modèle de simulation 2D représentant la géométrie et les composants du transformateur, y compris l'huile d'isolation, l'acier ASAI 4340 et le papier Presspahn.
- Modéliser les mécanismes physiques des décharges partielles, y compris la formation d'arcs électriques, les ondes acoustiques générées et les effets sur les matériaux isolants.
- Utiliser COMSOL Multiphysics pour simuler les décharges partielles et étudier leur distribution spatiale à l'intérieur du transformateur, en tenant compte des propriétés électriques, thermiques et mécaniques des matériaux.
- Développer des techniques de détection et de localisation des décharges partielles basées sur l'analyse des ondes acoustiques générées, en utilisant des sondes de mesure placées à des emplacements stratégiques sur la paroi externe du transformateur.

- Étudier l'effet du changement d'emplacement des points de mesure sur la détection et la localisation des décharges partielles, en évaluant la sensibilité et la précision de la méthode proposée.

3.4 Modèle de simulation COMSOL

3.4.1 Modèle mathématique

Dans l'analyse classique de la pression acoustique, le matériau utilisé est supposé sans perte et adiabatique, dit isentropique. De plus, la densité de tout le matériau et la vitesse du son à l'intérieur peuvent être constantes et isotropes. Ainsi, les équations qui décrivent la propagation du son sont dérivées de l'équation directrice de l'écoulement des fluides. L'équation d'onde pour les ondes sonores comme :

$$\frac{1}{\rho c^2} \times \frac{a^2 p}{at^2} + \nabla \left(-\frac{1}{p} (\nabla^2 p - q_d) \right) = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (1)$$

Où la combinaison de ρc^2 est appelée module de compressibilité, en unité SI de N/m². q_d est la source du domaine dipolaire et Qm représente la source du domaine monopôle. Pour la source acoustique PD, une source de domaine monopôle à point unique est utilisée, pour émuler l'événement PD à point unique à l'intérieur du transformateur. Il peut être exprimé comme ci-dessous :

$$Qm = A_{exp}(-pi.f^2 * (t - z)^2) \quad (2)$$

Où A est l'amplitude de l'impulsion, f est la bande de fréquence de l'impulsion [Hz] et τ est le décalage temporel pour le pic de l'impulsion [s]

Où $A=1$, f la fréquence qui est fixée à 100 kHz, τ le temps qui produit le maximum d'énergie. La figure 3.3 montre le spectre associé de l'impulsion gaussienne.

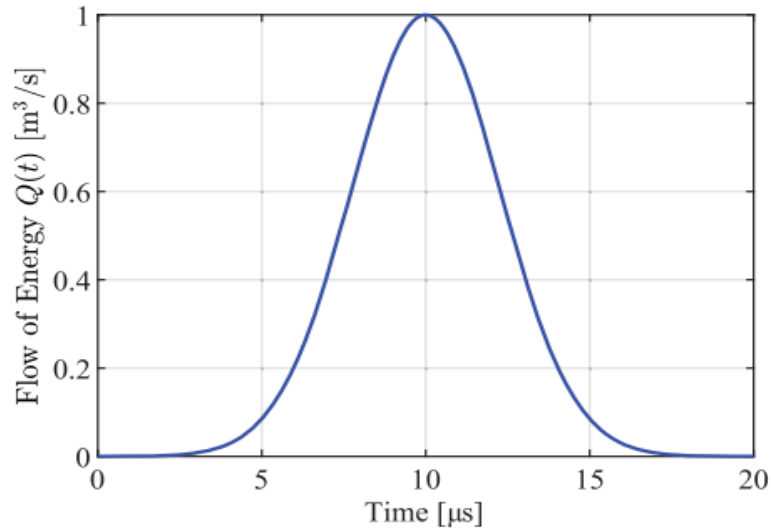


Figure 3.3: Signal acoustique de décharge partielle

3.4.2 Model de la cuve du transformateur

La cuve du transformateur est modélisée dans COMSOL Multiphysics. La cuve du transformateur est représentée par un réservoir de dimensions $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, comprenant une paroi en acier d'une épaisseur de 0,1 mm et une couche de papier Presspahn d'une épaisseur de 0,01 mm, rempli d'huile d'isolation. Afin de simuler l'onde acoustique générée par une décharge partielle, une source ponctuelle est placée à l'intérieur du réservoir d'huile. Cette source acoustique modélisée représente la décharge partielle. Trois sondes de mesure sont positionnées sur la paroi externe de la cuve en acier pour enregistrer la pression acoustique. Ces sondes agissent comme des capteurs acoustiques, permettant de mesurer la pression acoustique induite par la décharge partielle. La géométrie de la cuve du transformateur modèle est illustrée à la Figure 2.

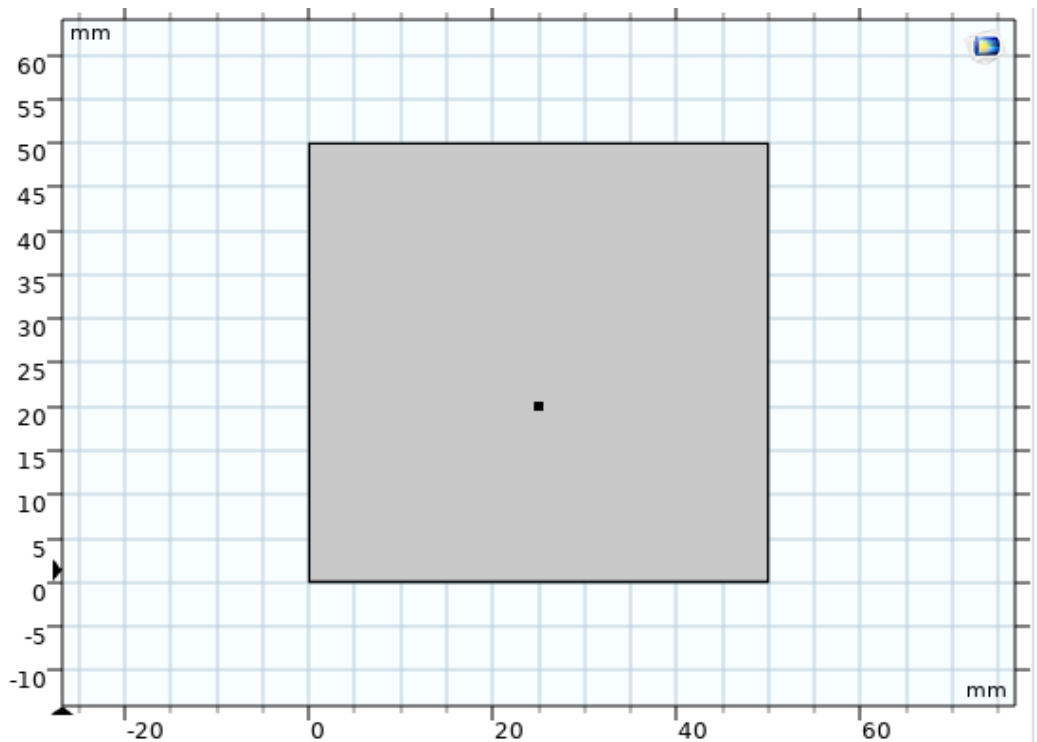


Figure 3.4: Géométrie du modèle de réservoir de transformateur

3.4.3 Matériaux

Dans cette section, nous examinerons les propriétés spécifiques de trois matériaux couramment utilisés dans les transformateurs de puissance : l'huile d'isolation, l'acier ASAI 4340 et le papier Presspahn.

Tableau 3.1 : propriétés des matériaux [29]

Matériaux	Densité (kg/m^3)	Vitesse du son (m/s)
Huile d'isolation	1.204	343
Acier ASAI 4340	7850	5850
Papier Presspahn	1250	1257

L'huile d'isolation est largement utilisée comme matériau diélectrique dans les transformateurs. Elle présente une excellente résistance électrique, une bonne stabilité thermique et une grande capacité d'isolation. L'huile d'isolation offre également des propriétés de refroidissement

efficaces, ce qui contribue à maintenir une température optimale à l'intérieur du transformateur. Dans la simulation des décharges partielles, il est crucial de tenir compte des caractéristiques électriques et thermiques de l'huile d'isolation afin de mieux comprendre son rôle dans la prévention des défaillances.

L'acier ASAI 4340 est utilisé dans les parties structurelles des transformateurs de puissance pour assurer une résistance mécanique élevée. Cet acier allié présente une combinaison de résistance, de ténacité et de dureté, ce qui lui confère une excellente capacité à supporter les charges mécaniques et les contraintes environnementales. Dans la simulation, il est important de prendre en compte les propriétés mécaniques de l'acier ASAI 4340 pour évaluer la résistance structurelle du transformateur face aux décharges partielles.

