

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Electromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : filière Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par : - Hadji Amir

- Bencheik Rayane

Sujet

Analyse fréquentielle des courants qui accompagnent
la propagation des décharges surfaciques

Soutenu publiquement, le 28/06/2026, devant le jury composé de :

Mr Bennia Abderazak	Univ-BBA	Président
Mr Zaidi Elyazid	Univ-BBA	Examineur
Mr Reffas Abderrahime	Univ-BBA	Encadrant

Année Universitaire 2025/2026

Résumé :

Ce projet de fin d'études vise à différencier les états de l'isolation mixte papier/huile des transformateurs de puissance à partir de l'analyse des courants associés aux décharges surfaciques. Face aux limites de l'analyse temporelle classique, une chaîne de classification intelligente est implémentée, combinant traitement avancé du signal et apprentissage automatique. La fréquence du pic issu de la transformée de Fourier rapide (FFT) et l'énergie du signal dans le domaine fréquentiel, obtenue par transformée en ondelettes discrète (DWT), sont utilisées comme variables d'entrée d'un classificateur Random Forest. Testée sur deux configurations de l'isolation mixte papier/huile, cette approche atteint une précision de 100 % et montre que l'énergie du signal est le paramètre le plus discriminant.

Mots clés : Transformateur, Décharges surfaciques, Courants, Huiles, FFT, DWT, Random forest.

Abstract:

This project aims to differentiate the states of the paper/oil mixed insulation in power transformers based on the analysis of currents associated with surface discharges. Faced with the limitations of classical time-domain analysis for processing short, non-stationary impulse currents, an intelligent classification chain combining advanced signal processing and machine learning is implemented. The frequency peak derived from the Fast Fourier Transform (FFT) and the signal energy in the frequency domain obtained via the Discrete Wavelet Transform (DWT) are used as input features for a Random Forest classifier. Tested on two configurations of the paper/oil mixed insulation, this approach achieves 100% accuracy and demonstrates that signal energy is the most discriminating parameter.

Keywords: Transformer, Surface Discharges, Currents, Oils, FFT, DWT, Random Forest.

ملخص :

يهدف هذا المشروع إلى التمييز بين حالات العزل المختلط (ورق/زيت) في محولات القدرة الكهربائية بناءً على تحليل التيارات المرتبطة بالتفريغ السطحي. أمام محدودية التحليل الزمني التقليدي في معالجة هذه التيارات النبضية القصيرة وغير المستقرة، تم تطوير سلسلة تصنيف ذكية تجمع بين المعالجة المتقدمة للإشارات وتعلم الآلة. تم استخدام تردد القمة المستخرج من تحويل فورييه السريع (FFT) وطاقة الإشارة في المجال الترددي التي تم الحصول عليها عن طريق تحويل الموجات المتقطع (DWT) كمداخلات لمصنف Random Forest. عند اختبار هذا النهج على تركيبين مختلفين للعزل المختلط (ورق/زيت)، تم تحقيق دقة 100%، كما أظهرت النتائج أن طاقة الإشارة هي المعيار الأكثر قدرة على التمييز بين الحالات المختلفة.

الكلمات مفتاحية : المحول الكهربائي، التفريغات السطحية، التيارات الكهربائية، الزيوت العازلة، تحويل فورييه السريع، التحويل الموجي المتقطع، الغابة العشوائية.

Dédicaces

À Gaza,

Terre meurtrie, symbole de résistance et de courage.

À toutes les âmes innocentes perdues dans l'injustice,

Que ce modeste travail soit un hommage à leur mémoire.

Pour la Palestine libre.

Remerciements

Tout d'abord, nous rendons louage et gratitude à Allah, Le Tout-Puissant, Le Clément, Le Miséricordieux, qui nous a guidés sur le droit chemin et nous a accordé, par Sa grâce infinie, la force, la patience, le courage et la volonté d'accomplir ce travail jusqu'à son terme.

A notre éminent encadrant, l'enseignant Abderrahim Reffas. Nous tenons à lui exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements pour avoir dirigé ce travail. Il n'a jamais ménagé ses efforts pour nous guider par ses précieuses orientations, ses conseils avisés et sa grande patience tout au long de la préparation de ce mémoire. Son soutien scientifique et méthodologique a eu un impact majeur dans la concrétisation de ce travail.

Aux honorables membres du jury, Nous adressons nos plus vifs remerciements et notre haute considération aux enseignants qui ont accepté d'évaluer, de discuter et de corriger ce mémoire afin d'enrichir ce travail académique.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos chers parents pour leur soutien inconditionnel, leurs prières et leurs sacrifices tout au long de notre parcours. Un grand merci également à nos frères, sœurs et familles pour leurs encouragements constants qui nous ont poussés à aller de l'avant.

À nos chers compagnons de route, Nous adressons nos sincères remerciements à nos amis et camarades d'études avec qui nous avons partagé les bancs de l'université et échangé des discussions scientifiques fructueuses. Nous tenons à remercier particulièrement ceux qui nous ont prêté main-forte dans la réalisation de la partie pratique et programmation.

À vous tous, et à quiconque a laissé une empreinte positive sur notre parcours universitaire, nous vous disons : merci du fond du cœur.

Table des matières

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	ii
Liste des symboles	iii
 Introduction Générale	 1

Chapitre I : Systèmes d'isolation et décharges surfaciques dans les transformateurs

I.1. Introduction.....	3
I.2. Généralités sur le transformateur	3
I.2.1. Définition et rôle de transformateur.....	3
I.2.2. Principe du fonctionnement du transformateur électrique	4
I.2.3. Transformateur de puissance	5
I.2.4. Constitution des transformateurs de puissance	7
I.3. Système d'isolation des transformateurs	8
I.3.1. Isolation papier.....	8
I.3.2. Huiles isolantes	9
I.3.2.1. Présentation des huiles isolantes.....	10
I.3.2.2. Rôle des huiles dans un transformateur	13
I.3.3. Isolation mixte huile/papier	14
I.3.4. Vieillissement et dégradation des isolants solides et liquides des transformateurs	15
I.3.4.1. Vieillissement des huiles isolantes	15
I.3.4.2. Dégradation de l'isolation solide	17
I.3.4.3. Vieillissement de l'isolation mixte huile/papier	18
I.4. Phénomène des décharges surfaciques	18
I.4.1. Définition des décharges surfaciques.....	18

I.4.2.	Mécanisme de formation.....	19
I.4.3.	Facteurs influençant les décharges surfaciques	19
I.4.4.	Conséquences et dégradation.....	20
I.4.5.	Progression des décharges	20
I.4.6.	Courants associés aux décharges surfaciques	21
I.4.7.	Analyse fréquentielle des courants	21
I.4.8.	Techniques de diagnostic	22
I.5.	Conclusion	23

Chapitre II : Méthodologie de mesure et Traitement du signal

II.1.	Introduction.....	24
II.2.	Fast fourrier transform FFT	24
II.2.1.	Définition de la FFT.....	24
II.2.2.	Fonction et Rôle.....	25
II.2.3.	Applications et limites	26
II.2.4.	Domaines d'application.....	26
II.3.	Discret Wavelet Transform DWT	27
II.3.1.	Définition de la DWT	27
II.3.2.	Fonction et Rôle	27
II.3.3.	Avantages et comparaison avec la transformée de Fourier.....	29
II.3.4.	Calendrier d'application	29
II.3.5.	Domaines d'application	30
II.4.	Forêt Aléatoire (Random Forest)	30
II.4.1.	Définition de la Forêt Aléatoire (Random Forest).....	30
II.4.2.	Fonction et mécanisme (Comment ça marche).....	31
II.4.3.	Conditions d'utilisation et avantages	32
II.4.4.	Rôle dans notre travail	32

II.4.5. Domaines d'application	33
II.5. Conclusion	33

Chapitre III : Résultats expérimentaux et Discussion

III.1. Introduction	34
III.2. Procédure expérimentale.....	34
III.3. Présentation des signaux étudiés.....	35
III.4. Analyse fréquentielle par FFT	36
III.5. Analyse par Transformée en Ondelettes Discrète (DWT).....	38
III.6. Classification par Random Forest	40
III.7. Validation du modèle	42
III.8. Conclusion.....	44
 Conclusion Générale.....	 45
 Références bibliographiques	 48

Liste des figures

Figure I.1. Transformateur électrique [5].	4
Figure I.2. Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur électrique [6].	5
Figure I.3. Transformateur de puissance [9].	6
Figure I.4. Symbole de transformateur de puissance [10].	6
Figure I.5. Les composants du transformateur de puissance [12].	8
Figure I.6. Figure des décharges surfaciques obtenues avec la technique des plaques photographiques [30].	21
Figure II.1. Représentation conceptuelle de la Transformation de Fast Fourier FFT.	25
Figure II.2. Discret Wavelet transform DWT.	29
Figure II.3. Méthode de Random Forest.	31
Figure III.1. Schéma du dispositif expérimental.	35
Figure III.2. Signaux de courant des décharges surfaciques pour les deux huiles.	36
Figure III.3. Analyse FFT du signal obtenu avec l'huile A.	37
Figure III.4. Analyse FFT du signal obtenu avec l'huile B.	37
Figure III.5. Analyse par Transformée en Ondelettes Discrète (DWT) pour l'huile A.	38
Figure III.6. Analyse par Transformée en Ondelettes Discrète (DWT) pour l'huile B.	39
Figure III.7. Représentation des données classifiées par Random Forest.	41
Figure III.8. Importance des caractéristiques obtenue par Random Forest.	41
Figure III.9. Matrice de confusion obtenue avec l'algorithme Random Forest.	42

Liste des tableaux

Tableau I.1. Propriétés des fluides isolant pour transformateur [19].	12
Tableau III.1. Énergies des signaux.	38
Tableau III.2. Énergies des signaux.	39
Tableau III.3. Analyse statistique des signaux.	40
Tableau III.4. Performances du modèle Random Forest pour l'huile A.....	42
Tableau III.5. Performances du modèle Random Forest pour l'huile B.	43

Liste des symboles

Symbole/abréviation	Nom complet
Pcb	Printed Circuit Board
Dp	Degré de polymérisation
Dwt	Discret wavelet transform
FFT	Fast Fourier Transform
CO₂	Dioxyde de carbone
HFCT	Capteurs Haute Fréquence
UHF	Ultra-Haute Fréquence
PRPD	Phase Resolved Partial Discharge
TFD	Transformée de Fourier Discrète
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Introduction

Générale

Introduction Générale

Le transformateur de puissance constitue un équipement indispensable dans les réseaux électriques modernes, assurant l'adaptation des niveaux de tension pour le transport et la distribution de l'énergie électrique. La fiabilité, la sécurité et la continuité de service de ce dispositif reposent en grande partie sur l'efficacité de son système d'isolation, classiquement constitué d'un complexe associant des isolants solides (papier) et liquides (huiles minérales, végétales ou synthétiques). Cependant, en cours de fonctionnement, ce système est soumis à de fortes contraintes thermiques, électriques et environnementales qui provoquent sa dégradation progressive au fil du temps.

Parmi les phénomènes de dégradation les plus critiques, les décharges surfaciques représentent une menace majeure pour les transformateurs. Il s'agit de manifestations électriques locales se propageant à la surface de l'isolant, générant des impulsions de courant très rapides et instables. À long terme, la répétition de ces micro-décharges provoque une usure irréversible du matériau, connue sous le nom de cheminement électrique (tracking), pouvant mener à un arc de contournement et à l'arrêt total de l'équipement. Par conséquent, une détection précoce et une évaluation précise de ces décharges sont primordiales pour diagnostiquer l'état de santé du système d'isolation.

Une simple observation temporelle de ces courants s'avérant insuffisante en raison de leur complexité, ce travail propose de mettre en place une chaîne de classification intelligente. L'objectif de ce projet est d'analyser les signaux liés aux décharges surfaciques en combinant des techniques mathématiques avancées de traitement du signal et des algorithmes d'apprentissage automatique (Machine Learning) afin d'automatiser et de fiabiliser l'évaluation des isolants.

Pour mener à bien cette étude, ce document est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente des généralités sur le transformateur de puissance et son système d'isolation. Il détaille également les processus de vieillissement de l'isolation mixte huile/papier et décrit en profondeur les mécanismes de formation, de propagation et les conséquences des décharges surfaciques.
- Le deuxième chapitre expose la méthodologie de traitement du signal et de classification. Il aborde l'utilisation de la Transformée de Fourier Rapide (FFT) pour l'analyse fréquentielle globale, et la Transformée en Ondelettes Discrète (DWT) pour une localisation temps-fréquence précise des événements transitoires. Il introduit

ensuite l'algorithme d'intelligence artificielle Random Forest, qui joue le rôle de classificateur intelligent pour établir un diagnostic automatisé.

- Le troisième chapitre est consacré aux résultats expérimentaux et à leur discussion. Il décrit le dispositif expérimental utilisé pour générer et acquérir les courants de décharge dans différentes isolations mixtes (papier/huile). Enfin, il démontre l'efficacité de l'approche adoptée en validant les performances du modèle Random Forest, qui a atteint une précision de 100 %, à partir des caractéristiques énergétiques et fréquentielles extraites par la FFT et la DWT.

Chapitre I

**Systèmes d'isolation et
décharges surfaciques dans
les transformateurs**

I.1. Introduction

Le transformateur est un appareil électrique utilisé pour adapter les niveaux de tension et de courant selon les besoins du réseau électrique. Son rôle principal est de convertir une tension alternative en une autre valeur tout en conservant la même fréquence ainsi que la forme du signal électrique.

Le fonctionnement du transformateur repose sur le principe de l'induction électromagnétique. Il est constitué essentiellement d'un noyau magnétique et de deux enroulements réalisés à l'aide de conducteurs électriques. L'énergie électrique est transférée de l'enroulement primaire vers l'enroulement secondaire par l'intermédiaire du flux magnétique créé dans le noyau [1].

Le système d'isolation représente un élément essentiel dans le fonctionnement et la sécurité du transformateur. Son rôle est d'éviter les fuites de courant et de protéger aussi bien les équipements que le personnel contre les risques électriques. Il contribue également à assurer un fonctionnement fiable du transformateur en limitant les pertes d'énergie et les défaillances électriques. En outre, l'isolation protège les composants internes contre l'humidité, la poussière et les contraintes liées à l'environnement extérieur [2].

I.2. Généralités sur le transformateur

I.2.1. Définition et rôle de transformateur

Le transformateur est un appareil électrique fonctionnant selon le principe de l'induction électromagnétique. Constitué de plusieurs enroulements fixes, il permet d'adapter les niveaux de tension et de courant alternatifs afin de répondre aux exigences des différents systèmes électriques. L'une de ses principales caractéristiques est sa capacité à modifier les valeurs de tension et de courant sans affecter la fréquence du signal électrique [3].

Grâce à son rôle essentiel dans le transport et la distribution de l'énergie électrique, le transformateur occupe une place importante dans les réseaux électriques modernes. Il intervient à différents niveaux de la chaîne énergétique afin d'assurer l'adaptation des niveaux de tension selon les besoins d'exploitation.

Son utilisation se retrouve principalement :

- À la sortie des centrales électriques : où il élève la tension afin de faciliter le transport de l'énergie sur de longues distances.

- Dans les postes intermédiaires : où il participe à la répartition de l'énergie entre les différents réseaux de distribution.
- Dans les postes de transformation : où il abaisse la tension pour l'adapter aux besoins des installations industrielles et des consommateurs [4].