Le papier Presspahn est un matériau isolant largement utilisé pour l'isolation électrique entre les enroulements des transformateurs. Il offre une excellente résistance diélectrique, une bonne isolation thermique et une grande flexibilité pour s'adapter aux formes et dimensions des enroulements. Lors de la simulation des décharges partielles, il est essentiel de tenir compte des propriétés électriques et mécaniques du papier Presspahn pour évaluer son rôle dans la prévention des arcs électriques et l'isolation entre les enroulements.

En prenant en compte les caractéristiques spécifiques de l'huile d'isolation, de l'acier ASAI 4340 et du papier Presspahn, nous serons en mesure d'effectuer des simulations plus précises et réalistes des décharges partielles dans les transformateurs de puissance. Cela nous permettra de mieux comprendre leur impact sur les performances du transformateur et de développer des stratégies d'optimisation pour garantir un fonctionnement fiable et efficace.

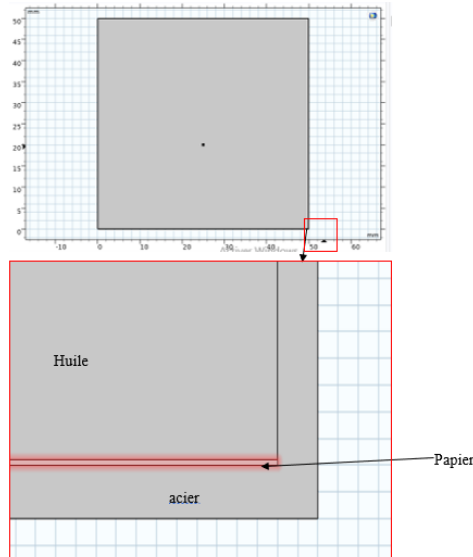


Figure 3.5: les matériaux du modèle de transformateur

3.4.4 Conditions aux limites

La condition aux limites d'impédance est appliquée sur la surface extérieure du réservoir en acier

$$n \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla p \right) + \frac{1}{Z} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

Une condition aux limites de continuité est appliquée par défaut par la multiphysique COMSOL. Il n'est pas nécessaire de donner une condition aux limites à l'interface des deux matériaux. Il sera traité automatiquement par COMSOL.

3.4.5 Maillage

Les éléments en forme de triangle d'ordre de La grange quadratique ont été utilisés pour le maillage de toute la géométrie. Pour bien résoudre la propagation de l'onde acoustique dans le transformateur, un minimum de 5 à 6 mailles par longueur d'onde (à la fréquence maximale) est nécessaire lors de l'utilisation d'éléments de Lagrange quadratiques. La taille de maille maximale est calculée par :

$$h_{max} = \frac{\lambda_{min}}{N} = \frac{c_{min}}{f_{max}N} \quad (4)$$

Où h_{max} est la taille maximale des éléments de maillage, λ_{min} est la longueur d'onde minimale calculée à la fréquence maximale f_{max} et à la vitesse minimale du son c_{min} , et N est le nombre d'éléments par longueur d'onde. Si nous prenons $f_{max} = 100 \text{ kHz}$, $c_{min} = 343 \text{ m/s}$, $N = 6$, la taille maximale du maillage de $h_{max} = 0,572 \text{ mm}$ est prise pour le maillage du modèle. Le maillage complet se compose de 57036 éléments de domaine et 4132 éléments de frontière. Le modèle est résolu pour le nombre de degrés de liberté 598632.

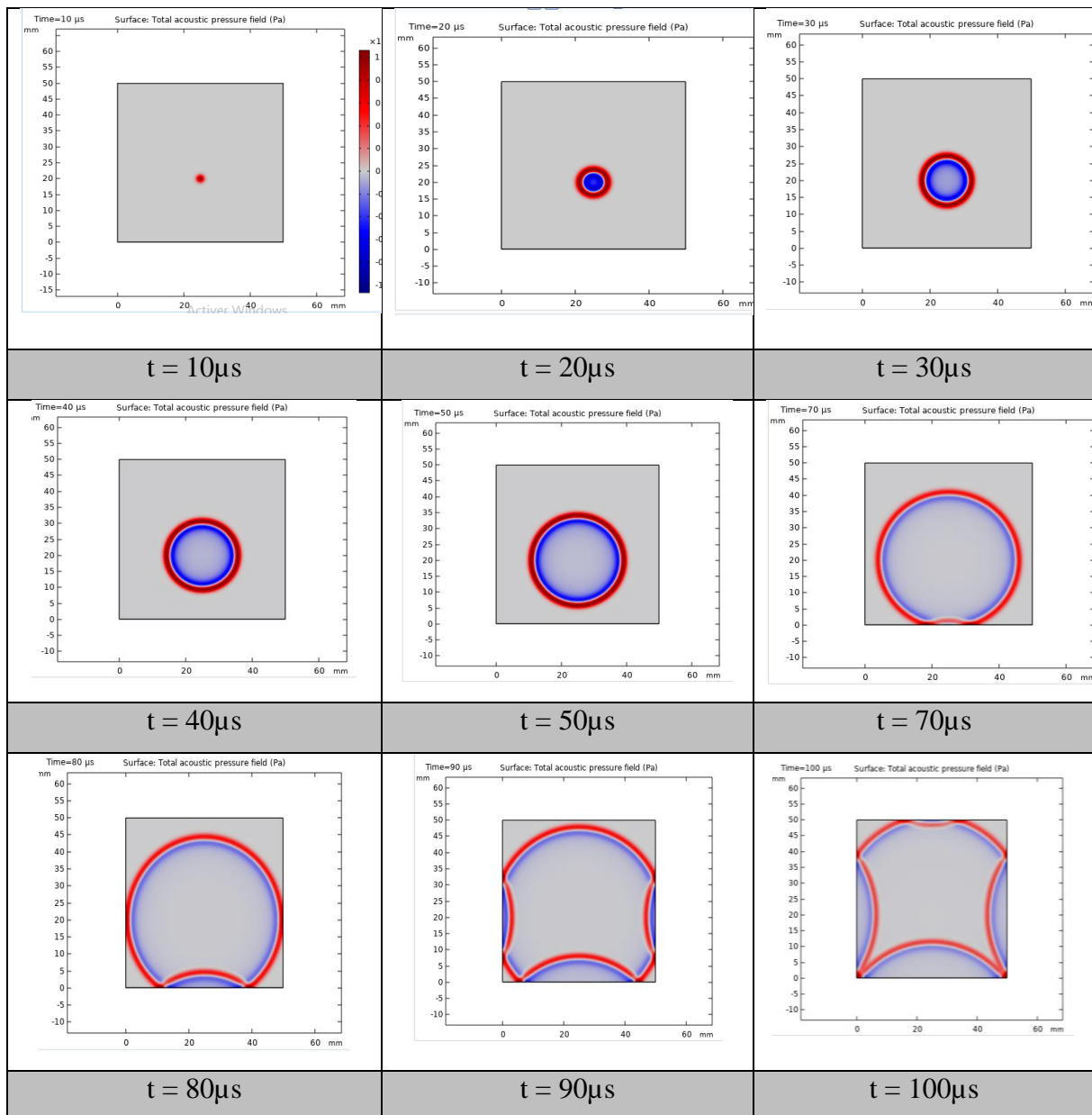
3.5 Les résultats :

L'objectif principal de la simulation est de déterminer la pression générée par le PD à travers l'huile et le papier. La résolution des équations de propagation nous a conduit à utiliser le module de pression acoustique de COMSOL Multiphasiques, sur un intervalle de temps compris entre 0 et 100 μ s. Cette variation du point de mesure permettra de mieux caractériser les signatures de décharge (amplitude, position de la décharge.) et de réaliser des tests visant à localiser les décharges partielles.

3.5.1 La propagation de l'onde acoustique

Nous présentons dans tableau 3.2 ci-dessous les résultats obtenus à partir de la propagation de l'onde acoustique émise par la décharge partielle dans l'huile.

Tableau 3.2 : Répartition de la pression acoustique dans un modèle de transformateur



L'onde de pression acoustique due à la source PD se propage avec un front d'onde sphérique dans l'espace. Sa distribution dans une cuve de transformateur modèle à différents instants t

après l'apparition de la DP, illustrée au tableau 2. On observe à partir du tableau 2 que lorsque l'onde de pression acoustique s'éloigne de la source PD, l'amplitude de l'onde de pression diminue parce que l'amplitude de l'onde sphérique est inversement proportionnelle au rayon du front d'onde. Lorsque l'onde de pression acoustique atteint la surface intérieure du réservoir en acier, la réflexion de l'onde se produit en raison d'un changement d'impédance acoustique de l'air à l'acier. Dans cette simulation, lorsque l'acoustique est directe.

3.5.2 Les signaux

Les résultats de ces essais pour déterminer les instants d'arrivée des signaux pour la détermination des positions de DP, les temps d'arrivée sont regroupés dans le tableau 3. Les figures 3.6.a 3.6.b et 3.6.c montrent les signaux mesurés dans le premier essai (essai 1.1) par les trois capteurs de pression pour une acoustique onde voyageant dans l'huile et papier. Sur toutes les figures, on peut voir une impulsion de forte intensité en pression et des temps d'arrivée de l'ordre d'une centaine de microsecondes. On voit que ce temps d'arrivée dépend de la position du capteur.