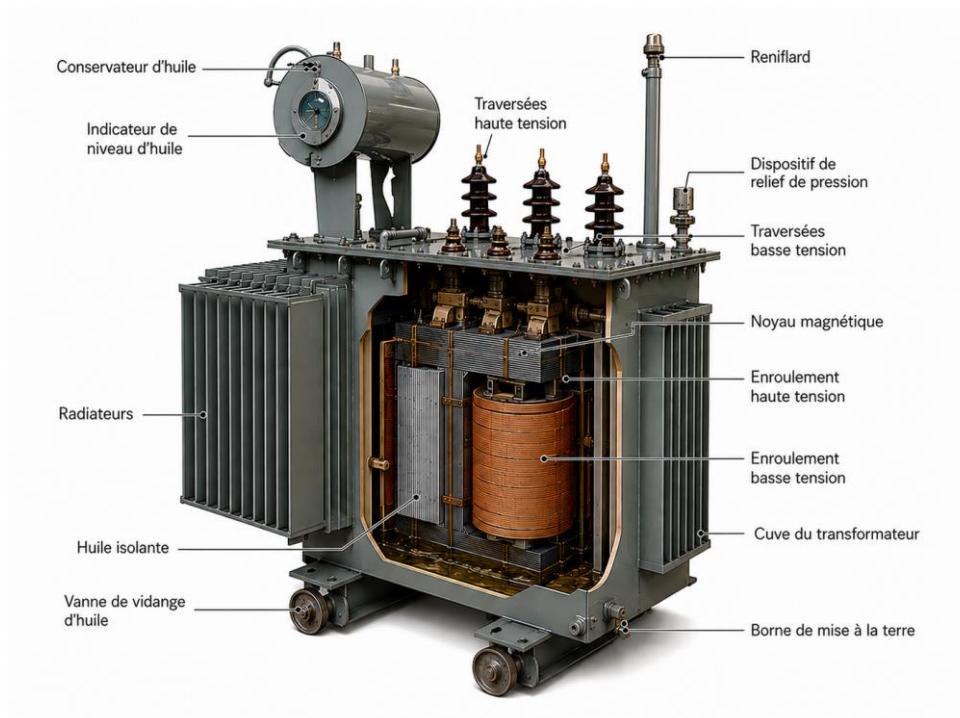


Figure I.1. Transformateur électrique [5].

I.2.2. Principe du fonctionnement du transformateur électrique

Le fonctionnement du transformateur repose sur le principe de l'induction électromagnétique lié à la variation du flux magnétique. Toute variation du flux au sein du noyau magnétique entraîne l'apparition d'une tension induite dans les enroulements. La valeur de cette tension dépend principalement de la variation du flux ainsi que du nombre de spires constituant chaque bobine.

Lorsque l'enroulement primaire est alimenté par une tension alternative, un flux magnétique variable est créé dans le noyau du transformateur. Ce flux induit alors une tension au niveau de l'enroulement secondaire. La tension obtenue au secondaire est directement liée au rapport entre le nombre de spires des deux enroulements. Lorsqu'une charge est connectée au secondaire, un courant électrique circule à travers cette charge, assurant ainsi le transfert de l'énergie électrique du primaire vers le secondaire. Le principe de fonctionnement du transformateur est illustré par le schéma de la Figure I.2 [6].

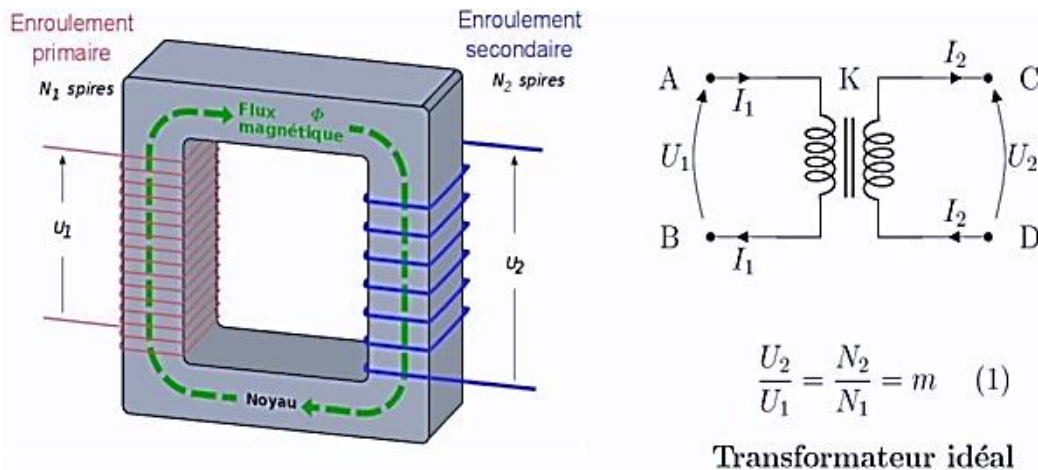


Figure I.2. Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur électrique [6].

I.2.3. Transformateur de puissance

Le transformateur de puissance constitue un élément essentiel dans le transport et la distribution de l'énergie électrique. Toute défaillance de cet équipement peut entraîner des interruptions d'alimentation importantes ainsi que des conséquences économiques considérables. Pour cette raison, il est indispensable de détecter rapidement les anomalies afin d'éviter des situations critiques et d'assurer la continuité du service électrique.

Lors d'un dysfonctionnement, plusieurs parties du transformateur peuvent être affectées, notamment le système mécanique, l'isolation électrique et le dispositif de refroidissement. Ces dégradations entraînent une diminution des performances globales de l'équipement. Dans certains cas, les défauts apparaissent progressivement au cours du temps sous l'effet de contraintes électriques ou thermiques, telles que les courts-circuits ou les surtensions provoquées par la foudre.

L'évaluation de l'état d'un transformateur repose principalement sur l'analyse de l'huile isolante. Les essais effectués sur cette huile permettent d'obtenir des informations importantes sur l'état interne de l'équipement. En présence d'un défaut, des gaz de décomposition sont générés dans l'huile. L'analyse de ces gaz permet alors d'identifier la nature du défaut ainsi que son niveau de gravité [7].

Selon leur conception, les transformateurs peuvent être classés en deux catégories principales. La première correspond aux transformateurs avec conservateur, également appelés transformateurs « respirants ». Dans cette configuration, l'huile est stockée dans un réservoir séparé relié à la cuve principale. Ce système permet de compenser les variations de volume de

l'huile dues aux changements de température. Bien que l'huile puisse être en contact avec l'air ambiant, celui-ci traverse un dispositif de dessiccation afin de limiter l'introduction d'humidité dans le système.

La seconde catégorie concerne les transformateurs étanches. Dans ce cas, l'huile est entièrement contenue dans la cuve du transformateur sans contact direct avec l'air extérieur. Les variations de volume liées à la température sont compensées à l'aide d'un coussin de gaz, généralement constitué d'air ou d'azote, placé dans la partie supérieure du réservoir.

Ainsi, quelle que soit la configuration utilisée, la protection et la préservation de l'huile isolante demeurent essentielles pour garantir le bon fonctionnement et la fiabilité du transformateur [8].



Figure I.3. Transformateur de puissance [9].

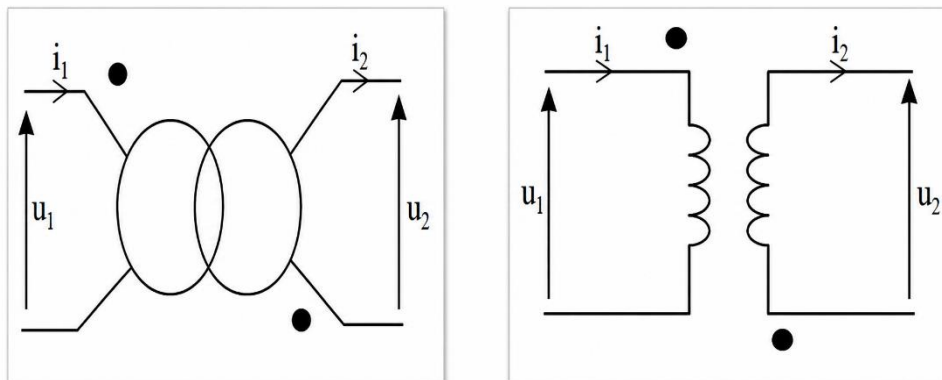


Figure I.4. Symbole de transformateur de puissance [10].

I.2.4. Constitution des transformateurs de puissance

La majorité des transformateurs de puissance sont réalisés en configuration triphasée afin de répondre aux besoins des réseaux électriques modernes. Toutefois, en raison des contraintes liées au poids, aux dimensions et au transport, certaines installations utilisent un ensemble constitué de trois transformateurs monophasés distincts.

Les principales composantes d'un transformateur de puissance sont les suivantes :

- Connecteurs (bornes haute tension et basse tension) : ils assurent l'alimentation et la sortie de l'énergie électrique. Leur isolation est généralement réalisée à l'aide de matériaux tels que la porcelaine, le papier imprégné d'huile ou la résine époxy. Dans les applications à très haute tension, les connecteurs sont le plus souvent immergés dans l'huile isolante, tandis que certaines configurations utilisent des traversées sèches.
- Cuve : il s'agit d'une enveloppe métallique, généralement en acier, contenant l'ensemble des éléments internes du transformateur. Elle est équipée d'ailettes ou de radiateurs afin d'améliorer le refroidissement. Dans certaines applications spécifiques, sa structure peut être renforcée pour résister à des conditions particulières de fonctionnement.
- Noyau magnétique : il est constitué d'un empilement de fines tôles d'acier au silicium permettant d'assurer la circulation du flux magnétique tout en réduisant les pertes électriques et les effets acoustiques.
- Bobines ou enroulements : les enroulements, généralement fabriqués en cuivre ou en aluminium, sont disposés autour du noyau magnétique. Le nombre de spires, leur forme ainsi que leurs dimensions dépendent des contraintes électriques, thermiques et mécaniques du transformateur. Des espaces sont prévus entre les enroulements afin de faciliter la circulation de l'huile de refroidissement.
- Conservateur d'huile : placé au-dessus du transformateur, il permet de compenser les variations de volume de l'huile liées aux changements de température. Ce dispositif contribue à limiter les variations de pression interne et à maintenir l'immersion des parties actives. Certains conservateurs comportent également une membrane de séparation ainsi qu'un système de dessiccation afin de limiter l'humidité.
- Changeur de prises : cet élément est utilisé pour ajuster la tension de sortie du transformateur, aussi bien en charge qu'hors charge.

- Fluides isolants : les huiles isolantes, qu'elles soient minérales, synthétiques ou végétales, assurent à la fois l'isolation électrique et le refroidissement du transformateur.
- Isolateurs solides : différents matériaux isolants tels que le papier, le carton, le bois, les vernis ou les résines sont utilisés pour renforcer l'isolation électrique des différentes parties du transformateur [11].

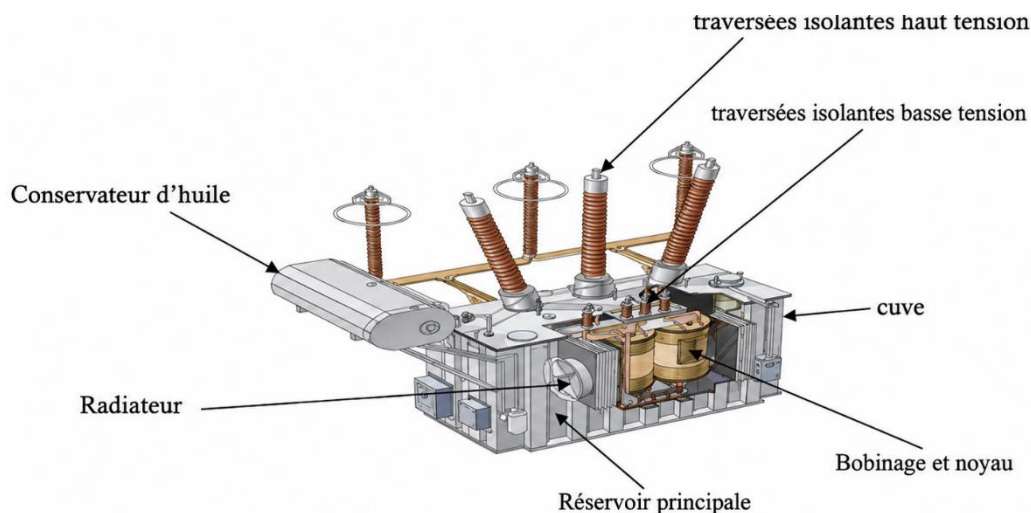


Figure I.5. Les composants du transformateur de puissance [12].

I.3. Système d'isolation des transformateurs

Les parties actives d'un transformateur de puissance sont isolées à l'aide de matériaux solides, tels que le papier et le carton, associés à une huile isolante pouvant être d'origine minérale, végétale ou synthétique. Ce système d'isolation représente un élément essentiel du transformateur, car il assure à la fois l'isolation électrique et le bon fonctionnement de l'équipement. Malgré son importance, il constitue également la partie la plus sensible du transformateur face aux contraintes électriques, thermiques et environnementales. Pour cette raison, une surveillance et un entretien réguliers sont nécessaires afin de garantir la fiabilité et la sécurité du fonctionnement du transformateur [13].

I.3.1. Isolation papier

Dans les transformateurs de puissance, le papier est largement utilisé comme matériau d'isolation solide. Plusieurs couches de papier sont généralement superposées puis imprégnées d'huile isolante avant d'être séchées afin d'améliorer leurs propriétés diélectriques et mécaniques. Ce traitement permet d'obtenir une bonne résistance mécanique ainsi qu'une réduction des pertes diélectriques.

En pratique, le papier imprégné d'huile présente de meilleures performances d'isolation que le papier ou l'huile utilisés séparément. Ce système isolant est principalement disposé entre les enroulements et entre les parties actives du transformateur et la cuve métallique.

Cependant, le papier isolant possède une forte capacité d'absorption de l'humidité, ce qui peut affecter ses propriétés électriques et accélérer son vieillissement au cours du fonctionnement du transformateur [14].

I.3.2. Huiles isolantes

Les huiles isolantes sont largement utilisées dans les équipements d'ingénierie électrique tels que les transformateurs de puissance, de distribution et de traction, ainsi que dans les condensateurs, les câbles, les traversées et les disjoncteurs.

Le choix d'une huile isolante dépend principalement des conditions d'utilisation et des exigences de l'application concernée. Plusieurs types d'huiles ont ainsi été développés, chacun possédant des caractéristiques spécifiques. Il est donc nécessaire de comparer les propriétés de chaque huile avec les performances recherchées avant de procéder au choix. En pratique, aucune huile ne possède l'ensemble des propriétés idéales, ce qui conduit généralement à un compromis entre les différentes performances souhaitées.

Dans les transformateurs haute tension, les principales propriétés recherchées concernent les caractéristiques électriques et diélectriques de l'huile, notamment sa capacité d'isolation, sa rigidité diélectrique et sa résistance aux décharges électriques et aux arcs.

L'huile doit également présenter une bonne résistance au vieillissement afin de limiter les effets de la température, de l'oxydation et de l'humidité sur ses performances au cours du temps.

D'autres propriétés importantes sont liées au comportement physique et thermique de l'huile, telles que sa viscosité, sa conductivité thermique et sa capacité à évacuer la chaleur produite par le transformateur. Les propriétés liées à la sécurité incendie peuvent également être prises en considération selon les conditions d'exploitation.

Enfin, les aspects environnementaux et sanitaires occupent aujourd'hui une place importante dans le choix des huiles isolantes, notamment en ce qui concerne leur toxicité et leur capacité de biodégradation dans l'environnement [15].

I.3.2.1. Présentation des huiles isolantes

a. Huiles minérales

Les huiles minérales sont des fluides isolants obtenus à partir du raffinage du pétrole et représentent les huiles les plus utilisées dans les équipements électriques. Leur composition chimique est complexe en raison de la grande diversité des molécules d'hydrocarbures qu'elles contiennent. Ces composés se répartissent principalement en trois familles : les composés paraffiniques, naphténiques et aromatiques.

Les composés paraffiniques et naphténiques influencent principalement les propriétés physiques de l'huile, telles que la densité, la viscosité et le comportement à basse température. Les composés aromatiques, quant à eux, jouent un rôle important dans la résistance à l'oxydation ainsi que dans certaines propriétés électriques et diélectriques de l'huile.