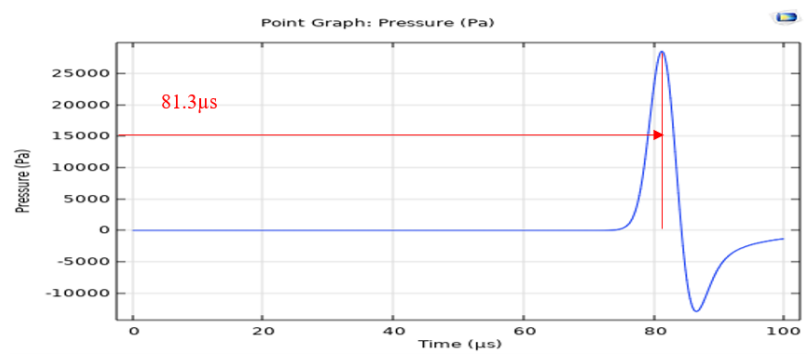


Figure 3.6.a : Signal de pression acoustique mesuré par capteur 1 (0,20)

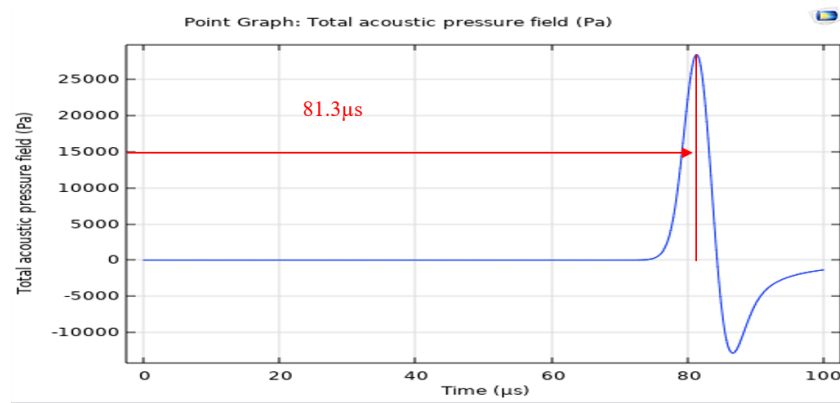


Figure 3.6.b : Signal de pression acoustique mesuré par capteur 2 (10,0)

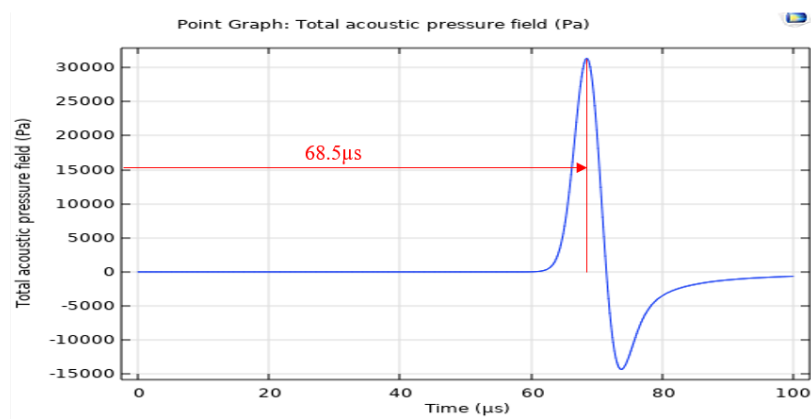


Figure 3.6.c : Signal de pression acoustique mesuré par capteur 3 (30, 0)

3.5.3 Les calculs

Soit r_i la distance entre un capteur i et la décharge partielle de coordonnées x, y .

$$r_i = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \quad (5)$$

Les équations algébriques non linéaires pour calculer la distance entre la source de DP et chaque capteur peuvent s'écrire :

$$(x_{pd} - x_1)^2 + (y_{pd} - y_1)^2 = r_1^2 \quad (6)$$

$$(x_{pd} - x_2)^2 + (y_{pd} - y_2)^2 = r_2^2 \quad (7)$$

$$(x_{pd} - x_3)^2 + (y_{pd} - y_3)^2 = r_3^2 \quad (8)$$

Distance : $r_1 = (v_s \times t_1)$, $r_2 = (v_s \times t_2)$ et $r_3 = (v_s \times t_3)$

Où (x_{pd}, y_{pd}) sont les coordonnées inconnues de la source DP (x_i, y_i) sont les coordonnées connues des trois capteurs pour $i = 1, 1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2$ et 2.3 et r_1, r_2, r_3 sont des distances connues entre l'emplacement de la source de DP et le capteur 1, le capteur 2, le capteur 3 respectivement ; T1, T2, T3, sont le TOA (Le temps d'arrivée) du premier pic du signal de pression acoustique au capteur 1, capteur 2, capteur 3 respectivement, et v_s est la vitesse de l'onde acoustique dans l'Huile ($v_s=343$ m/s). L'emplacement de la source de DP est le point d'intersection des trois équations algébriques non linéaires (6) à (8).

Ces équations algébriques non linéaires sont généralement résolues par une méthode itérative. La solution de la méthode itérative dépend de la supposition initiale. Mais ces équations algébriques non linéaires peuvent être résolues en les transformant en équations algébriques linéaires.

En soustrayant (7) et (8) de (6) on obtient les deux équations linéaires (9) et (10)

$$2x_{pd}(x_2 - x_1) + 2y_{pd}(y_2 - y_1) + (x_1 - x_2 + y_1 - y_2) = r_1 - r_2 \quad (9)$$

$$2x_{pd}(x_3 - x_1) + 2y_{pd}(y_3 - y_1) + (x_1 - x_3 + y_1 - y_3) = r_1 - r_3 \quad (10)$$

Les équations (8) et (9) peuvent être écrites sous la forme matricielle pour résoudre x_{pd} et y_{pd} est donnée par :

$$X = A^{-1}b \quad (11)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_{pd} \\ y_{pd} \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) \\ (x_3 - x_1) & (y_3 - y_1) \end{bmatrix}$$

$$b = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_1 - r_2 - (x_1 - x_2 + y_1 - y_2) \\ r_1 - r_3 - (x_1 - x_3 + y_1 - y_3) \end{bmatrix}$$

Les coordonnées XY de la source PD peuvent être déterminées à l'aide de l'équation (11), qui fournit une méthode non itérative qui ne nécessite pas d'estimation initiale. Afin de calculer l'emplacement de la source PD à l'aide de cette méthode, les positions des trois capteurs et le temps d'arrivée mesuré (TOA) des signaux de pression acoustique à ces capteurs sont obtenus. L'emplacement réel de la source PD et l'emplacement calculé de la source PD à l'aide de l'équation (11) sont comparés, et l'erreur d'emplacement en centimètres et le pourcentage d'erreur sont présentés dans le tableau 5. L'erreur d'emplacement et l'erreur en pourcentage à la fois dans l'emplacement réel (x, y) et l'emplacement calculé (xcal, ycal) sont déterminés à l'aide des équations (12) et (13) respectivement.

$$\text{Erreur de localisation} = \sqrt{(x - x_{cal})^2 + (y - y_{cal})^2} \quad (12)$$

$$\text{pourcentage d'erreur} = \frac{\text{erreur de localisation}}{\text{diagonale du réservoir}} \times 100 \quad (13)$$

$$\text{diagonale du réservoir} = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

Où X est la longueur et Y est la largeur du réservoir en cm

3.5.4 Les résultats de détection

Trios simulation avec des point de mesure différent ont été effectués sur charge partielle placées à deux endroits différents, La source PD et les trois positions des capteurs sont placés comme indiqué sur le tableau 3.3.

La réponse des 3 capteurs à l'onde acoustique du DP sera affichée pour chaque test. Les résultats de ces tests pour la détermination des temps d'arrivée des signaux sont présentés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.3 : Les positions des trois capteurs pour les deux simulations.

Simulation	Positions	Capteur 1 (x ₁ , y ₁)	Capteur 2 (x ₂ , y ₂)	Capteur 3 (x ₃ , y ₃)
Simulation 1	Position 1.1	(00,20)	(10,00)	(30,00)
	Position 1.2	(00,20)	(30,00)	(50,20)

DP (25,20)	Positon 1.3	(00,25)	(25,00)	(25,50)
Simulation 2	Positon 2.1	(50,20)	(35,50)	(40,50)
	Positon 2.2	(50,45)	(50,15)	(27,50)
DP (35,30)	Positon 2.3	(50,30)	(35,50)	(25,50)

Pour trouver l'emplacement de la source DP, un TOA du premier pic du signal de pression acoustique à différents capteurs de la source PD est mesuré comme indiqué sur le tableau 3.4.

Tableau 3.4 : La tempe d'arrivée pour les trois capteurs

Postions	T1 μ s	T2 μ s	T3 μ s
Positon 1.1	81.3	81.3	68.5
Positon 1.2	81.3	81.3	81.3
Positon 1.3	82.7	66.7	95.8
Positon 2.1	61	66.7	68.5
Positon 2.2	70.3	70.3	71.2
Positon 2.3	52.2	66.7	73.6

Tableau 3.5 : Localisation calculée de la source PD

Postions	Emplacement calculée	Erreur d'emplacement (mm)	Pourcentage d'erreur (%)
Positon 1.1	(25.6396, 20.3198)	0.7155	1.01%
Positon 1.2	(25,20)	0	0%
Positon 1.3	(25.0612, 19.4367)	0.5635	0.8%
Positon 2.1	(34.6369, 29.6412)	0.731	1,03%
Positon 2.2	(35.0214, 30)	0	0%

Positon 2.3	(35.6946, 29.8251)	0.7163	1 %
-------------	--------------------	--------	-----

Les résultats obtenus sont extrêmement satisfaisants, avec une erreur de localisation maximale de seulement 0,731 mm (soit 1,03 %) d'après les données présentées dans le tableau 5. Ces résultats confirment la validité du modèle de simulation COMSOL développé pour le réservoir du transformateur modèle. De plus, il convient de noter que le meilleur résultat est obtenu lorsque $T1 = T2 = T3$, comme c'est le cas pour les scénarios 1.2 et 2.2, où l'erreur de localisation est nulle. Ces constatations démontrent la précision et la fiabilité de la méthode de simulation utilisée, ainsi que l'importance de la position équilibrée des capteurs pour une localisation optimale des décharges partielles.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre a présenté une méthode de simulation basée sur le logiciel COMSOL pour détecter et localiser avec précision les décharges partielles dans les transformateurs de puissance. Le modèle de simulation développé a pris en compte les différentes composantes du transformateur, telles que l'huile d'isolation, l'acier ASAI 4340 et le papier Presspahn. Les résultats obtenus ont montré une excellente corrélation avec les positions des capteurs (les points de mesure) et l'errer.

L'erreur de localisation maximale était inférieure à 1,03 %, démontrant une grande précision dans la détection et la localisation des DP. L'analyse a également souligné l'importance de l'emplacement des capteurs pour des résultats optimaux.

Dans le chapitre suivant, nous utilisons les observations que nous avons acquises dans ce chapitre pour créer une application qui calcule avec précision l'emplacement de DP et donne des emplacements de mesure recommandés pour une plus grande précision.

Chapitre 4 :

Création d'un logiciel pour la localisation précise des décharges partielles

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous concevons et implémentons une application Qt en C++ qui se focalise sur la localisation des décharges partielles dans les transformateurs. Notre objectif est d'exploiter les résultats et les formules obtenus dans le chapitre précédent pour créer une solution efficace et conviviale pour cette tâche.

Nous proposons le développement d'un logiciel qui utilisera les données issues de la simulation par le logiciel COMSOL du chapitre précédent pour localiser les décharges partielles dans les transformateurs. Ce faisant, nous visons à fournir une solution pratique et automatisée qui réduit les calculs manuels et leurs erreurs.

4.2 Cahier des charges

Le présent document établit le cahier des charges pour le développement d'un logiciel de localisation des décharges partielles dans les transformateurs. L'objectif de ce logiciel est de fournir une interface conviviale et efficace permettant la détection des décharges partielles et l'analyse des données générées par COMSOL.

4.2.1 *Objectifs du logiciel :*

Le logiciel de localisation des décharges partielles dans les transformateurs doit remplir les objectifs suivants :

4.2.1.1 *Détection précise des décharges partielles*

Le logiciel doit être capable de détecter les décharges partielles de manière précise et fiable, en utilisant les données d'entrée fournies par la simulation (chapitre 4.3) ou les capteurs appropriés.

4.2.1.2 *Localisation des décharges partielles*

Le logiciel doit être capable de localiser les décharges partielles détectées dans le transformateur, en identifiant les zones spécifiques où les décharges se produisent.

4.2.1.3 *Interface utilisateur conviviale*

Le logiciel doit offrir une interface graphique conviviale et intuitive, facilitant la navigation, l'analyse des données et la configuration des paramètres.

4.2.1.4 Gestion des données

Le logiciel doit permettre de stocker et de gérer efficacement les données de décharge partielle, en permettant l'accès aux enregistrements précédents et en facilitant leur analyse comparative.

4.2.1.5 Visualisations

Le logiciel doit permettre de générer des visualisations graphiques pour faciliter l'interprétation des résultats et la prise de décision.

4.2.2 Spécifications techniques :

Les spécifications techniques suivantes doivent être prises en compte lors du développement du logiciel :

4.2.2.1 Langage de programmation

Le logiciel sera développé en utilisant le langage C++ et la bibliothèque Qt pour assurer la portabilité et la convivialité de l'interface utilisateur.

4.2.2.2 Compatibilité des systèmes d'exploitation

Le logiciel sera compatible avec les systèmes d'exploitation couramment utilisés, tels que Windows, macOS et Linux.

4.2.2.3 Acquisition de données

Le logiciel sera capable de recevoir et d'interpréter les données provenant de capteurs de décharge partielle connectés au transformateur.

4.2.2.4 Algorithmes de traitement des données

Le logiciel utilisera des algorithmes pour le traitement et l'analyse des données de décharge partielle, afin d'optimiser la précision de la localisation.

4.2.2.5 Sécurité des données :

Le logiciel garantira la confidentialité et l'intégrité des données en mettant en place des mesures de sécurité appropriées, telles que l'authentification et le chiffrement.

4.3 Étapes de développement :

Le développement du logiciel de localisation des décharges partielles dans les transformateurs suivra les étapes suivantes :

4.3.1 Conception de l'architecture logicielle

Une architecture logicielle appropriée sera conçue, en identifiant les modules et les fonctionnalités clés du logiciel.

4.3.2 Implémentation et programmation

Le logiciel sera développé en suivant les bonnes pratiques de programmation, en utilisant le langage C++ et la bibliothèque Qt.

4.3.3 Tests et validation

Des tests rigoureux seront effectués pour vérifier la fiabilité, la précision et la convivialité du logiciel. Des scénarios de tests complets seront créés pour couvrir différents cas d'utilisation.

4.4 Les outils

4.4.1 Langage de programmation C++

Le C++ est un langage de programmation compilé qui permet de programmer sous de multiples paradigmes, dont la programmation procédurale, la programmation orientée objet et la programmation générique. Le C++ est le descendant du langage C, mais il propose de nouvelles fonctionnalités qui enrichissent et simplifient la programmation, comme les classes, les modèles, les exceptions, les espaces de noms, etc. Le C++ est un langage très utilisé dans le secteur des jeux vidéo, des logiciels embarqués, des systèmes d'exploitation et des applications

graphiques. Le C++ est un langage performant, flexible et portable, mais aussi complexe et exigeant. Pour programmer en C++, il faut utiliser un compilateur qui traduit le code source en code exécutable par la machine. Il existe plusieurs compilateurs C++ pour différents systèmes d'exploitation, comme GCC, Clang, Visual Studio C++.... Le C++ dispose également d'une bibliothèque standard qui fournit des structures de données, des algorithmes, des fonctions mathématiques, des entrées/sorties et d'autres utilitaires. [29]

C++ est un langage polyvalent et performant. Sa puissance, sa flexibilité et sa compatibilité avec les bibliothèques existantes ont été des facteurs déterminants dans notre choix.

4.4.2 *Le framework Qt :*

Qt est un framework de développement d'applications multiplateformes qui utilise le langage C++ comme langage de base [31]. Qt permet de créer des interfaces graphiques, des applications réseau, des applications multimédia, des applications embarquées et bien d'autres types d'applications [31]. Qt fournit une bibliothèque de classes C++ modulaires et intuitives, ainsi qu'un langage déclaratif appelé QML pour créer des interfaces dynamiques et personnalisées. Qt propose également des outils de conception, de développement, de test, d'optimisation et d'analyse pour faciliter et accélérer le cycle de vie du logiciel. Qt est un framework open source qui peut être utilisé gratuitement sous certaines conditions, ou sous licence commerciale pour plus de flexibilité [31]. Qt est compatible avec plusieurs systèmes d'exploitation, comme Windows, Linux, macOS, Android, iOS, etc2. Qt est un framework puissant, performant et portable qui offre de nombreuses possibilités aux développeurs C++.

Il est livré avec les différents outils de développement :

Qt Creator : C'est l'IDE dédié à Qt. Son éditeur de texte offre les principales fonctions que sont la coloration syntaxique, le complètement automatique, l'indentation, etc. Qt Creator intègre en son sein les outils Qt Designer et Qt Assistant. Une explication plus complète de cet outil est donnée plus bas.