Par ailleurs, les huiles minérales utilisées dans les transformateurs sont soumises à des normes internationales définissant leurs caractéristiques physiques, chimiques et électriques selon les exigences des équipements électriques concernés [16].

b. Huiles des synthèses

Lorsque des performances spécifiques sont recherchées, notamment une meilleure résistance au feu, les huiles de synthèse constituent une alternative aux huiles minérales. Leur utilisation est particulièrement importante dans les transformateurs installés à proximité des zones habitées, des réseaux de distribution ou des infrastructures de transport.

Ces huiles sont obtenues à partir de procédés chimiques permettant d'améliorer certaines propriétés physiques et diélectriques. Dans les transformateurs, on distingue principalement trois catégories d'huiles de synthèse :

- Les huiles à base de silicone.
- Les hydrocarbures chlorés, tels que les PCB.
- Les esters synthétiques à base de pentaérythritol, également appelés esters organiques synthétiques.

Contrairement aux esters naturels issus des huiles végétales, les esters synthétiques sont fabriqués chimiquement afin d'obtenir des caractéristiques mieux adaptées à certaines applications électriques spécifiques [17].

c. Huiles végétales

Les huiles végétales sont des fluides isolants naturels obtenus à partir de plantes telles que le colza ou le soja. Elles présentent un intérêt environnemental important grâce à leur caractère biodégradable et à leur faible impact polluant en cas de fuite ou de rejet dans l'environnement.

Cependant, malgré leurs avantages écologiques, leurs performances restent parfois inférieures à celles des huiles minérales dans certaines applications électriques. En effet, elles peuvent présenter une rigidité diélectrique plus faible ainsi qu'une stabilité au vieillissement moins élevée sur le long terme [18].

Chapitre I Systèmes d'isolation et décharges surfaciques dans les transformateurs

Tableau I.1. Propriétés des fluides isolant pour transformateur [19].

Propriétés des fluides isolants pour transformateurs : Valeurs typiques/limites			
	Huile végétale	Huile minérale	Huile silicone
Apparence	Jaune clair ^a	Jaune clair	sans couleur
gravité spécifique à 25 °C	0.91 – 0.92	0.89	0.96
Viscosité cinématique, cSt			
0 °C	170 – 250	2200	95
25 °C	55 – 75	300	50
40 °C	33 – 45	125	38
100 °C	8 – 10	13	16
Point d'écoulement, °C	–15 à –25	–20 max.	–50 max.
tension interfaciale, dyne/cm	25	40 – 45	25
Point d'éclair °C	310 – 325	275 min.	300 min.
Point de feu °C	354 – 360	160 – 180	340
Teneur en eau, ppm huile sèche	50 – 100	10 – 25 ^b	50
(Solubilité de l'eau à 25 °C)	1200	60	200
Propriétés thermiques			
capacité calorifique, cal/g. °C	0.50 – 0.57	0.488	0.363
Conductivité thermique, W/m.K	0.17 ^a	0.13	0.15
Coefficient de dilatation thermique, /°C	0.0007	0.00073	0.00104
Propriétés chimiques			
Type	Ester	Hydrocarbure	Organo-silicone
Acidité mg KOH/g	0.06 ^a	0.01	0.01
Stabilité à l'oxydation – ASTM D 2440	Passe ^a	Passe	Passe
Propriétés électriques			
Constante diélectrique à 25 °C	3.1	2.2	2.71
résistivité volumique à 25 °C, Ohm.cm	10 ¹⁴	10 ¹⁴ – 10 ¹⁵	10 ¹⁴
Tension de claquage kV			
ASTM D 1816, 2 mm	74 ^a	60	–
sous tension impulsionnelle (pointe négative) , kV	116 ^a	145	136
% Facteur de dissipation			
25 °C	0.25 ^a	0.05 max.	-0.01
100 °C	1.00 ^a	0.3 max.	–
Tendance au gazage – ASTM D 2300	–50 ^a	–10 à +20	N/A
Biodégradabilité			
CEC-L-33 21 jours	97 – 99	30	Très bas
^a Remarque : a: Huile BIOTEMP b: Varié selon le classement du transformateur			

I.3.2.2. Rôle des huiles dans un transformateur

Dans le domaine de l'électrotechnique, les huiles isolantes sont utilisées pour imprégner les matériaux isolants et remplir différents équipements électriques. Leur rôle principal est de chasser l'air et les gaz présents, ce qui permet d'améliorer la capacité d'isolation électrique.

En pratique, elles assurent surtout deux fonctions essentielles :

a. Fonction d'isolation (diélectrique)

Dans un transformateur de puissance, il est indispensable d'assurer une isolation efficace entre les différentes parties soumises à des potentiels électriques différents afin d'éviter les courts-circuits et les défaillances électriques. Pour cela, plusieurs méthodes d'isolation peuvent être utilisées :

- Isolation par liquide isolant : cette méthode consiste à utiliser uniquement un fluide isolant placé entre deux parties conductrices métalliques. Ce principe est notamment utilisé dans certains équipements électriques comme les interrupteurs haute tension.
- Isolation solide imprégnée : elle repose sur l'utilisation de matériaux solides, tels que le papier ou le carton, imprégnés d'huile isolante. Cette technique est fréquemment employée entre les conducteurs voisins d'un même enroulement afin d'améliorer les performances diélectriques.
- Isolation mixte : cette méthode associe un liquide isolant à des barrières solides afin d'assurer une meilleure séparation électrique entre deux enroulements soumis à des niveaux de tension différents [20].

b. Fonction de transfert de chaleur (refroidissement)

Malgré leur rendement élevé, généralement compris entre 99 % et 99,9 %, les transformateurs électriques présentent toujours des pertes d'énergie sous forme de chaleur. Cette élévation de température peut affecter les performances et accélérer le vieillissement des matériaux isolants si elle n'est pas correctement maîtrisée.

Afin d'éviter toute surchauffe, il est nécessaire d'assurer une évacuation efficace de la chaleur produite à l'intérieur du transformateur. Le maintien d'un équilibre thermique entre la chaleur générée et celle dissipée constitue donc un facteur essentiel pour garantir un fonctionnement fiable de l'équipement.

Dans les transformateurs immergés, l'huile isolante assure également une fonction de refroidissement en transportant la chaleur des parties actives vers les surfaces de dissipation thermique. La circulation de l'huile peut être naturelle ou forcée à l'aide de systèmes de refroidissement spécifiques. Le transfert thermique s'effectue principalement par convection et par conduction thermique.

Les performances thermiques d'une huile isolante dépendent principalement de plusieurs propriétés physiques, parmi lesquelles :

- La viscosité : qui influence la circulation de l'huile
- La conductivité thermique : liée à sa capacité à transmettre la chaleur
- La chaleur spécifique : qui représente sa capacité à absorber et stocker l'énergie thermique [21].

I.3.3. Isolation mixte huile/papier

L'association de l'huile isolante et du papier constitue un système d'isolation largement utilisé dans les transformateurs de puissance. Ce complexe huile/papier joue un rôle essentiel dans le bon fonctionnement du transformateur, aussi bien du point de vue électrique que mécanique. Toutefois, il représente également la partie la plus sensible au vieillissement et aux contraintes de fonctionnement.

Les propriétés diélectriques du système sont principalement assurées par l'huile isolante, tandis que le papier apporte la résistance mécanique nécessaire au maintien des enroulements. En plus de garantir la rigidité mécanique de l'ensemble, le papier contribue à limiter certaines contraintes dues aux vibrations des parties actives du transformateur.

Afin d'améliorer ses performances mécaniques, le papier est généralement enroulé autour des conducteurs en cuivre sous forme de plusieurs couches fines, souvent comprises entre 3 et 12 bandes d'environ 75 μm d'épaisseur.

L'état du papier isolant peut être évalué à l'aide de différents essais, tels que la résistance à la traction, l'allongement à la rupture, la résistance au déchirement, la flexibilité ou encore l'indice d'éclatement. Cependant, le paramètre le plus utilisé pour évaluer son niveau de vieillissement reste le degré moyen de polymérisation.

Sur le plan chimique, le complexe huile/papier est fortement influencé par la présence d'eau et d'oxygène, en particulier à des températures élevées. Ces facteurs accélèrent les mécanismes de vieillissement, affectant principalement le papier isolant au cours du temps [21].

I.3.4. Vieillissement et dégradation des isolants solides et liquides des transformateurs

Le vieillissement des isolants correspond à une dégradation progressive des matériaux constituant le système d'isolation. Cette dégradation résulte de phénomènes physiques et chimiques qui entraînent une diminution des performances électriques ainsi qu'une perte des propriétés mécaniques des matériaux isolants.

De manière plus précise, le vieillissement se manifeste par une altération irréversible des caractéristiques de l'isolation électrique sous l'effet de différents facteurs, tels que la température, l'humidité, l'oxydation ou encore les contraintes électriques.

Par conséquent, l'évaluation de l'état de vieillissement d'un transformateur nécessite l'étude de l'évolution et de la dégradation des matériaux isolants qui composent son système d'isolation [22, 23].

I.3.4.1. Vieillissement des huiles isolantes

Au cours du fonctionnement du transformateur, l'huile isolante subit progressivement des modifications de sa composition, entraînant une évolution de ses propriétés physiques, chimiques et électriques. Ce phénomène est connu sous le nom de vieillissement de l'huile.

Les principaux mécanismes responsables de cette dégradation sont l'oxydation et l'hydrolyse. La présence d'oxygène dissous dans l'huile ainsi que l'humidité répartie entre l'huile et le papier isolant favorisent ces réactions. En général, la teneur en eau représente environ 0,5 à 1 % de la masse totale du système isolant. De plus, certaines contraintes de fonctionnement, telles qu'une température élevée ou un champ électrique important, accélèrent le vieillissement de l'huile.

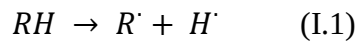
Le contact de l'huile avec les différents matériaux internes du transformateur, comme le cuivre, l'acier, le fer, l'aluminium ou encore la cellulose du papier isolant, contribue également à accélérer les mécanismes de dégradation.

Parmi ces phénomènes, l'oxydation constitue le principal facteur de vieillissement des huiles isolantes. Elle résulte de la réaction progressive entre l'huile et l'oxygène, particulièrement à haute température et en présence de métaux jouant un rôle de catalyseur. Cette réaction entraîne

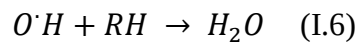
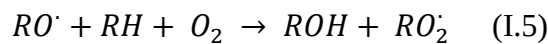
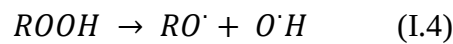
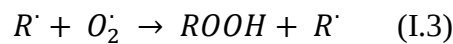
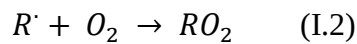
la formation de nouveaux composés qui modifient les propriétés de l'huile, notamment sa couleur, son odeur, sa viscosité ainsi que la formation de dépôts.

Le mécanisme d'oxydation se déroule généralement en trois étapes : l'initiation, la propagation et la terminaison. Durant la phase d'initiation, des radicaux libres apparaissent et déclenchent les réactions chimiques. Ensuite, ces radicaux réagissent avec l'oxygène pour former des composés intermédiaires qui entretiennent le processus d'oxydation. Ce mécanisme auto-entretenu provoque progressivement la dégradation de l'huile isolante [24].

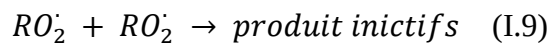
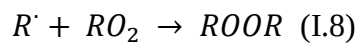
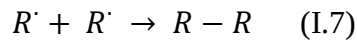
Le schéma suivant illustre les principales réactions produites lors du processus d'oxydation des huiles isolantes [24].



Propagation



Terminaison



Dans ces réactions, RH représente un hydrocarbure, ROOH un hydroperoxyde et $RO_2\cdot$ un radical peroxyde.

L'oxydation de l'huile de transformateur entraîne la formation de plusieurs composés de dégradation, tels que les esters, l'eau, les acides carboxyliques, les alcools, les peroxydes, les aldéhydes et les cétones.

La présence de ces produits de dégradation affecte progressivement les propriétés de l'huile isolante. En effet, ils provoquent une augmentation de l'acidité et de la teneur en eau de l'huile, ainsi qu'une élévation des pertes diélectriques, exprimées par le facteur de dissipation. Par conséquent, les performances d'isolation diminuent progressivement, ce qui réduit la rigidité diélectrique et la capacité de l'huile à supporter les contraintes électriques élevées.

I.3.4.2. Dégradation de l'isolation solide

La dégradation du papier isolant dans les transformateurs est principalement influencée par plusieurs facteurs tels que l'humidité, la température, les contraintes électriques, les acides ainsi que la présence d'oxygène. Sous l'effet combiné de ces contraintes, les propriétés mécaniques et électriques du papier diminuent progressivement au cours du temps.

Le vieillissement du papier résulte essentiellement de trois mécanismes principaux : la pyrolyse, l'oxydation et l'hydrolyse. Ces phénomènes provoquent la rupture des chaînes moléculaires de la cellulose, entraînant une diminution du degré de polymérisation et, par conséquent, une perte de résistance mécanique du papier. La vitesse de ces réactions augmente généralement avec la température, l'humidité et la concentration en oxygène.

- **Pyrolyse** : ce phénomène correspond à la décomposition thermique de la cellulose sous l'effet d'une température élevée. Il entraîne la rupture des liaisons moléculaires et la formation de gaz tels que le CO, le CO₂, le H₂ et la vapeur d'eau. Ce mécanisme devient particulièrement important lorsque la température dépasse environ 150 °C.
- **Oxydation** : elle résulte de la réaction de l'oxygène avec la structure moléculaire de la cellulose. Cette réaction conduit à la formation de différents composés chimiques, notamment des aldéhydes et des acides, ainsi que des gaz tels que le CO, le CO₂ et le H₂.
- **Hydrolyse** : ce mécanisme est provoqué par l'action de l'eau sur les chaînes moléculaires de la cellulose. Il entraîne une dégradation progressive de la structure du papier et une diminution de sa résistance mécanique. L'eau produite par les autres réactions peut également accélérer ce processus.

À des températures inférieures à environ 140 °C, ces différents mécanismes se produisent généralement de manière simultanée, ce qui rend leur distinction plus difficile.

Plusieurs méthodes permettent d'évaluer l'état du papier isolant :

- **Le degré de polymérisation (DP)** : il représente la longueur moyenne des chaînes de cellulose. Une diminution du DP indique une dégradation avancée du papier.
- **La résistance à la traction** : elle permet d'évaluer les propriétés mécaniques du papier isolant.

- L'analyse des composés furaniques : cette méthode consiste à détecter les substances produites lors de la dégradation de la cellulose.

Les deux premières méthodes nécessitent généralement le prélèvement d'échantillons de papier. D'autres approches reposent également sur l'analyse de certains composés chimiques, tels que le méthanol, afin d'évaluer l'état de vieillissement du papier isolant [25].

I.3.4.3. Vieillissement de l'isolation mixte huile/papier

Dans le système d'isolation huile/papier des transformateurs, les mécanismes de vieillissement thermique des deux matériaux présentent des comportements similaires. Toutefois, les produits issus de l'oxydation de l'huile peuvent accélérer de manière significative la dégradation du papier isolant.

Cette accélération peut se produire de deux façons : soit par l'action directe des produits d'oxydation sur la cellulose du papier, soit par l'augmentation de la capacité de l'huile à absorber l'humidité. Dans certaines conditions, la présence d'huile peut ainsi favoriser une dégradation du papier beaucoup plus rapide que dans d'autres milieux isolants.

L'eau constitue également un facteur majeur de vieillissement, car elle se concentre principalement dans le papier isolant, ce qui accélère fortement sa dégradation chimique et mécanique.

Concernant l'air, son influence directe sur le papier reste relativement limitée. En effet, l'oxygène agit d'abord sur l'huile isolante avant d'affecter indirectement le papier à travers les produits issus des réactions d'oxydation [26].