Qt Designer : C'est un outil graphique de conception de GUI, il permet d'accélérer le développement d'application ou de diviser le travail en deux en réservant cet outil aux concepteurs de GUI et le l'implémentation du code aux développeurs. Il enregistre les fichiers avec l'extension .ui.

4.4.3 CMake

CMake est un outil de génération de systèmes de compilation qui permet de contrôler le processus de compilation du logiciel en utilisant des fichiers de configuration simples et indépendants de la plateforme et du compilateur. CMake peut générer des fichiers Makefile ou des espaces de travail natifs qui peuvent être utilisés dans l'environnement de compilation de votre choix. CMake est un outil open source et multiplateforme qui est utilisé pour construire, tester et empaqueter des logiciels. CMake simplifie la gestion des projets complexes et multiplateformes en permettant de décrire comment compiler le projet à l'aide d'informations comme le langage utilisé, les fichiers à compiler, les dépendances, etc. [32]

4.4.4 GitHub

GitHub est une plateforme de développement collaboratif qui permet d'héberger, de partager et de gérer des projets logiciels en utilisant le système de contrôle de version Git. GitHub offre des fonctionnalités comme la gestion des issues, des pull requests, des revues de code, des wikis, des actions, ... [33]. GitHub est un service web qui peut être utilisé gratuitement pour les projets publics ou sous abonnement pour les projets privés. GitHub est également une communauté de développeurs qui contribuent à des projets open source ou créent leurs propres projets. GitHub est une plateforme populaire et influente qui facilite la collaboration et l'innovation dans le domaine du logiciel.

Référentiel GitHub de ce projet : [github.com /saberhammouche/Partial-Discharge-Source-Locator/](https://github.com/saberhammouche/Partial-Discharge-Source-Locator/)

4.5 Architecture et composants de l'application

4.5.1 Interface graphique :

L'interface utilisateur comporte les composants statiques suivants :

1. **Barre d'outils** : La barre d'outils est un élément graphique qui permet un accès rapide aux fonctionnalités couramment utilisées de l'application. Elle contient généralement des icônes ou des boutons représentant des actions telles que sauvegarder, ouvrir ... et d'autres opérations pertinentes comme le montre la figure 4.1. La barre d'outils améliore

l'expérience utilisateur en offrant un accès pratique et intuitif aux tâches fréquemment effectuées.

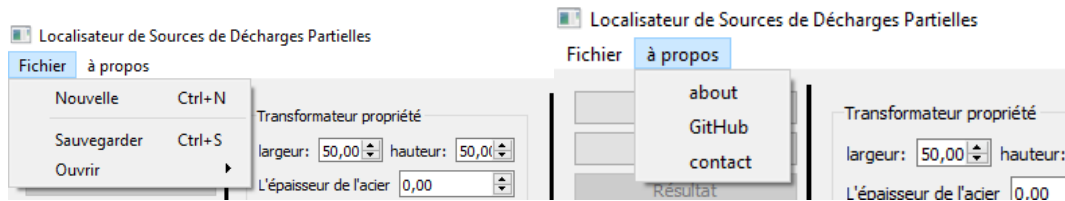


Figure 4.1: La barre d'outils

- 2. Barre de Menu :** La barre de menu est une barre vertical située en gouache de la fenêtre de l'application. Elle contient une 3 bouton pour navigue dans les déférant page (Propriété, Donnée et Résultat). La barre de menu organise les fonctionnalités de l'application en 3 catégories logiques, permettant aux utilisateurs de naviguer et d'accéder facilement aux différentes fonctionnalités.

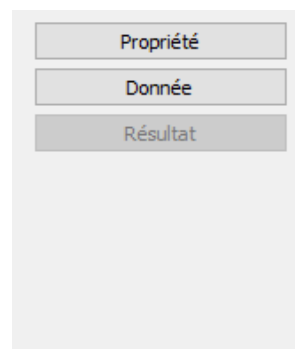


Figure 4.2: Barre de Menu

- 3. Barre d'État :** La barre d'état est une barre horizontale située en bas de la fenêtre de l'application. Elle fournit des informations sur l'état actuel ou le contexte de l'application. Cela peut inclure l'affichage de messages, des indicateurs de progression ou des notifications système importantes. La barre d'état permet aux utilisateurs de rester informés sur les processus en cours et fournit des retours sur les activités de l'application. Dans notre logiciel affiche le nom du fichier ouvert
- 4. Widget de Gestion des Fichiers :** Dans notre application, nous incluons un widget spécifique pour la gestion des fichiers, permettant aux utilisateurs d'ouvrir et de supprimer des fichiers. Ce widget offre une fonctionnalité essentielle pour manipuler les données associées aux décharges partielles dans les transformateurs.

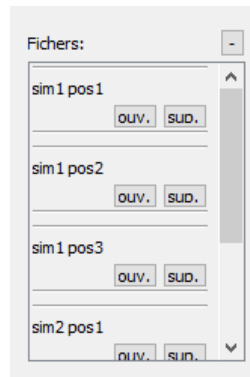


Figure 4.3: Widget de Gestion des Fichiers

4.5.2 Les pages de logiciel

Le logiciel dispose de trois pages principales qui sont accessibles par la barre de menu. Chaque page correspond à une étape du processus de localisation des décharges partielles dans les transformateurs :

4.5.2.1 Page de propreté de transformateur :

La page de propreté de transformateur est dédiée à la collecte et à l'affichage des données relatives à l'état de propreté du transformateur. Les utilisateurs peuvent saisir et enregistrer des informations concernant la propreté (Figure 4.4), telles que la hauteur, la largeur les position des capteurs et les matériaux d'isolement. Les utilisateurs peuvent également visualiser et modifier les informations enregistrées.

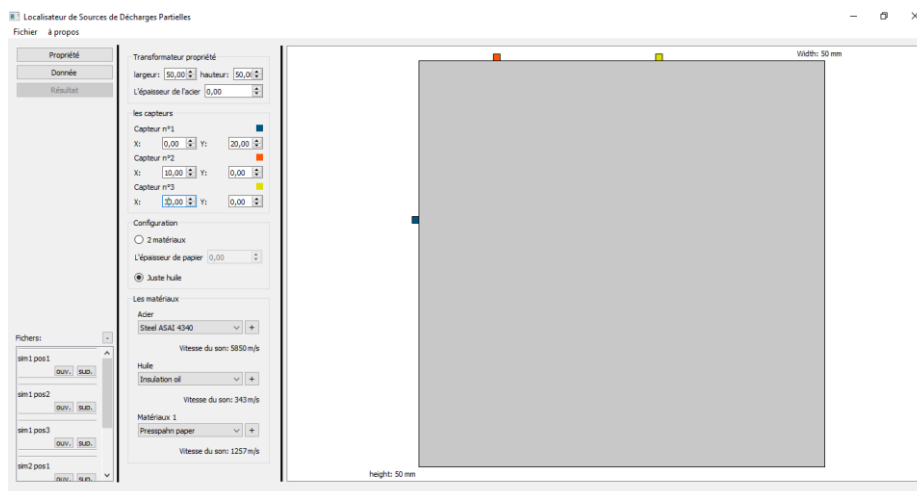


Figure 4.4: la page d'insertion propreté de transformateur

4.5.2.2 Page d'insertion de données :

La page d'insertion des données permet de saisir les données nécessaires pour la simulation et l'analyse des signaux de décharges partielles. Elle contient 3 champs pour entrer les données des capteurs, Les utilisateurs peuvent importer des fichiers de données à partir de sources externes. Cette page peut inclure des fonctionnalités telles que la sélection de fichiers à partir du système de fichiers, la validation des données d'entrée et la vérification de la conformité aux formats requis, et visualiser les données ou forme d'un graphe ou un tableau.