I.4. Phénomène des décharges surfaciques

I.4.1. Définition des décharges surfaciques

La décharge surfacique est une manifestation électrique localisée qui se propage le long de la surface d'un matériau isolant. Elle apparaît généralement lorsque le champ électrique appliqué est insuffisant pour provoquer une perforation directe de l'isolant. Dans ce cas, le courant électrique emprunte un chemin de propagation à la surface du matériau, en particulier dans les zones d'interface entre l'isolant solide et un milieu fluide tel que l'huile isolante.

Bien que les décharges surfaciques soient initialement de faible intensité, leur répétition progressive peut entraîner une détérioration importante de la surface isolante. En effet, les

décharges successives provoquent une carbonisation du matériau, conduisant à la formation de traces conductrices permanentes.

À long terme, cette dégradation altère les propriétés diélectriques du système d'isolation et peut provoquer une défaillance du transformateur [27].

I.4.2. Mécanisme de formation

De manière générale, les décharges électriques apparaissent dans les régions où le champ électrique présente une forte concentration. Ce phénomène se produit fréquemment au niveau du point triple, correspondant à la zone de contact entre l'électrode métallique, le milieu gazeux (air ou gaz) et le matériau isolant.

Lorsque l'intensité du champ électrique dépasse la rigidité diélectrique du milieu environnant, une décharge électrique locale peut se former. Cette décharge ne traverse pas directement l'isolant, mais se développe progressivement le long de sa surface sous l'effet du champ électrique appliqué.

I.4.3. Facteurs influençant les décharges surfaciques

Plusieurs facteurs liés à l'environnement ainsi qu'aux caractéristiques du matériau isolant influencent la tension d'apparition des décharges surfaciques :

- Pollution et humidité : la présence d'humidité ou de particules conductrices à la surface de l'isolant réduit sa résistance électrique. Dans ces conditions, le courant peut circuler plus facilement le long de la surface, favorisant ainsi le phénomène de cheminement électrique, appelé tracking .
- Géométrie de l'isolant : la forme de l'isolant joue un rôle important dans la répartition du champ électrique. Les ailettes et les nervures utilisées dans les équipements haute tension permettent d'augmenter le chemin de fuite et de limiter la propagation des décharges surfaciques.
- Nature du matériau isolant : certains matériaux, tels que le silicone ou la résine époxy, présentent une meilleure résistance aux décharges électriques et au vieillissement que d'autres matériaux organiques.

I.4.4. Conséquences et dégradation

Dans les installations électriques telles que les lignes à haute tension, les transformateurs ou les circuits imprimés, les décharges surfaciques constituent un phénomène indésirable pouvant entraîner une détérioration progressive des systèmes d'isolation.

Les principales conséquences des décharges surfaciques sont les suivantes :

- Le cheminement électrique (tracking) : lorsque les décharges se produisent de manière répétitive au même endroit, elles provoquent une carbonisation progressive de la surface isolante. Cette dégradation conduit à la formation de chemins conducteurs permanents favorisant la circulation du courant électrique.
- L'érosion : l'énergie libérée par les décharges entraîne une usure progressive de la surface de l'isolant par détachement de fines particules de matière.
- Le contournement (flashover) : il s'agit d'un phénomène plus critique au cours duquel la décharge établit un arc électrique entre deux électrodes. Cette situation peut provoquer un court-circuit et conduire à l'arrêt total de l'équipement électrique [28].

I.4.5. Progression des décharges

Lorsqu'une décharge électrique apparaît dans une zone de fort champ électrique, notamment au niveau du point triple, elle ne demeure pas localisée au même endroit. Elle se propage progressivement le long de la surface de l'isolant sous forme de filaments ionisés appelés streamers ou effluves. Ces filaments se développent sous l'effet du champ électrique appliqué à la surface du matériau isolant. Au cours de leur propagation, les streamers déposent des charges électriques sur la surface de l'isolant. Ces charges modifient localement la distribution du champ électrique, ce qui peut soit limiter la propagation de la décharge, soit favoriser l'apparition de nouvelles décharges en créant un chemin partiellement ionisé. Lorsque l'énergie appliquée augmente davantage, le streamer peut évoluer vers une décharge plus intense appelée arc rampant ou leader. Cette décharge présente une température plus élevée et un pouvoir destructeur plus important pour l'isolant. À long terme, elle peut conduire à un contournement électrique complet de la surface isolante [29].

La figure suivante présente quelques formes de propagation des décharges surfaciques observées à la surface d'un isolant soumis à un champ électrique élevé.

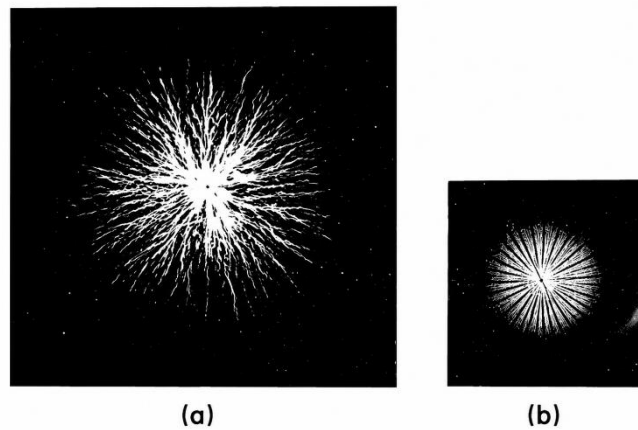


Figure I.6. Figure des décharges surfaciques obtenues avec la technique des plaques photographiques [30].

I.4.6. Courants associés aux décharges surfaciques

Contrairement au courant produit lors d'un court-circuit classique, qui présente généralement une forme continue et régulière, le courant associé aux décharges surfaciques est constitué d'impulsions brèves et irrégulières. Chaque décharge génère un pic de courant de très courte durée, résultant de l'ionisation rapide du milieu environnant.

Ces impulsions apparaissent en quelques nanosecondes et leur durée dépasse rarement quelques microsecondes. L'amplitude du courant dépend principalement de l'énergie libérée lors de l'ionisation ainsi que des caractéristiques électriques du système d'isolation.

Bien que l'intensité de chaque impulsion reste relativement faible, généralement comprise entre quelques milliampères et quelques ampères, leur répétition continue peut provoquer un échauffement local de la surface isolante. À long terme, ce phénomène favorise la dégradation progressive du matériau isolant, connue sous le nom de tracking [31].

I.4.7. Analyse fréquentielle des courants

Les courants générés par les décharges surfaciques se manifestent sous forme d'impulsions très rapides et de courte durée. De ce fait, ils présentent un contenu fréquentiel très large, pouvant s'étendre de quelques dizaines de kilohertz jusqu'à plusieurs gigahertz.

L'analyse de ces signaux dans le domaine temporel demeure souvent complexe en raison de la présence de bruits et de perturbations électromagnétiques. Pour cette raison, des méthodes d'analyse fréquentielle, telles que la Transformée de Fourier Rapide (FFT) et la Transformée

en Ondelettes (DWT), sont largement utilisées afin d'obtenir une meilleure caractérisation des décharges.

L'étude du spectre fréquentiel permet de distinguer les caractéristiques propres à chaque type de décharge. Par exemple, une décharge surfacique naissante ne présente pas les mêmes composantes fréquentielles qu'une décharge plus développée pouvant conduire à un contournement électrique.

Par ailleurs, ces méthodes facilitent le filtrage des signaux parasites, notamment les interférences électromagnétiques et les bruits radioélectriques, afin d'isoler les composantes directement liées à la dégradation du système d'isolation [32].

I.4.8. Techniques de diagnostic

Afin de détecter les décharges surfaciques et d'évaluer leur niveau de gravité avant qu'elles n'endommagent les équipements électriques, plusieurs techniques de diagnostic sont utilisées dans le domaine industriel.

La mesure électrique conventionnelle, définie par la norme CEI 60270, constitue la méthode de référence pour la détection des décharges partielles. Elle repose sur la mesure de la charge apparente des décharges, généralement exprimée en picocoulombs (PC), à l'aide de condensateurs de couplage et de circuits de mesure adaptés.

Les capteurs Haute Fréquence (HFCT) et Ultra-Haute Fréquence (UHF) sont également largement employés. Ces dispositifs permettent de capter les signaux électromagnétiques émis lors de l'apparition des décharges partielles. Leur principal avantage réside dans la possibilité d'assurer une surveillance en ligne des équipements, sans interruption de leur fonctionnement.

L'analyse PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) représente une autre méthode largement utilisée pour l'identification des différents types de décharges. Cette technique consiste à représenter l'intensité des décharges en fonction de la phase de la tension alternative sur un cycle de 360°. La distribution des impulsions obtenue permet de distinguer les décharges internes, les décharges couronne et les décharges surfaciques.

Plus récemment, les approches basées sur l'intelligence artificielle et le Machine Learning occupent une place importante dans le diagnostic des systèmes d'isolation. Les signaux acquis par les capteurs HFCT, UHF ou issus de l'analyse PRPD sont traités par des algorithmes d'apprentissage automatique, tels que Random Forest, afin d'automatiser la détection des

défauts, d'évaluer l'état de vieillissement de l'isolant et d'estimer la durée de vie restante des équipements [33].

I.5. Conclusion

En résumé, le transformateur de puissance constitue un élément indispensable du réseau électrique. Son bon fonctionnement dépend principalement de la qualité de son système d'isolation. Le couple huile/papier joue un rôle essentiel, puisqu'il assure à la fois l'isolation électrique et le refroidissement du transformateur.

Cependant, ce système d'isolation demeure sensible aux conditions de fonctionnement. Avec le temps, l'effet de la chaleur, de l'humidité et de l'oxygène provoque une dégradation progressive des matériaux isolants. Parmi les défauts les plus critiques, les décharges surfaciques occupent une place importante. Ces phénomènes, qui apparaissent sous forme de décharges électriques se propageant à la surface de l'isolant, peuvent détériorer progressivement le papier isolant et entraîner des défaillances importantes du transformateur.

Il devient donc indispensable de bien comprendre les mécanismes de vieillissement et de dégradation des systèmes d'isolation afin d'améliorer les méthodes de surveillance et de diagnostic. L'objectif principal est d'assurer la sécurité des équipements électriques, d'augmenter leur durée de vie et de garantir la fiabilité du réseau électrique.

Chapitre II

Méthodologie de mesure et

Traitement du signal

II.1. Introduction

Le phénomène des décharges surfaciques met en évidence la complexité ainsi que le caractère instable des courants électriques associés. Par conséquent, une simple observation des signaux dans le domaine temporel ne permet pas d'évaluer avec précision l'état de dégradation des isolants. Il devient alors nécessaire d'utiliser des méthodes d'analyse mathématique plus avancées.

Dans ce chapitre, nous présentons la méthodologie ainsi que les principaux algorithmes utilisés dans la chaîne de diagnostic intelligent développée. Dans un premier temps, la Transformée de Fourier Rapide (FFT) est appliquée afin d'effectuer une analyse globale du contenu fréquentiel des signaux mesurés.

Cependant, la FFT présente certaines limites dans le cas des signaux non stationnaires, notamment en matière de localisation temporelle des événements transitoires. Pour cette raison, la Transformée en Ondelette Discrète (DWT) est ensuite introduite afin de réaliser une analyse temps-fréquence plus précise et d'extraire efficacement les informations associées aux micro-décharges.

Enfin, compte tenu du grand nombre de paramètres extraits, l'algorithme de classification Random Forest est utilisé afin d'établir une relation entre les différents indicateurs obtenus et d'automatiser le diagnostic de l'état de santé du système d'isolation.

II.2. Fast fourrier transform FFT

II.2.1. Définition de la FFT

La FFT (Fast Fourier Transform), ou Transformée de Fourier Rapide, est un algorithme mathématique permettant de calculer efficacement la Transformée de Fourier Discrète (TFD) d'un signal numérique.

La TFD permet de transformer un signal du domaine temporel vers le domaine fréquentiel afin d'identifier les différentes composantes fréquentielles qui le constituent. Toutefois, le calcul direct de cette transformation nécessite un grand nombre d'opérations mathématiques. Pour un signal contenant (N) échantillons, la complexité de calcul peut atteindre un ordre de (N^2) .

Afin de réduire ce coût de calcul, l'algorithme FFT exploite certaines symétries et simplifications mathématiques dans la TFD. Grâce à cette optimisation, la complexité devient de l'ordre de $N \log_2 N$, ce qui diminue considérablement le temps de traitement.

Cette méthode permet ainsi d'analyser rapidement des signaux contenant un très grand nombre d'échantillons, pouvant atteindre plusieurs millions de points, tout en conservant une précision élevée dans l'analyse fréquentielle.

Cette relation illustre la réduction de la complexité de calcul obtenue grâce à l'algorithme FFT, permettant un traitement beaucoup plus rapide des signaux numériques par rapport à la Transformée de Fourier Discrète classique [34]:

$$O(N^2) \rightarrow O(N \log 2N) \quad (\text{II.1})$$

II.2.2. Fonction et Rôle

La fonction principale de la Transformée de Fourier Rapide (FFT) est de convertir un signal du domaine temporel vers le domaine fréquentiel. Tout signal complexe, qu'il s'agisse d'un signal acoustique, vibratoire ou électrique, peut être représenté comme une somme de plusieurs composantes sinusoïdales élémentaires, chacune caractérisée par une fréquence, une amplitude et une phase propres.

La FFT permet ainsi d'obtenir le spectre fréquentiel d'un signal, c'est-à-dire la répartition de son amplitude en fonction des différentes fréquences exprimées en Hertz (Hz). Cette transformation facilite l'identification des composantes fréquentielles dominantes présentes dans le signal analysé.

En pratique, la FFT peut être considérée comme une méthode de décomposition du signal en plusieurs fréquences élémentaires, de manière comparable à un prisme optique qui décompose la lumière en différentes couleurs [35].

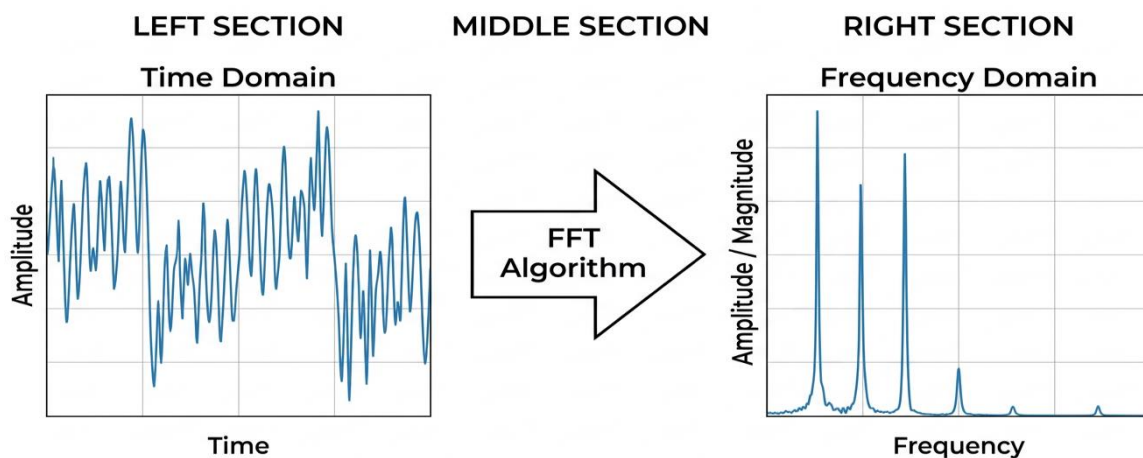


Figure II.1. Représentation conceptuelle de la Transformation de Fast Fourier FFT.

II.2.3. Applications et limites

La FFT est utilisée dans de nombreux domaines pour l'analyse des signaux. Elle permet notamment d'identifier les différentes composantes fréquentielles présentes dans un signal, qu'elles soient utiles ou considérées comme des perturbations.

Elle est particulièrement adaptée à l'étude des signaux stationnaires, c'est-à-dire des signaux dont le contenu fréquentiel varie peu au cours du temps. La FFT est également largement utilisée pour l'analyse des phénomènes de résonance ainsi que pour la détection des harmoniques dans les systèmes électriques et mécaniques.