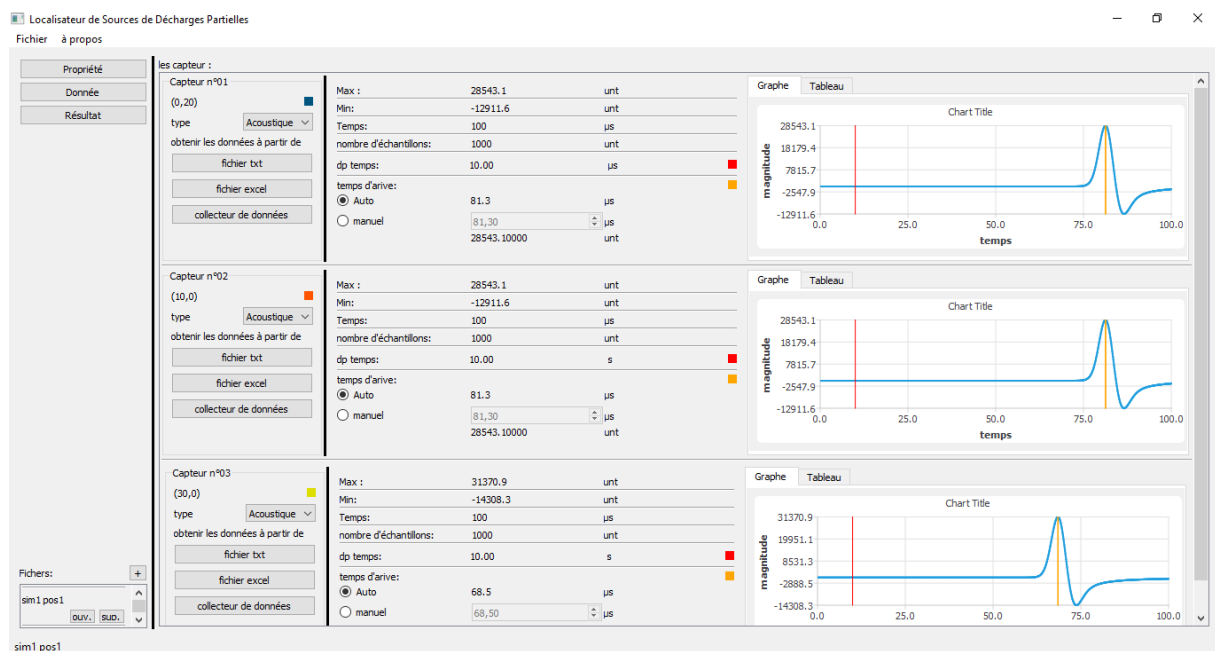


Figure 4.5: Page d'insertion de données.

Comme le montre Figure 4.5 lors de l'analyse des données de localisation des décharges partielles, plusieurs indicateurs sont calculés pour évaluer et caractériser les résultats obtenus. Ces indicateurs fournissent des informations essentielles sur les décharges partielles détectées et aident à évaluer la qualité de la localisation. Voici quelques détails sur les indicateurs couramment utilisés :

1. **Maximum (Max) et Minimum (Min)** : L'indicateur de maximum (Max) représente la valeur maximale de la décharge partielle détectée lors de la mesure. Il indique l'amplitude maximale du signal associé à la décharge partielle. D'autre part, l'indicateur

de minimum (Min) représente la valeur minimale du signal enregistré. Ces indicateurs permettent de déterminer l'intensité et l'étendue des décharges partielles détectées.

2. **Temps de mesure** : Le temps de mesure fait référence à la durée pendant laquelle les décharges partielles sont enregistrées. Il peut être utilisé pour évaluer la stabilité des décharges partielles au fil du temps. Une mesure plus longue peut fournir une meilleure représentation des décharges partielles et aider à identifier les variations temporaires dans les résultats.
3. **Nombre d'échantillons** : Le nombre d'échantillons représente la quantité de données enregistrées pendant la mesure des décharges partielles. Un nombre élevé d'échantillons permet d'obtenir une meilleure résolution temporelle et d'analyser plus en détail le comportement des décharges partielles. Cela peut contribuer à une localisation plus précise.
4. **Temps de décharge partielle** : Le temps de décharge partielle est un indicateur qui représente la durée pendant laquelle la décharge partielle s'est produite.

Ces indicateurs font partie des paramètres calculés lors de l'analyse des données de localisation des décharges partielles. Ils fournissent des informations quantitatives importantes sur les propriétés des décharges partielles détectées, ce qui permet d'évaluer et localiser la décharge partielle dans les transformateurs.

4.5.2.3 La page d'affichage des résultats

Comme la figure 4.6 montre, la page d'affichage des résultats présente les résultats de localisation des décharges partielles obtenus (X_{pd} , Y_{pd}) à partir des données analysées. Cette page offre des visualisations adaptées au modèle simulé, facilitant ainsi la compréhension et l'interprétation claire et concise des résultats. De plus, elle permet le calcul de l'erreur si l'emplacement réel est saisi, et affiche la méthode de résolution graphique utilisée. La page propose également des positions de mesure pour réduire l'erreur et d'optimiser la précision de la localisation des décharges partielles.

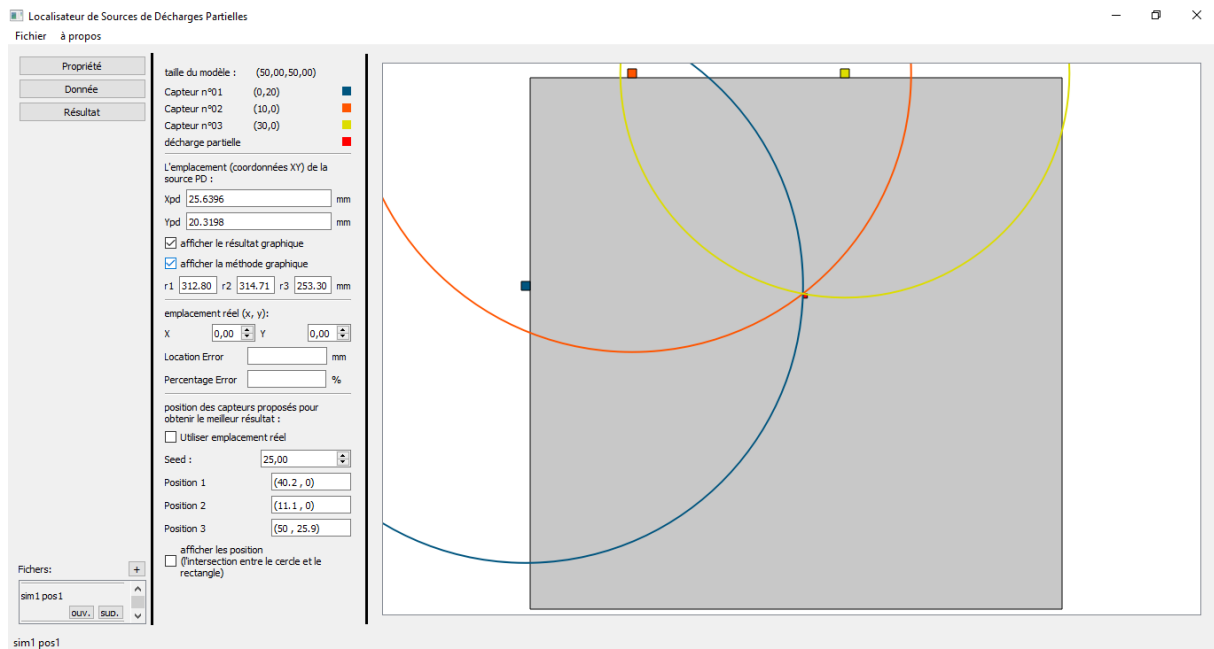


Figure 4.6 : La page d'affichage des résultats

4.6 Algorithme

4.6.1 Méthode de localisation :

La méthode de localisation employée dans l'application vise à déterminer les coordonnées spatiales (Xpd, Ypd) des décharges partielles au sein du transformateur. La méthode utilise une approche mathématique basée sur les principes des calculs matriciels, Les équations utilisées sont les mêmes que celles données au chapitre 3.

La méthode de localisation commence par collecter des données d'entrée, y compris les mesures des distances r_1 , r_2 et r_3 , qui sont calculées en fonction de paramètres spécifiques tels que le matériau pétrolier sélectionné et les valeurs correspondantes de l'interface utilisateur. Ces distances représentent les distances entre les points de mesure et les emplacements potentiels de décharge partielle dans le transformateur.

Ensuite, la méthode construit une matrice 2×2 , A , qui capture les positions relatives des points de mesure en fonction de leurs coordonnées x et y . Les éléments de la matrice A sont déterminés sur la base des valeurs fournies par l'utilisateur à partir de l'interface utilisateur.

La méthode construit également une matrice 1×2 , b , qui représente le côté droit du système d'équations linéaires. Les éléments de la matrice b sont calculés à partir des distances r_1 , r_2 et r_3 , ainsi que des coordonnées x et y des points de mesure.

Pour obtenir les coordonnées localisées, la méthode calcule l'inverse de la matrice A , notée a_inv . L'inverse est calculé si le déterminant de la matrice A est non nul, garantissant que la matrice est inversible. Si le déterminant est zéro, indiquant une matrice non inversible, la méthode gère ce scénario de manière appropriée.

Enfin, le procédé effectue une multiplication matricielle en multipliant la matrice inverse a_inv par la matrice b , ce qui donne une matrice 1×2 , qui représente les coordonnées localisées (X_{pd} , Y_{pd}) des décharges partielles dans le transformateur.

En utilisant cette approche basée sur la matrice, la méthode de localisation dérive efficacement les coordonnées spatiales des décharges partielles sur la base des données d'entrée fournies, permettant l'identification et la compréhension précises de leurs emplacements dans le transformateur. (Annex 1)

4.6.2 Méthode de localisation :

Après avoir expérimenté différentes coordonnées de mesure dans le chapitre précédent, nous avons constaté que les points de mesure qui ont la même distance avec le point de décharge partielle se révèlent être les positions les plus appropriées. Dans le but de faciliter cette recherche, nous avons développé un code spécifique.