Cependant, cette méthode présente une limitation importante. Bien qu'elle permette de déterminer les fréquences présentes dans un signal, elle ne fournit aucune information sur l'instant d'apparition de ces fréquences.

Par conséquent, la FFT demeure moins adaptée à l'analyse des signaux non stationnaires ou transitoires, tels que les impulsions générées par les décharges surfaciques, dont les caractéristiques évoluent rapidement dans le temps.

Cette équation représente la Transformée de Fourier, utilisée pour convertir un signal du domaine temporel vers le domaine fréquentiel afin d'identifier les différentes fréquences qui composent le signal [36].

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{II.2})$$

Dans cette expression mathématique :

- $X(f)$ représente la transformée de Fourier du signal dans le domaine fréquentiel.
- $x(t)$ désigne le signal original dans le domaine temporel.
- (f) correspond à la fréquence du signal exprimée en Hertz (Hz).
- (t) représente le temps.
- $e^{-j2\pi ft}$ est une fonction exponentielle complexe utilisée pour décomposer le signal en composantes fréquentielles.
- j représente l'unité imaginaire telle que $j^2 = -1$

II.2.4. Domaines d'application

La transformée de Fourier (FT) est largement utilisée dans les sciences de l'ingénieur en raison de son efficacité dans l'analyse fréquentielle des signaux.

Dans le domaine de l'électricité et des hautes tensions, elle permet d'évaluer la qualité de l'énergie électrique, de détecter les harmoniques présentes dans les réseaux ainsi que d'identifier les fréquences associées aux décharges électriques et aux défauts d'isolation.

En télécommunications, la transformée de Fourier intervient dans plusieurs techniques de modulation numérique, notamment l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), utilisée dans les technologies Wi-Fi ainsi que dans les réseaux 4G et 5G.

Dans le domaine du traitement du signal audio et de l'image, elle est employée pour la compression des données, comme dans les formats MP3 et JPEG, mais aussi pour le filtrage et l'amélioration des signaux sonores et visuels.

Enfin, dans le domaine médical, la transformée de Fourier est utilisée pour la reconstruction d'images en imagerie par résonance magnétique (IRM) ainsi que pour l'analyse de différents signaux physiologiques [37, 38].

II.3. Discret Wavelet Transform DWT

II.3.1. Définition de la DWT

La DWT (Discrete Wavelet Transform), ou Transformée en Ondelette Discrète, est une méthode d'analyse des signaux largement utilisée pour l'étude des phénomènes transitoires et non stationnaires.

Contrairement à la transformée de Fourier, qui repose sur des fonctions sinusoïdales continues, la DWT utilise des fonctions appelées ondelettes. Ces dernières sont des signaux de courte durée, localisés dans le temps, qui apparaissent brièvement avant de disparaître.

Le terme « discrète » signifie que l'analyse est réalisée numériquement sur des signaux échantillonnés, généralement selon des échelles basées sur des puissances de deux [39].

II.3.2. Fonction et Rôle

La Transformée en Ondelette Discrète (DWT) permet d'analyser un signal simultanément dans les domaines temporel et fréquentiel. Elle repose sur le principe de l'analyse multirésolution basé sur l'utilisation de filtres numériques.

Dans cette méthode, le signal initial est décomposé à l'aide de deux types de filtres complémentaires.

Le filtre passe-bas extrait les composantes lentes du signal, correspondant aux basses fréquences. Il fournit ainsi une approximation représentant la tendance générale du signal.

Le filtre passe-haut, quant à lui, permet d'extraire les composantes rapides associées aux hautes fréquences. Ces détails contiennent généralement les variations brusques, les impulsions et les perturbations présentes dans le signal.

La formulation mathématique générale de la Transformée en Ondelette Discrète peut être exprimée par la relation suivante :

$$DWT(j, k) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-k2^j}{2^j}\right) dt \quad (\text{II.3})$$

Dans cette expression mathématique :

- $x(t)$ représente le signal analysé dans le domaine temporel.
- ψ désigne l'ondelette mère utilisée pour l'analyse du signal.
- j correspond au facteur d'échelle associé au niveau de décomposition fréquentielle.
- k représente le paramètre de translation temporelle permettant de localiser le signal dans le temps.
- $DWT(j, k)$ correspond aux coefficients d'ondelettes obtenus après la transformation.
- Le terme $\frac{1}{\sqrt{2^j}}$ assure la normalisation de l'énergie du signal lors du changement d'échelle.

Le processus de décomposition est répété de manière successive uniquement sur les approximations obtenues à chaque niveau d'analyse, ce qui permet d'obtenir une représentation multirésolution du signal.

La relation suivante montre que le signal original peut être reconstruit à partir des coefficients d'approximation et de détail obtenus après la décomposition en ondelettes [40].

$$S = A_n + \sum_{i=1}^n D_i \quad (\text{II.4})$$

Dans cette relation :

- (S) représente le signal original reconstruit après la décomposition en ondelettes.
- A_n désigne les coefficients d'approximation au niveau n , associés aux basses fréquences du signal.
- (D_i) représente les coefficients de détail correspondant aux hautes fréquences à chaque niveau d'analyse.
- n correspond au nombre total de niveaux de décomposition effectués.
- Le symbole $(\sum)$ indique la somme des différents coefficients de détail obtenus aux différents niveaux de décomposition.

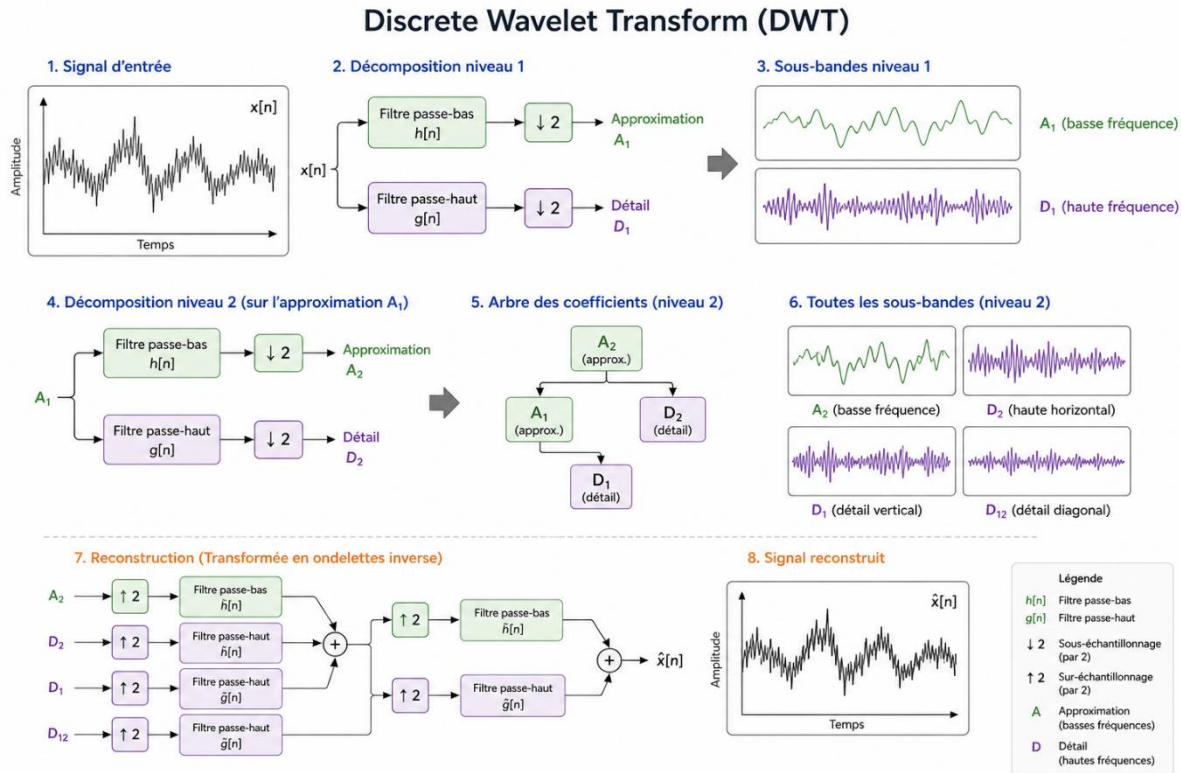


Figure II.2. Discret Wavelet transform DWT.

II.3.3. Avantages et comparaison avec la transformée de Fourier

Le principal avantage de la Transformée en Ondelette Discrète (DWT) réside dans sa capacité à localiser un signal simultanément dans les domaines temporel et fréquentiel. Elle permet ainsi d'obtenir des informations précises à la fois sur les fréquences présentes dans le signal et sur leur instant d'apparition.

Grâce à cette propriété, la DWT offre une bonne résolution fréquentielle pour les signaux de longue durée ainsi qu'une bonne résolution temporelle pour les phénomènes de courte durée. Cette approche est particulièrement adaptée à l'analyse des signaux non stationnaires et transitoires, contrairement à la Transformée de Fourier Rapide (FFT), qui ne fournit pas d'information temporelle précise.

Par exemple, lorsqu'une impulsion brève apparaît à un instant donné, la DWT permet non seulement d'identifier sa composante fréquentielle, mais également de déterminer précisément son instant d'apparition [41].

II.3.4. Calendrier d'application

Dans les domaines de l'ingénierie et de la recherche, la Transformée en Ondelette Discrète (DWT) est utilisée dans plusieurs applications importantes :

- Analyse des signaux non stationnaires : la DWT est particulièrement adaptée à l'étude des phénomènes transitoires, tels que les arcs électriques et les décharges surfaciques, caractérisés par des impulsions rapides et une énergie variable dans le temps.
- Intelligence artificielle et apprentissage automatique : les énergies extraites à partir des différents niveaux de décomposition de la DWT peuvent être utilisées comme paramètres d'entrée (features) pour l'entraînement des modèles de classification, notamment l'algorithme Random Forest.
- Réduction du bruit (débruitage) : la DWT permet de filtrer les signaux électriques tout en conservant les impulsions importantes. Cette opération est souvent réalisée grâce à la technique du seuillage en ondelettes (wavelet thresholding) [42].

II.3.5. Domaines d'application

Les applications de la DWT sont variées et permettent de mieux analyser des phénomènes complexes. On peut citer principalement :

- Électricité et haute tension (domaine concerné) : elle est utilisée pour détecter les décharges partielles, analyser les effets brusques de la foudre sur les lignes électriques, et repérer rapidement les défauts dans les transformateurs afin d'éviter les défaillances.
- Imagerie numérique : elle intervient dans la compression et le traitement des images, notamment dans le format JPEG 2000 utilisé en cinéma et en imagerie satellite. Elle permet de réduire la taille des fichiers tout en gardant une bonne qualité, sans apparition d'artefacts importants comme les anciens formats.
- Domaine médical : elle aide à analyser des signaux biologiques comme l'ECG (activité cardiaque) et l'EEG (activité cérébrale). Cela permet de détecter rapidement certaines anomalies comme les troubles cardiaques ou les crises neurologiques.
- Sismologie : elle sert à étudier les vibrations du sol lors des tremblements de terre et à mieux identifier les instants de rupture ou d'activité sismique avec une bonne précision temporelle [43].

II.4. Forêt Aléatoire (Random Forest)

II.4.1. Définition de la Forêt Aléatoire (Random Forest)

Le Random Forest est un algorithme d'apprentissage automatique (Machine Learning) utilisé aussi bien pour la classification que pour la régression. Il fait partie des méthodes dites

“d’ensemble”, ce qui signifie que la décision finale est obtenue à partir de plusieurs arbres de décision, souvent des dizaines voire des centaines, construits de manière indépendante [44].

II.4.2. Fonction et mécanisme (Comment ça marche)

Ce modèle fonctionne en prenant un ensemble de variables numériques issues des données en entrée, puis en les associant à une classe de sortie. Son principe repose sur deux éléments essentiels qui permettent de rendre les arbres de décision différents les uns des autres :

Chaque arbre est entraîné sur un échantillon différent des données initiales.

Chaque arbre n'utilise qu'une partie des variables disponibles en entrée.

À la fin du processus, chaque arbre donne son propre avis sous forme de “vote” pour une classe donnée. La prédiction finale correspond à la classe qui obtient le plus grand nombre de votes parmi tous les arbres [45].

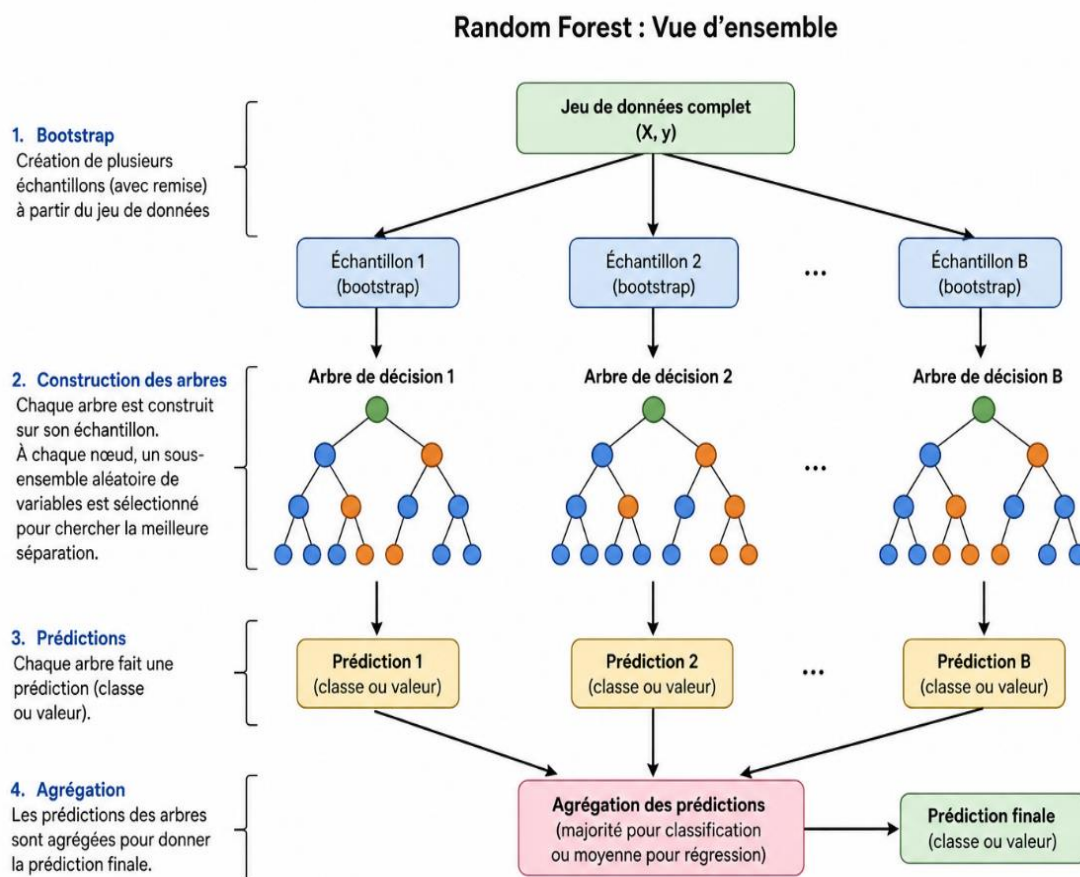


Figure II.3. Méthode de Random Forest.

II.4.3. Conditions d'utilisation et avantages

Il est souvent pertinent d'utiliser la Forêt Aléatoire plutôt que d'autres méthodes comme les réseaux de neurones ou les SVM dans certaines situations :

- Limitation du surapprentissage (overfitting) : un arbre de décision seul peut facilement "apprendre par cœur" les données d'entraînement, ce qui réduit ses performances sur de nouvelles données. En combinant plusieurs arbres dans une Forêt Aléatoire, les erreurs individuelles se compensent, ce qui rend le modèle plus stable et plus robuste.
- Interprétabilité relative du modèle : la Forêt Aléatoire permet d'estimer l'importance des variables d'entrée (feature importance). Cela aide à identifier quelles caractéristiques influencent le plus la décision finale.
- Bonne résistance au bruit : cette méthode supporte bien les données bruitées et les valeurs aberrantes, ce qui est particulièrement utile dans l'analyse de signaux expérimentaux électriques où le bruit est souvent présent [46].