Ce code crée un cercle virtuel autour du point de décharge partielle calculé, avec un rayon variable défini par l'utilisateur ($seed$). En utilisant ce cercle, le code identifie les points de mesure qui se trouvent sur l'intersection entre le cercle et le model de transformateur. Ces points de mesure, ayant une distance égale au rayon du cercle par rapport au point de décharge partielle, sont considérés comme de bonnes positions de mesure.

En proposant ces points de mesure basés sur la distance égale, nous offrons à l'utilisateur une méthode pratique pour sélectionner des positions de mesure appropriées. Cela permet de concentrer les mesures aux endroits les plus pertinents, augmentant ainsi la probabilité de détecter et de localiser précisément les décharges partielles. (Annex 2)

4.7 Validation :

La dernière étape du processus est la validation des résultats de localisation des décharges partielles obtenus. Cette étape est essentielle pour garantir l'exactitude et la fiabilité des informations fournies par l'application.

Tableau 4.1 : la différence entre les positions calculée Manuellement et par logiciel

Position de décharge Partielle :	Position des capteurs C1, C2 et C3	Position calculée (Manuellement)	Position générée (Logiciel)	Différence
(25,20)	(00,20) (10,00) (30,00)	(25.6, 20.3)	(25.6396, 20.3198)	0
	(00,20)(30,00) (50,20)	(25,20)	(25,20)	0
	(00,25)(25,00) (25,50)	(25.0, 19.4)	(25.0612, 19.4367)	0

Les résultats de localisation obtenus sont extrêmement satisfaisants, avec une différence nulle entre la position calculée par le logiciel et la position générée. Cela montre la précision et la fiabilité de l'application dans la détermination des coordonnées des décharges partielles et c'est ce que montre dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Une étude comparative pour évalue la précision et de la fiabilité de logiciel pour la détermination des coordonnées des décharges partielles.

Position de décharge Partielle :	Position des capteurs C1, C2 et C3		Position génère (Logiciel)	Pourcentage d'erreur (%)	Erreur d'emplacement (mm)
(25,20)	Aléatoire	(00,20) (10,00) (30,00)	(25.6396, 20.3198)	1.011	0.715
	Proposé par le logiciel	(00,20)(30,00) (50,20)	(25,20)	0	0
L'amélioration			(0.63,0.31)	1.011	0.715
(35,30)	Aléatoire	(50,20) (35,50) (40,50)	(34.6, 29.6)	0.722	0.510
	Proposé par le logiciel	(50,45) (50,15) (27,50)	(35.02,30)	0.030	0.021
L'amélioration			(0.58,0.4)	0,692	0,489

Le deuxième tableau présente une analyse comparative de la précision de la localisation du point de décharge partielle en une point de mesure aléatoire et des points suggérés par le logiciel. Nous avons évalué l'impact des points de mesure suggérés par le logiciel sur la précision globale de la localisation.

Les résultats sont très encourageants, mettant en évidence une amélioration significative de la précision lorsque les points de mesure proposés par le logiciel sont utilisés. En comparant les différences entre les positions aléatoire et les positions générées, il est clair que l'utilisation des points de mesure suggérés conduit à une réduction notable des écarts.

4.8 Conclusion

En conclusion, ce chapitre présente la création de logiciel avec une méthode avancée de simplifier et améliorer localisation décharges partielles, basée sur des calculs matriciels et des points de mesure alternatifs. Les résultats obtenus ont démontré une précision et une fiabilité élevées, avec une différence nulle entre les positions calculées et générées.

Cette méthode permet aux utilisateurs de mieux comprendre la distribution des décharges partielles et d'optimiser les mesures correctives pour améliorer la fiabilité du système. En utilisant les points de mesure proposés par le logiciel, une amélioration significative de la précision de la localisation a été observée. Cette fonctionnalité offre des opportunités d'amélioration continue et d'optimisation des performances du transformateur.

Conclusion générale

Cette étude approfondie sur la détection et la localisation des décharges partielles dans les transformateurs de puissance a permis d'acquérir des connaissances précieuses et de développer des solutions pratiques pour améliorer la fiabilité et les performances de ces équipements essentiels dans les réseaux électriques.

Tout d'abord, les décharges partielles se révèlent être une préoccupation majeure pour les transformateurs de puissance, car elles peuvent causer des dommages à l'isolation et entraîner des défaillances potentielles. Une détection et une localisation précises des décharges partielles sont essentielles pour prévenir les pannes et garantir le bon fonctionnement des transformateurs.

La simulation par le logiciel COMSOL a été utilisée avec succès pour étudier le comportement des décharges partielles à l'intérieur des transformateurs. En développant des modèles de simulation détaillés, il a été possible d'analyser les schémas de distribution des décharges partielles et de mieux comprendre leur impact sur les performances du transformateur.

En outre, une application logicielle a été développée pour simplifier et automatiser la détection et la localisation des décharges partielles. Cette application a permis de réduire les calculs manuels et de fournir des emplacements de mesure recommandés, facilitant ainsi le processus de détection et permettant une meilleure optimisation des mesures correctives.

L'optimisation de l'emplacement des capteurs s'est avérée cruciale pour obtenir des résultats précis dans la détection et la localisation des décharges partielles. En prenant en compte les propriétés géométriques et électriques du transformateur, il a été possible d'identifier les positions optimales des capteurs pour une détection optimale.

En conclusion, cette recherche a contribué à une meilleure compréhension des décharges partielles dans les transformateurs de puissance et a proposé des solutions pratiques pour leur détection et leur localisation précises. Les résultats obtenus ouvrent la voie à des améliorations significatives en termes de fiabilité, de performances, renforçant ainsi l'efficacité et la stabilité des réseaux électriques.

Ce travail offre également une base solide pour de futures recherches et développements visant à améliorer davantage la détection et la surveillance des décharges partielles dans les transformateurs de puissance. En combinant les connaissances acquises avec les avancées technologiques, il est possible d'optimiser continuellement la détection et la prévention des défaillances, assurant ainsi un fonctionnement fiable et durable des transformateurs de puissance.

Annexes

Annex 1 :

```

QGenericMatrix<1, 2, double> MainWindow::calculateDP()
{
    // Calculate the values of r1, r2, and r3
    double r1 = huileMap.value(ui->materiauxHuile->currentText())
                * ui->label_dv->text().toDouble() / 1000;
    double r2 = huileMap.value(ui->materiauxHuile->currentText())
                * ui->label_dv_2->text().toDouble() / 1000;
    double r3 = huileMap.value(ui->materiauxHuile->currentText())
                * ui->label_dv_3->text().toDouble() / 1000;

    // Create matrices for calculations
    QGenericMatrix<2, 2, double> A;
    QGenericMatrix<1, 2, double> b;
    QGenericMatrix<2, 2, double> a_inv;

    // Fill matrix A with values
    A(0, 0) = ui->doubleSpinBox_cx2->value() - ui->doubleSpinBox_cx1->value();
    A(0, 1) = ui->doubleSpinBox_cy2->value() - ui->doubleSpinBox_cy1->value();
    A(1, 0) = ui->doubleSpinBox_cx3->value() - ui->doubleSpinBox_cx1->value();
    A(1, 1) = ui->doubleSpinBox_cy3->value() - ui->doubleSpinBox_cy1->value();

    // Calculate values for matrix b
    b(0, 0) = 0.5 * (pow(r1, 2) - pow(r2, 2) - (pow(ui->doubleSpinBox_cx1->value(), 2)
                - pow(ui->doubleSpinBox_cx2->value(), 2)
                + pow(ui->doubleSpinBox_cy1->value(), 2)
                - pow(ui->doubleSpinBox_cy2->value(),
2)))
    b(1, 0) = 0.5 * (pow(r1, 2) - pow(r3, 2) - (pow(ui->doubleSpinBox_cx1->value(), 2)
                - pow(ui->doubleSpinBox_cx3->value(), 2)
                + pow(ui->doubleSpinBox_cy1->value(), 2)
                - pow(ui->doubleSpinBox_cy3->value(),
2)))
    // Calculate the determinant of matrix A
    double det = A(0, 0) * A(1, 1) - A(0, 1) * A(1, 0);

    // Check if the determinant is not zero to proceed with calculations
    if (det != 0) {
        // Calculate the inverse of matrix A
        a_inv(0, 0) = A(1, 1);
        a_inv(0, 1) = -A(0, 1);
        a_inv(1, 0) = -A(1, 0);
        a_inv(1, 1) = A(0, 0);
        a_inv /= det;
    } else {
        // Handle the case when the matrix is not invertible
    }

    // Perform the matrix multiplication to calculate the result
    QGenericMatrix<1, 2, double> result = a_inv * b;

    // Return the calculated result
    return result;
}