II.4.4. Rôle dans notre travail

Dans notre démarche, la Forêt Aléatoire agit comme un classificateur intelligent.

Concrètement, une fois que la FFT a identifié les principales composantes fréquentielles et que la DWT a extrait l'énergie associée aux différentes bandes fréquentielles des décharges rapides (ces informations constituent les caractéristiques du signal), l'ensemble de ces données est transmis au modèle.

Son rôle est alors d'établir une relation entre ces paramètres et l'état réel de l'isolant. Par exemple, il peut distinguer plusieurs états :

- Classe 1 : décharge corona, généralement peu dangereuse
- Classe 2 : apparition de décharges de surface
- Classe 3 : dégradation avancée avec risque de cheminement électrique et d'arc de contournement

Ainsi, l'algorithme remplace l'analyse humaine directe. Une interprétation manuelle serait difficile et peu fiable face à la quantité de variables à traiter. La Forêt Aléatoire permet donc de différencier entre les différentes isolations mixtes (huile /papier) [47].

II.4.5. Domaines d'application

Grâce à sa flexibilité et à sa facilité d'implémentation, la Forêt Aléatoire est largement utilisée dans plusieurs domaines :

- Maintenance prédictive (domaine concerné) : elle permet d'anticiper les pannes sur les équipements électriques, de détecter les défauts dans les transformateurs et d'améliorer la surveillance des réseaux électriques intelligents (smart grids).
- Médecine : elle est employée pour analyser des images médicales (par exemple la détection de tumeurs) ainsi que pour aider au diagnostic à partir de données médicales complexes.
- Finance et banque : elle sert à identifier les fraudes en temps réel et à évaluer le risque de crédit dans les systèmes de scoring bancaire (credit scoring).
- Écologie et télédétection : elle est utilisée pour traiter les images satellites, notamment pour la classification de l'occupation des sols et le suivi des zones touchées par la déforestation [48].

II.5. Conclusion

Ce chapitre a comparé deux méthodes complémentaires pour la détection des décharges de surface : la Transformée de Fourier Rapide (FFT) et la Transformée en Ondelettes Discrète (DWT).

Basée sur une décomposition sinusoïdale, la FFT fournit une analyse globale du contenu fréquentiel. Simple et rapide pour des signaux stationnaires, elle échoue cependant à localiser les décharges transitoires dans le temps. En opposition, la DWT décompose le signal en échelles temporelles grâce à une ondelette mère. Son avantage majeur est une localisation temps-fréquence précise, idéale pour capturer des micro-décharges, mais son choix paramétrique (ondelette, niveaux de décomposition) reste délicat.

Ces deux approches alimentent un classificateur par forêt aléatoire (Random Forest), qui évalue automatiquement le niveau de dégradation de l'isolation. Cette chaîne de traitement mixte (FFT, DWT, apprentissage) constitue le socle théorique de l'analyse expérimentale présentée au chapitre suivant.

Chapitre III

Résultats expérimentaux et Discussion

III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la méthodologie mise en œuvre pour l'étude et l'analyse des décharges surfaciques dans les huiles isolantes. Dans un premier temps, le dispositif expérimental ainsi que les conditions de mesure sont décrits en détail, afin de situer le cadre dans lequel les signaux ont été acquis. Les signaux de courant obtenus pour les différentes huiles testées sont ensuite présentés et examinés.

Afin d'extraire les informations pertinentes contenues dans ces signaux, plusieurs techniques de traitement du signal ont été appliquées. Il s'agit notamment de la Transformée de Fourier Rapide (Fast Fourier Transform, FFT) et de la Transformée en Ondelettes Discrète (Discrete Wavelet Transform, DWT). Ces méthodes permettent d'analyser les signatures fréquentielles et temporelles des décharges, et de mettre en évidence des caractéristiques discriminantes entre les huiles.

Enfin, une approche de classification supervisée, fondée sur l'algorithme Random Forest, a été adoptée pour distinguer automatiquement les différents types d'huiles à partir des signaux mesurés. Les descripteurs retenus – tels que la fréquence du pic spectral issu de la FFT et l'énergie du signal dans le domaine fréquentiel – se sont révélés particulièrement pertinents. Leur utilisation a permis à l'algorithme Random Forest d'atteindre une classification correcte des échantillons, confirmant ainsi l'intérêt de l'approche proposée.

III.2. Procédure expérimentale

Dans la présente étude, les liquides investigués, la cellule d'essai et le générateur d'impulsions sont les mêmes que ceux utilisés dans [49]. Afin d'assurer la continuité, nous rappelons ici leurs principales caractéristiques.

La cellule d'essai est fabriquée en Téflon. Elle se compose d'un corps cylindrique de 112 mm de diamètre intérieur et de 80 mm de hauteur, muni d'un couvercle transparent en Plexiglas permettant la visualisation des streamers (Fig III. 1). Un système d'électrodes pointe-plan est utilisé. L'électrode plane est un disque en laiton de 40 mm de diamètre, tandis que l'électrode pointe est en tungstène, avec un rayon de courbure de $10 \pm 5 \mu\text{m}$. Un disque isolant en Téflon de 4 mm d'épaisseur, placé sur l'électrode plane, sert de barrière afin d'empêcher l'apparition du claquage et de protéger l'entrée de l'oscilloscope. Le rayon de courbure de l'électrode pointe est vérifié après chaque série d'essais (c'est-à-dire pour chaque type de liquide et chaque

distance inter-électrodes), et la pointe est remplacée dès qu'une érosion est observée. La distance inter-électrodes est fixée à 25 mm.

Un générateur de Marx à deux étages (200 kV – 2 kJ) est utilisé pour appliquer des tensions d'impulsion de foudre normalisées de polarités négative et positive, de forme 1,2/50 μ s. Une résistance de limitation de courant, placée en série avec la cellule d'essai, permet de réduire l'énergie dissipée lors du claquage. Les courants de streamer sont mesurés à l'aide d'une sonde de courant (Pearson Current Monitor 6585), connectée en série avec la cellule d'essai, et d'un oscilloscope Agilent MSO 6014A (1 GHz). Les liquides étudiés sont deux huiles d'origines différentes, notées huile (A) et huile (B).

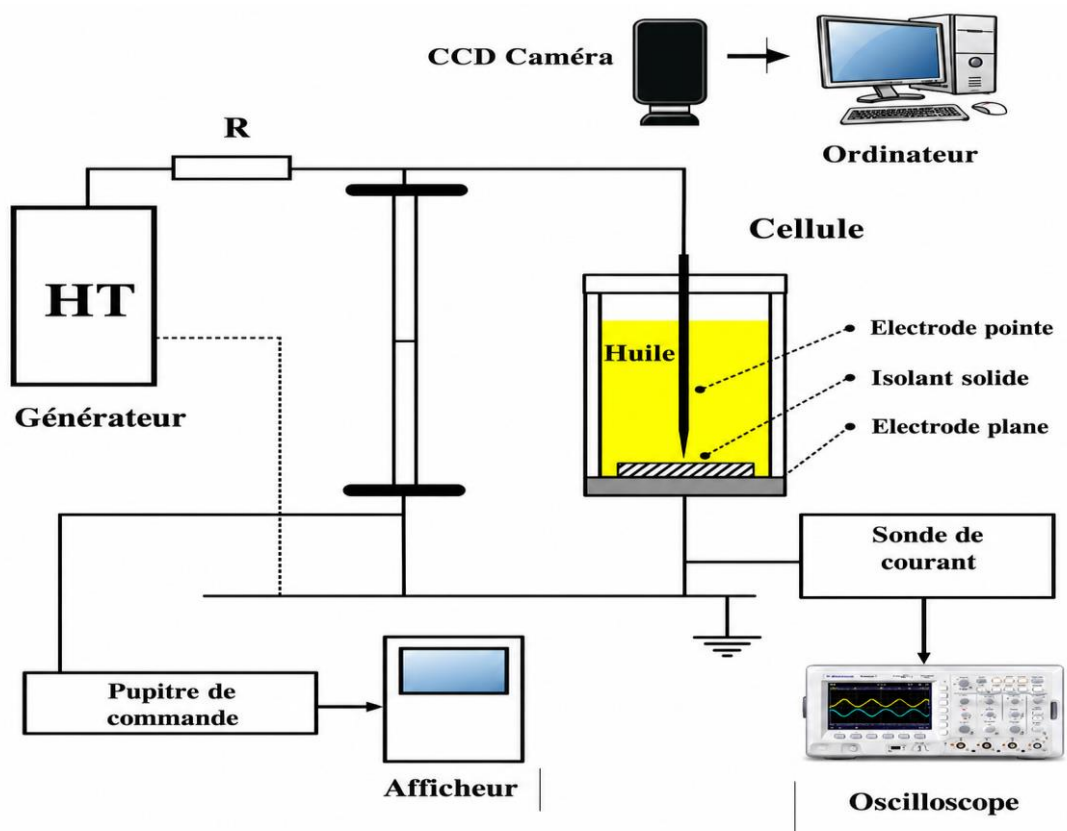


Figure III.1. Schéma du dispositif expérimental.

III.3. Présentation des signaux étudiés

Les essais ont porté sur deux huiles isolantes, respectivement notées Huile A et Huile B. La figure III.2 montre, à titre d'exemple, les signaux de courant associés aux décharges surfaciques. Ces signaux ont fait l'objet d'un traitement numérique visant à en extraire les caractéristiques fréquentielles et énergétiques.

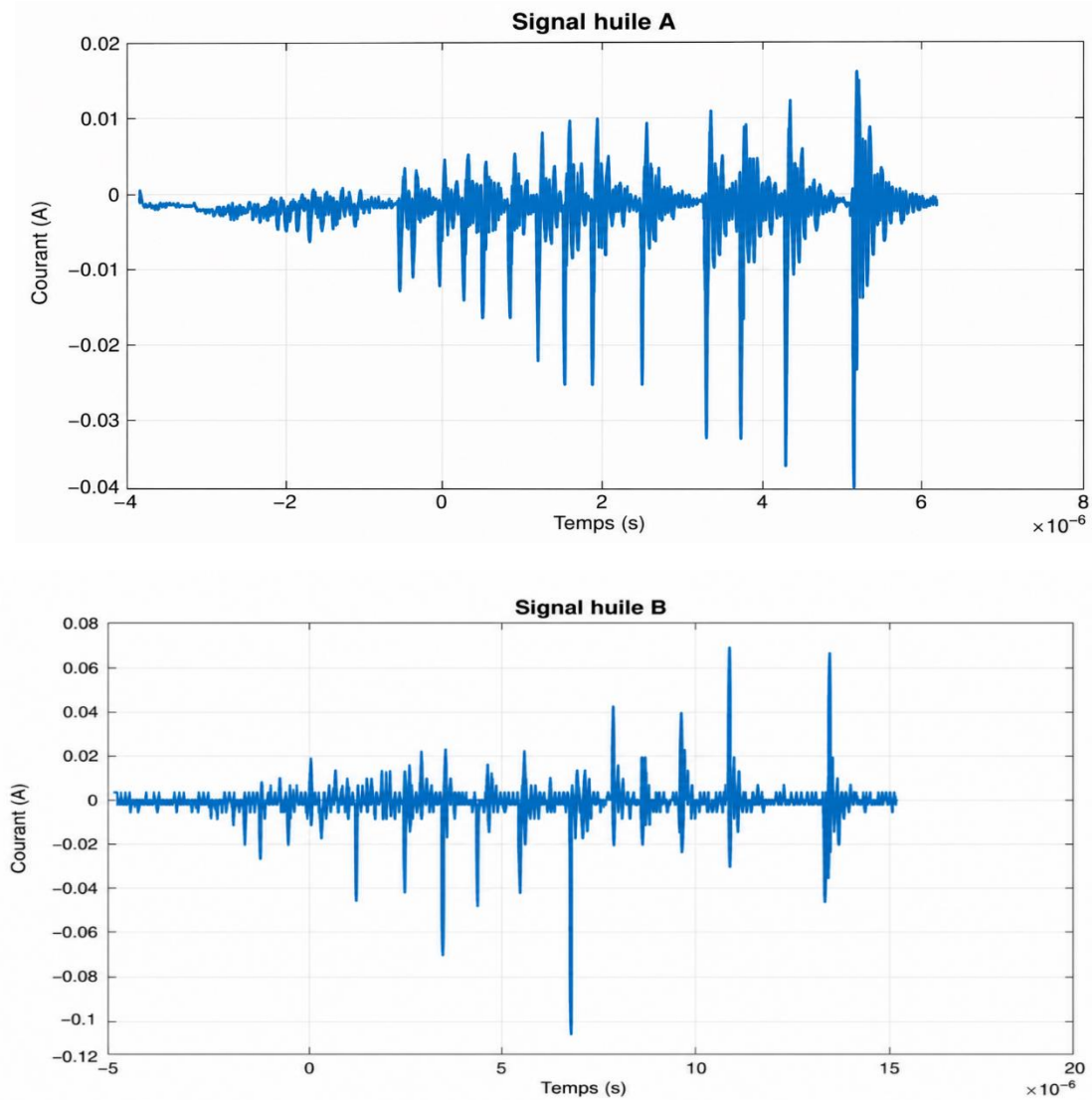


Figure III.2. Signaux de courant des décharges surfaciques pour les deux huiles.

III.4. Analyse fréquentielle par FFT

Résultats pour l'huile A :

L'analyse par FFT du signal obtenu avec l'huile A révèle la présence de plusieurs composantes fréquentielles réparties sur différentes bandes du spectre. Le pic principal est situé entre $1,20 \times 10^7$ et $1,38 \times 10^7$ Hz. La figure III.3 illustre un exemple de cette analyse spectrale appliquée au signal de courant de l'huile A.

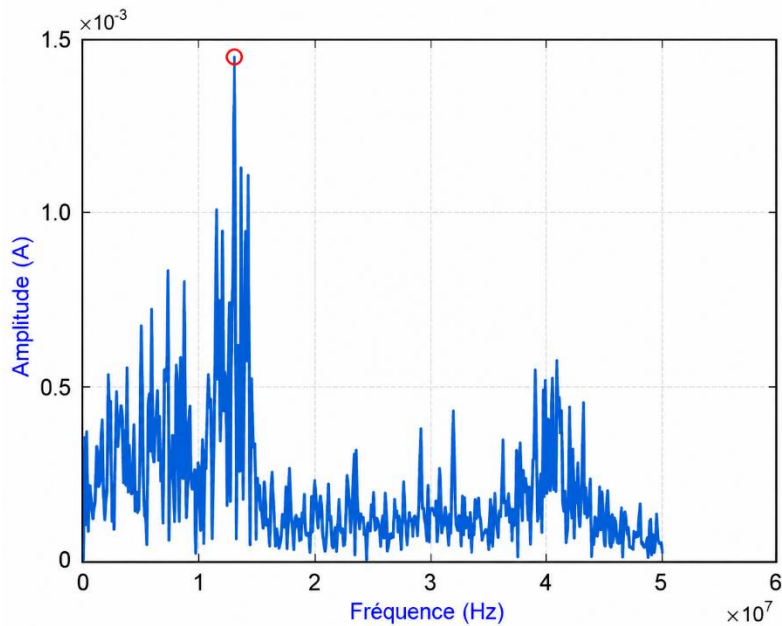


Figure III.3. Analyse FFT du signal obtenu avec l'huile A.

Résultats pour l'huile B :

Des résultats similaires ont été obtenus pour l'huile B, dont le spectre présente également plusieurs composantes fréquentielles réparties sur différentes bandes. Toutefois, le pic principal se situe dans une plage de fréquences différente de celle de l'huile A, à savoir entre $1,31 \times 10^7$ et $1,59 \times 10^7$ Hz. Par ailleurs, les amplitudes des pics sont plus élevées que celles observées pour l'huile A. Ces différences indiquent que chaque huile possède une signature fréquentielle qui lui est propre.

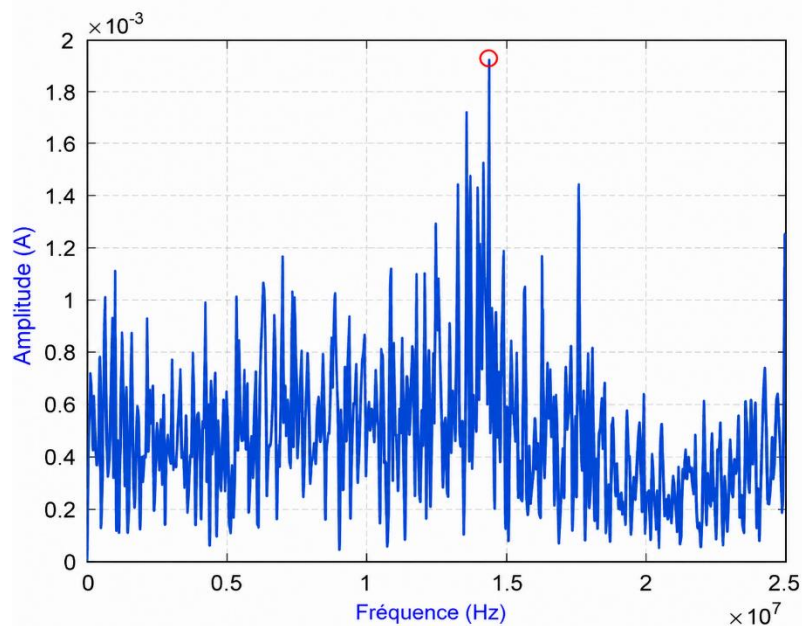


Figure III.4. Analyse FFT du signal obtenu avec l'huile B.

III.5. Analyse par Transformée en Ondelettes Discrète (DWT)

Le nombre de niveaux de décomposition retenu est de 5. Ainsi, dans le cadre de cette étude, une ondelette de Daubechies-4 avec 5 niveaux de décomposition sera employée pour l'analyse par transformée en ondelettes discrète (DWT) des différents courants. Les figures III.5 et III.6 illustre un exemple de décomposition des courants qui accompagnent la propagation des décharges surfaciques. La différenciation entre les divers courants repose sur l'observation et la comparaison de ces signaux. Le calcul de l'énergie propre associée à chaque niveau constitue un outil particulièrement efficace pour distinguer les différents signaux de courant.

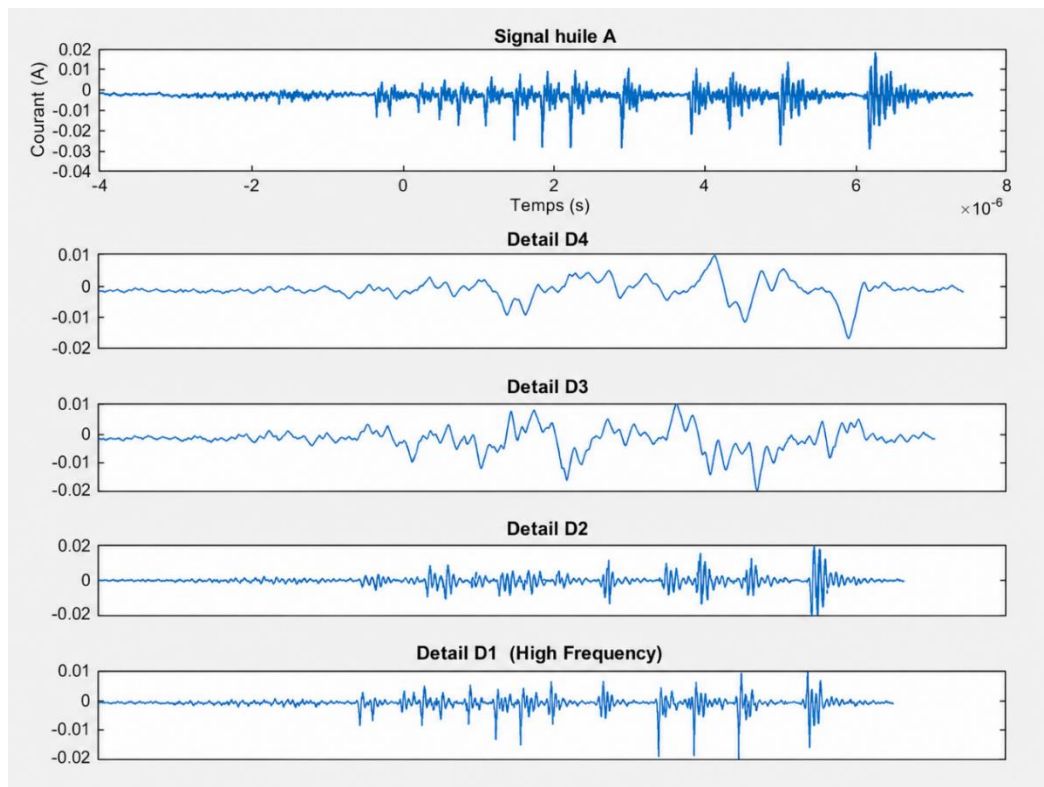


Figure III.5. Analyse par Transformée en Ondelettes Discrète (DWT) pour l'huile A.

Tableau III.1. Énergies des signaux.

Énergie du signal dans le domaine fréquentiel	$E_{\text{total}} = 0.020217$
Énergie de chaque niveau dans le domaine fréquentiel	
Fréquences basses	$E_{D4} = 0.002506$
Fréquences moyennes	$E_{D3} = 0.005398$
Fréquences moyennes-hautes	$E_{D2} = 0.006039$
Fréquences hautes	$E_{D1} = 0.004531$

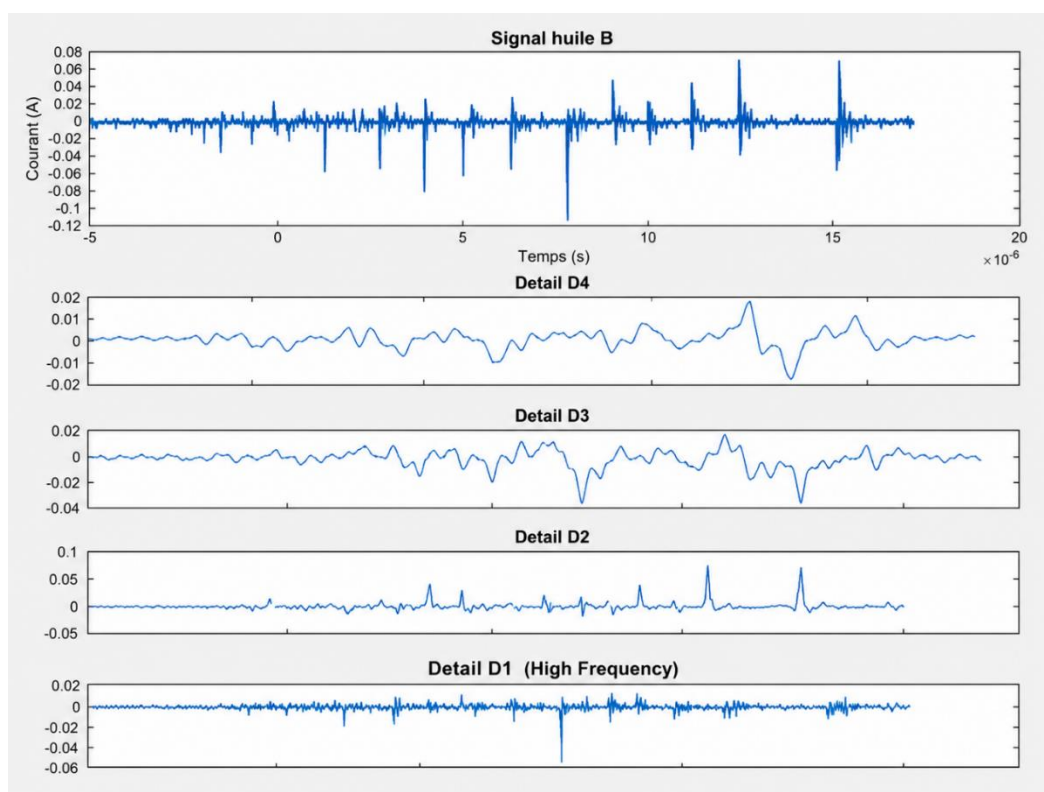


Figure III.6. Analyse par Transformée en Ondelettes Discrète (DWT) pour l'huile B.

Tableau III.2. Énergies des signaux.

Énergie du signal dans le domaine fréquentiel	$E_{\text{total}} = 0.081558$
Énergie de chaque niveau dans le domaine fréquentiel	
Fréquences basses	$E_{D4} = 0.003883$
Fréquences moyennes	$E_{D3} = 0.010316$
Fréquences moyennes-hautes	$E_{D2} = 0.030411$
Fréquences hautes	$E_{D1} = 0.005168$

Discussion DWT :

L'analyse par DWT montre que, de manière générale, l'énergie du signal est maximale dans le niveau de détail D1 et décroît progressivement avec les niveaux supérieurs (D2, D3, ...). Cela indique que les informations les plus pertinentes (transitoires rapides) sont contenues dans les premiers niveaux de détail, notamment D1.

Cependant, dans notre cas expérimental, les résultats montrent que la majorité de l'énergie est concentrée dans le niveau D2 pour l'huile B (0,030411), alors qu'elle n'est que de 0,006039 pour l'huile A au même niveau. Cette concentration plus élevée dans D2 (plutôt que D1) suggère que les décharges dans l'huile B présentent des composantes fréquentielles légèrement plus basses que celles attendues, mais surtout une intensité globale beaucoup plus grande. En effet, l'écart d'un facteur 5 entre les deux huiles confirme que les décharges observées dans l'huile B sont significativement plus énergétiques que celles de l'huile A.

Tableau III.3. Analyse statistique des signaux.

	Huile A	Huile B
$I_{\max}$	0.017721	0.066888
$I_{\min}$	-0.036966	-0.104988
I_{eff}	0.004448	0.009023

L'huile B présente des amplitudes de courant significativement plus élevées, ce qui confirme l'existence d'une activité de décharge plus importante.

III.6. Classification par Random Forest

Les caractéristiques extraites à partir des analyses FFT et DWT ont été utilisées comme variables d'entrée du modèle Random Forest pour la classification des signaux associés aux deux huiles isolantes étudiées. Cette approche supervisée vise à exploiter les informations fréquentielles et énergétiques afin d'assurer une discrimination efficace entre les différentes classes.

Afin d'évaluer les performances du modèle, plusieurs indicateurs de classification ont été considérés, notamment l'accuracy, la matrice de confusion ainsi que l'importance des caractéristiques. L'ensemble des résultats obtenus met en évidence une forte capacité de séparation entre les deux classes étudiées.

Le classificateur Random Forest a atteint une précision de 100 %, indiquant une classification parfaite de l'ensemble des échantillons disponibles. Cette performance reflète la pertinence des descripteurs extraits ainsi que l'efficacité de la méthodologie adoptée pour l'analyse des décharges surfaciques.

Par ailleurs, la matrice de confusion permet une analyse détaillée des prédictions en comparant les classes réelles aux classes estimées. Elle confirme l'absence d'erreurs de classification et met en évidence la robustesse du modèle dans le contexte étudié.

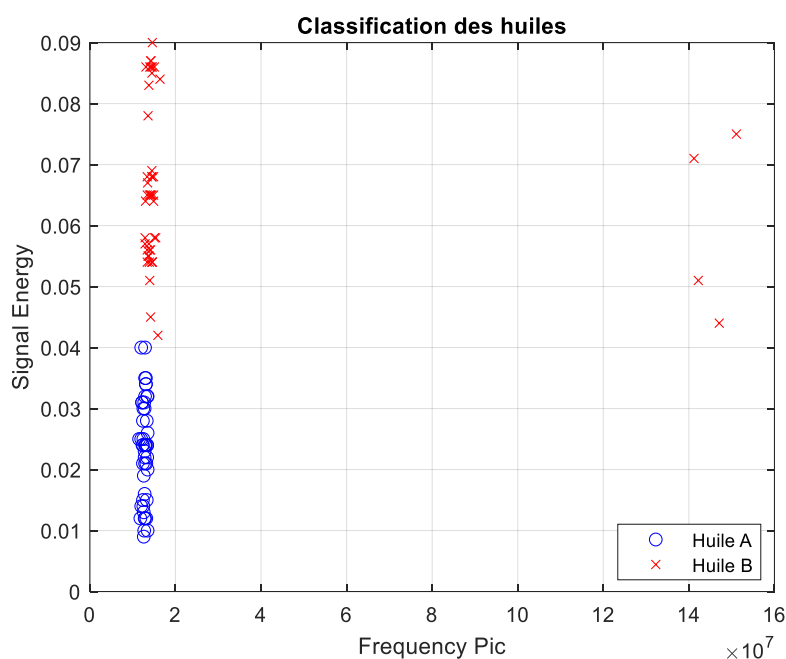


Figure III.7. Représentation des données classifiées par Random Forest.

La représentation graphique montre une séparation nette entre les deux classes étudiées. Les échantillons appartenant à l'huile A et à l'huile B occupent des régions distinctes dans l'espace des caractéristiques, ce qui facilite leur classification par l'algorithme Random Forest.

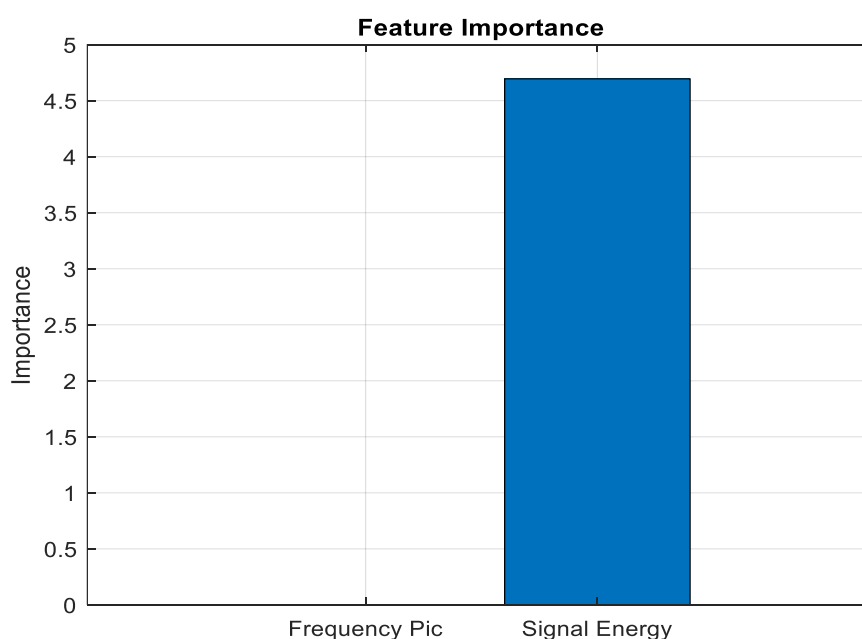


Figure III.8. Importance des caractéristiques obtenue par Random Forest.

L'analyse de l'importance des caractéristiques révèle que l'énergie du signal constitue le paramètre le plus influent dans le processus de classification. À l'inverse, la fréquence dominante présente une contribution relativement faible.