```

Annex 2 :

```

QVector<QPointF> MainWindow::findCircleRectangleIntersection(QPointF circleCenter, qreal circleRadius,
QRectF square) {

    // Create an empty QVector to store the intersection points
    QVector<QPointF> intersections;

    //left  $(x-a)^2+(y-b)^2 = r^2$   $y = \text{square.left}()$ 
    //  $x^2 + a^2 - 2xa + (y-b)^2 = r^2$ 
    QPair<double,double>sol = solve_quadratic(1,-2*circleCenter.x(),
                                            pow(circleCenter.x(),2)
                                            +pow((square.left()-circleCenter.y()),2)
                                            pow(circleRadius,2));
    if(sol.first >= square.top() && sol.first <= square.bottom())
        intersections.append(QPointF(round_up(sol.first,1),round_up(square.left(),1)));
    if(sol.second >= square.top() && sol.second <= square.bottom() && sol.first != sol.second)
        intersections.append(QPointF(round_up(sol.second,1), round_up(square.left(),1)));

    //right  $(x-a)^2+(y-b)^2 = r^2$  |  $y = \text{square.right}()$ 
    //  $x^2 + a^2 - 2xa + (y-b)^2 = r^2$ 
    sol = solve_quadratic(1,-2*circleCenter.x(),
                        pow(circleCenter.x(),2)
                        +pow((square.right()-circleCenter.y()),2)-pow(circleRadius,2));
    if(sol.first >= square.top() && sol.first <= square.bottom())
        intersections.append(QPointF(round_up(sol.first,1),round_up(square.right(),1)));
    if(sol.second >= square.top() && sol.second <= square.bottom() && sol.first != sol.second)
        intersections.append(QPointF(round_up(sol.second,1),round_up(square.right(),1)));

    //top  $(x-a)^2+(y-b)^2 = r^2$  |  $x = \text{square.top}()$ 
    //  $(\text{square.top}()-a)^2 + y^2 + b^2 - 2yb = r^2 \Rightarrow y^2 - 2by$ 
    sol = solve_quadratic(1,-2*circleCenter.y(),
                        pow(circleCenter.y(),2)
                        +pow((square.top()-circleCenter.x()),2)-pow(circleRadius,2));
    if(sol.first >= square.left() && sol.first <= square.right())
        intersections.append(QPointF(round_up(square.top(),1), round_up(sol.first,1)));
    if(sol.second >= square.left() && sol.second <= square.right() && sol.first != sol.second)
        intersections.append(QPointF(round_up(square.top(),1), round_up(sol.second,1)));

    //bottom  $(x-a)^2+(y-b)^2 = r^2$  |  $x = \text{square.bottom}()$ 
    //  $(\text{square.top}()-a)^2 + y^2 + b^2 - 2yb = r^2 \Rightarrow y^2 - 2by + b^2 + (\text{square.top}()-a)^2 - r^2 = 0$ 
    sol = solve_quadratic(1,-2*circleCenter.y(),
                        pow(circleCenter.y(),2)
                        +pow((square.bottom()-circleCenter.x()),2)-pow(circleRadius,2));
    if(sol.first >= square.left() && sol.first <= square.right())
        intersections.append(QPointF(round_up(square.bottom(),1),round_up(sol.first,1) ));
    if(sol.second >= square.left() && sol.second <= square.right() && sol.first != sol.second)
        intersections.append(QPointF(round_up(square.bottom(),1), round_up(sol.second,1)));
    //QDebug() << sol.first << sol.second << square.top() << square.bottom();
    // Return the QVector of intersection points
    return intersections;
}

```

Bibliographie

- [1] : Omicron electronics 'FRAnalyzer Manuel d'utilisation' Référence –VESD0662 Version du manuel : FRA.FR, 2006.
- [2] : Sonelgaz DEPT GRTE formation sur le diagnostic des transformateurs de puissance « Méthodes de diagnostic de transformateur E. cottens janvier 2008 ».
- [3] : Document SONELGAZ « Ecole technique de Blida les transformateurs de puissance ».
- [4] : Support de cours, « TECHNOLOGIES DES EQUIPEMENTS ELECTRIQUES HTB DES POSTES ».
- [6] : A. A. Halacsy, « Transformer Invented 75 Years Ago », IEEE Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 80, n° 3, avril 1961, p. 121-125.
- [7] : Pauwels international service « formation générale sur les transformateurs de puissance GRTE octobre 2008 ».
- [8] : T. Nakata ;N. Takahashi ;Y. Kawase « magnetic performance of step-lap joints in distribution transformer cores » IEEE Transactions On Magnetics, Vol. Mag-18, No. 6, November 1982.
- [9] : Pauwels international service « formation générale sur les transformateurs de puissance GRTE octobre 2008 ».
- [10] : Mr ZELLAGUI Mohamed, « Etude protection des réseaux électriques mt 30& 10 kv », mémoire de magister université de Constantine. Juillet 2010.
- [11] : Christophe Ferrier. « Étude des huiles et des mélanges à base d'huile minérale pour transformateurs de puissances-recherche d'un mélange optimal ». Thèse de doctorat, L'école centrale de Lyon (Année 2005).
- [12] : T.Noda, H. Nakamoto, S.Yokoyama, «Accurate Modeling of Core-Type Distribution Transformers for Electromagnetic Transient Studies», IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, October 2002.

- [13] : Jean Sanchez, « Aide au diagnostic des défauts des transformateurs de puissance » université Grenoble alpes, 2011.
- [14] : Abdelkebir Amir, Saadi Nassim, « Application de la logique floue pour le diagnostic des transformateurs de puissance par analyse des gaz dissous », Mémoire de master, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Boumerdes, Juin 2017.
- [15] : MEZARI Naouel, « Diagnostic des transformateurs de puissances », Mémoire de magister, département d'électrotechnique, Université de Tizi Ouzou. Juillet 2011
- [16] : Tenue des transformateurs en cas de défauts internes, Raux / Leconte / Gibert, CIRE89.
- [17] D. Nattrass, "Partial discharge. XVII. The early history of partial discharge research", Electrical Insulation Magazine, IEEE, Vol. 9, Iss. 4, pp. 27-31, 1993.
- [18] : F. H. Kreuger, E. Gulski, and a. Krivda, "Classification of partial discharges," IEEE Trans. Electr. Insul., vol. 28, no. 6, pp. 917-931, 1993.
- [19] : M. G. Danikas and T. Tanaka, "Nanocomposites - A review of electrical treeing and breakdown," IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 25, no. 4, pp. 19-25, 2009
- [20] : Tahar Seghier Thèse Doctorat "Étude des décharges partielles et leurs influences sur l'apparition des arborescences dans la couche isolante des câbles haute tension " Février 2011
- [21] : Olivier Gallot-Lavallée. « Etude de la charge d'espace et des phénomènes luminescents comme précurseurs du vieillissement électrique d'une résine époxy utilisée dans l'isolation haute tension », Matériaux. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2004. Français. fftel-00010051f.
- [22] : Jonscher AK and Lacoste R (1984), « On a Cumulative Model of Dielectric Breakdown in Solids », IEEE Transactions on Electrical Insulation., dec, 1984. Vol. {EI}-19(6), pp. 567-577. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- [23] : L. A. Dissado et J. C. Fothergill, « Electrical degradation and breakdown in polymers », Edition Peter Peregrinus Ltd, 1992.

[24] : Temmen K (2000), « Evaluation of surface changes in flat cavities due to ageing by means of phase-angle resolved partial discharge measurement », Journal of Physics D : Applied Physics., mar, 2000. Vol. 33(6), pp. 603-608. IOP Publishing.

[25] : Fothergill JC (2007), « Ageing, Space Charge and Nanodielectrics : Ten Things We Don't Know About Dielectrics », In 2007 IEEE International Conference on Solid Dielectrics., jul, 2007. IEEE.

[26] : H. Lama la-Rivera, C. Maci'a-Sanahuja and J. A. Garcia-Souto, "Detection and wavelet analysis of partial discharges using an optical fibre interferometric sensor for high-power"

[27] : Martin D. Judd, Li Yang, Ian B. B. Hunter, Partial Discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensors, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 21 n°2 (mars/avril 2005) pp. 5-14.

[28] : BOULGHEB ABDELAZIZ, KROUM AMINE, Initiation à l'utilisation du logiciel de simulation COMSOL Application à la structure MOS, Mémoire présenté pour l'obtention du Diplôme de Master en Electronique, Université de JIJEL, Promotion 2015 / 2016.

[29] : V. B. Rathod, G. B. Kumbhar and B. R. Bhalja, "Simulation of Partial Discharge Acoustic Wave Propagation Using COMSOL Multiphysics and Its Localization in a Model Transformer Tank," 2020 21st National Power Systems Conference (NPSC), 2020, pp. 1-6,

[30] : « The C++ Programming language » - Bjarne Stroustrup (VF dispo)

[31] : Pages de la documentation Qt <https://doc.qt.io/> le 14/06/2023

[32] : Pages de la documentation CMake <https://cmake.org/> le 14/06/2023

[33] : GitHub. <https://github.com/> le 14/06/2023