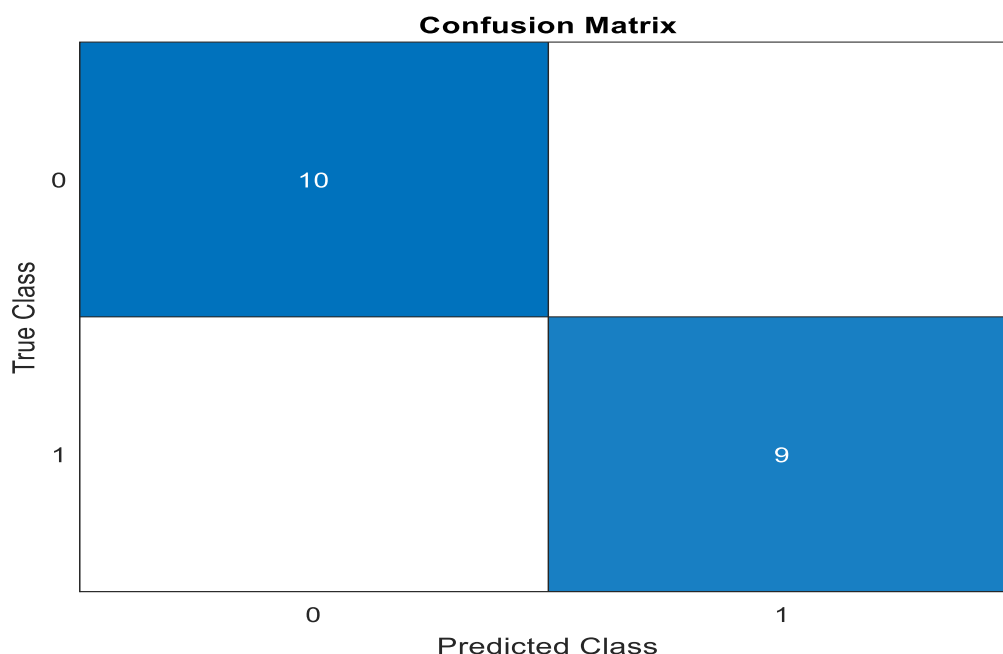


Figure III.9. Matrice de confusion obtenue avec l'algorithme Random Forest.

La matrice de confusion montre que tous les échantillons ont été correctement classifiés. Les 10 échantillons de la classe 0 ainsi que les 9 échantillons de la classe 1 ont été reconnus sans erreur, ce qui conduit à une précision globale de 100 %.

III.7. Validation du modèle

Afin d'évaluer la capacité prédictive du modèle Random Forest, plusieurs indicateurs statistiques ont été utilisés, notamment le coefficient de détermination (R^2), la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur absolue moyenne (MAE).

Tableau III.4. Performances du modèle Random Forest pour l'huile A.

Huile A	R-squared (R^2)	Mean Squared Error (MSE)	Root Mean Squared Error (RMSE)	Mean Absolute Error (MAE)
70%	0.6577	0,000027	0.0052	0.0036
80%	0.8123	0,000007	0.0027	0.0020
90%	0.7748	0,000018	0.0042	0.0036

Tableau III.5. Performances du modèle Random Forest pour l'huile B.

Huile B	R-squared (R^2)	Mean Squared Error (MSE)	Root Mean Squared Error (RMSE)	Mean Absolute Error (MAE)
70%	0.8993	0,000015	0.0039	0.0032
80%	0.8130	0,000019	0.0043	0.0030
90%	0.9465	0,000008	0.0029	0.0028

L'analyse des performances du modèle Random Forest, évaluées à travers les coefficients de détermination (R^2) et les erreurs de prédiction (RMSE et MAE), révèle des comportements distincts entre l'huile A et l'huile B, en fonction du pourcentage de données allouées à l'apprentissage.

Pour l'huile A, les résultats montrent une nette amélioration des performances lorsque la proportion d'entraînement passe de 70 % à 80 %. En effet, le R^2 bondit de 0,6577 à 0,8123, tandis que le RMSE diminue de 0,0052 à 0,0027, indiquant que le modèle gagne à la fois en pouvoir explicatif et en précision. Cette progression suggère qu'un volume de données plus important permet au modèle de mieux saisir les relations sous-jacentes, probablement complexes, caractérisant cette huile. En revanche, le passage à 90 % d'entraînement entraîne une dégradation des indicateurs, avec un R^2 retombant à 0,7748 et un RMSE remontant à 0,0042. Cette contre-performance, contre-intuitive, peut s'expliquer par une réduction trop importante de l'échantillon de test (10 % seulement), rendant l'évaluation plus sensible à la présence éventuelle de valeurs atypiques ou à une variabilité aléatoire. Ainsi, pour l'huile A, le compromis optimal semble se situer à un découpage de 80 % en apprentissage et 20 % en test, garantissant à la fois une bonne généralisation et une évaluation fiable.

Pour l'huile B, la tendance est différente et globalement plus favorable. Dès 70 % d'entraînement, le modèle affiche un R^2 remarquable de 0,8993, traduisant une excellente capacité à expliquer la variance de cette huile, avec des erreurs de prédiction déjà très faibles (RMSE de 0,0039). Ce niveau de performance précoce indique que l'huile B possède une structure de données plus régulière ou plus linéaire, donc plus accessible pour l'algorithme. À 80 %, on observe une baisse inattendue du R^2 à 0,8130, accompagnée d'une légère augmentation du RMSE. Cette fluctuation est très probablement due à un tirage aléatoire défavorable des ensembles d'apprentissage et de test, plutôt qu'à une réelle dégradation du

modèle. Enfin, à 90 %, le modèle atteint son apogée avec un R^2 de 0,9465 et un RMSE minimal de 0,0029, confirmant que l'augmentation du volume d'apprentissage profite pleinement à la prédiction de l'huile B. Ce résultat suggère que, pour cette huile, la stratégie la plus performante consiste à consacrer la plus grande partie des données à l'entraînement.

En comparant les deux huiles, on constate que l'huile B est systématiquement mieux prédite que l'huile A, quel que soit le découpage considéré. Ses R^2 , toujours supérieurs à 0,81 et atteignant près de 0,95, témoignent d'une modélisation nettement plus aisée. L'huile A, en revanche, semble présenter une variabilité intrinsèque plus élevée ou des relations plus non linéaires, rendant sa prédiction plus exigeante en termes de données et de réglage. Par ailleurs, les erreurs absolues et quadratiques restent, dans tous les cas, d'un ordre de grandeur très faible (inférieur à 0,005), ce qui valide la précision du modèle Random Forest pour ces deux applications.

En conclusion, ce double bilan met en évidence l'importance du choix du découpage entraînement/test, qui n'est pas neutre et doit être adapté à chaque jeu de données. Pour l'huile A, un découpage à 80 % est recommandé, tandis que pour l'huile B, un découpage à 90 % est préférable.

III.8. Conclusion

L'application du modèle Random Forest à la prédiction des propriétés des huiles A et B a donné des résultats globalement très satisfaisants, avec des erreurs de prédiction faibles (RMSE inférieur à 0,005) et des coefficients de détermination atteignant jusqu'à 0,95 pour l'huile B.

Cependant, les performances varient selon l'huile et le découpage des données. L'huile A atteint son meilleur compromis à 80 % d'entraînement ($R^2 = 0,8123$), tandis que l'huile B donne ses meilleurs résultats à 90 % ($R^2 = 0,9465$), démontrant une plus grande robustesse et une structure mieux maîtrisée. La baisse observée à 90 % pour l'huile A souligne l'importance d'un échantillon de test suffisamment représentatif.

En définitive, le Random Forest s'avère être un outil performant pour cette application, et il est recommandé, pour de futurs travaux, de procéder à une validation croisée afin de renforcer la fiabilité des résultats et d'optimiser les hyperparamètres du modèle.

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

La détection précoce des décharges surfaciques dans les systèmes d'isolation des transformateurs de puissance représente un enjeu stratégique pour la fiabilité des réseaux électriques. Les courants de streamers, générés par ces décharges, portent une information riche sur l'état de dégradation du diélectrique, mais leur nature transitoire et non stationnaire rend leur analyse particulièrement délicate par les méthodes conventionnelles. Face à ce constat, ce travail de recherche a proposé une approche innovante combinant le traitement avancé du signal et l'intelligence artificielle, afin de développer un outil de diagnostic performant et non invasif.

La méthodologie mise en œuvre repose sur l'extraction de deux descripteurs clés à partir des signaux de courants de streamers : l'énergie des sous-bandes fréquentielles, obtenue par Transformée en Ondelettes Discrète (DWT), et le pic de fréquence, issu de la Transformée de Fourier Rapide (FFT). Ces deux grandeurs, choisies pour leur capacité à capturer à la fois les caractéristiques spectrales globales et les singularités temporelles des décharges, ont été injectées dans un classificateur Random Forest. L'évaluation de l'importance des variables a d'ailleurs confirmé la prépondérance de l'énergie comme prédicteur le plus discriminant, validant scientifiquement le choix de ce descripteur.

Les résultats expérimentaux, obtenus sur deux fluides diélectriques distincts (Huile A et Huile B), ont démontré l'efficacité remarquable de cette approche. Le modèle Random Forest a atteint une exactitude de classification de 100 %, attestant de sa capacité à distinguer parfaitement les courants de streamers selon le type d'huile et l'état de dégradation. Cette performance parfaite souligne la pertinence des descripteurs choisis et la puissance du classificateur pour cette application spécifique.

Au-delà de la classification, l'analyse quantitative des performances régressives du modèle a apporté un éclairage complémentaire sur la modélisation des propriétés des huiles. Pour l'Huile A, les meilleures performances ont été obtenues avec un découpage de 80 % des données pour l'entraînement, atteignant un coefficient de détermination (R^2) de 0,8123 et une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 0,0027. Ce résultat, bien qu'honorable, traduit une certaine complexité intrinsèque de ce fluide, nécessitant un volume de données conséquent pour une modélisation fiable. L'Huile B, en revanche, s'est révélée plus robuste et plus facile à modéliser, avec un R^2 culminant à 0,9465 et un RMSE de 0,0029 pour un découpage de 90 %. Cette différence de comportement entre les deux huiles met en évidence l'importance d'une

caractérisation fine des fluides diélectriques, dont les propriétés influencent directement la signature des courants de streamers et, par conséquent, la performance des modèles prédictifs.

La comparaison systématique des deux huiles révèle que l'Huile B est significativement mieux prédite que l'Huile A, quels que soient les paramètres considérés. Cette disparité peut s'expliquer par une structure de données plus régulière pour l'Huile B, ou par une sensibilité accrue de l'Huile A au bruit expérimental et aux fluctuations aléatoires. Quoi qu'il en soit, les valeurs d'erreur (RMSE et MAE) restent très faibles dans tous les cas, confirmant la pertinence du choix du modèle Random Forest pour ce type de problématique.

La complémentarité entre les performances de classification (accuracy parfaite) et les indicateurs régressifs (R^2 élevés et erreurs faibles) atteste de la fiabilité et de la robustesse de la chaîne de diagnostic proposée. Elle démontre que l'énergie et le pic de fréquence constituent des descripteurs suffisamment discriminants pour caractériser les courants de streamers et distinguer les différents types d'huile, ouvrant ainsi la voie à une utilisation opérationnelle de l'intelligence artificielle pour le diagnostic en temps réel des transformateurs de puissance.

En somme, ce travail de recherche confirme la viabilité d'une approche de diagnostic intelligent combinant traitement du signal et apprentissage automatique, et pose les bases d'un système de maintenance prédictive pour les infrastructures électriques. L'intégration future de l'intelligence artificielle dans les systèmes de surveillance des transformateurs permettrait non seulement de détecter précocement les décharges surfaciques, mais aussi d'anticiper leur évolution et de planifier les interventions de maintenance de manière optimisée, réduisant ainsi les risques de panne et les coûts associés.

Afin de prolonger la portée de ces travaux et de concrétiser cette vision, plusieurs perspectives de recherche peuvent être envisagées :

1. **Élargissement de la base de données** à une plus large gamme de fluides diélectriques, incluant des huiles neuves, usagées et des mélanges, afin de renforcer la généralisation du modèle et de le rendre opérationnel dans des conditions industrielles variées.
2. **Optimisation des hyperparamètres** du modèle Random Forest par des techniques avancées (Grid Search, Bayesian Optimization) couplées à une validation croisée systématique, pour améliorer encore la stabilité des prédictions, en particulier pour l'Huile A dont la modélisation s'avère plus exigeante.

3. **Intégration de données multisources** (température, humidité, pression, vibrations) pour enrichir le vecteur d'entrée et affiner le diagnostic en conditions opérationnelles réelles, où les perturbations externes peuvent masquer les signatures de décharge.
4. **Exploration d'architectures d'apprentissage profond** (réseaux de neurones convolutifs, réseaux de neurones récurrents) pour le traitement direct des signaux temporels, permettant d'extraire automatiquement des caractéristiques pertinentes sans recourir à une extraction manuelle de descripteurs.
5. **Déploiement embarqué d'un système temps réel** utilisant l'intelligence artificielle pour le diagnostic autonome des transformateurs en service. À terme, l'intégration de l'apprentissage fédéré pourrait permettre une amélioration continue des modèles à partir des données collectées sur l'ensemble du parc de transformateurs, sans compromettre la confidentialité des données opérationnelles.
6. **Développement d'une interface de surveillance intuitive** destinée aux opérateurs de maintenance, intégrant des indicateurs de confiance et des alertes prédictives, afin de faciliter la prise de décision et d'optimiser la gestion du parc de transformateurs.

Ces perspectives, combinées aux résultats prometteurs obtenus dans ce travail, dessinent les contours d'une future génération d'outils de diagnostic intelligent, capables d'assurer une surveillance continue et autonome des transformateurs de puissance, contribuant ainsi à la sécurisation et à la résilience des réseaux électriques.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] M. Bouakouk and R. Hadjebar, *Diagnostic des transformateurs de puissances*, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algeria, Sep. 2014.
- [2] LS Transformer, “The importance of transformer insulation system,” [Online]. Available: [LS Transformer](#). [Accessed: May 18, 2026].
- [3] N. Mezari, “Diagnostic des transformateurs de puissances,” Mémoire de magister, Département d’Électrotechnique, Université de Tizi Ouzou, Algeria, Jul. 2011.
- [4] A. Beneddine and F. Ben Mamer, “Étude des essais normalisés des transformateurs de puissance MT/BT,” Master thesis, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algeria, Jun. 2016.
- [5] IEEE, *IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*, IEEE Std., 2022....
- [6] Total Energies, “Le transformateur électrique, pièce maîtresse du réseau,” Dec. 4, 2018. [Online]. Available: [TotalEnergies](#)
- [7] N. Hamraoui and F. Badache, “Identification des Décharges et Diagnostic des Transformateurs de Puissance,” Mémoire de Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj, Algeria.
- [8] O. H. Arroyo Fernández, “Thèse présentée à l’Université du Québec à Chicoutimi en vue de l’obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.) en ingénierie,” Ph.D. dissertation, Université du Québec à Chicoutimi, Canada, Nov. 2017.
- [9] A. Omrani, “Protection et maintenance des transformateurs dans l’unité industrielle,” Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, Algeria, 2019.
- [10] A. Beneddine and F. Ben Mamer, “Étude des essais normalisés des transformateurs de puissance MT/BT,” Master thesis, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algeria, Jun. 2016.
- [11] J. S. N’Cho, “HAL Id: tel-00627891,” Sep. 29, 2011. [Online]. Available: [HAL Thesis Archive](#)
- [12] A. D. Nitakin Gabani and A. O. El-Baha Serkou, “Analyse d’huile d’un transformateur de puissance,” Institut des Sciences et Techniques Appliquées, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algeria.

Références bibliographiques

- [13] I. Fofana, Y. Zié, and M. Farzaneh, “Dielectric response methods for diagnostics of power equipment,” in *Recent Advances in Dielectric Materials*, A. Huang, Ed. Nova Science Publishers, 2009.
- [14] A. D. Nitakin Gabani and A. O. El-Baha Serkou, “Analyse d’huile d’un transformateur de puissance,” Institut des Sciences et Techniques Appliquées, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algeria.
- [15] C. T. Dyu, “Propriétés diélectriques de liquides isolants d’origine végétale pour applications en haute tension,” Ph.D. dissertation, Université Joseph Fourier Grenoble 1, France, Jan. 2009.
- [16] D. Cherry, “Insulating Fluids: An Overview of Dielectric Fluids Used in Transformers,” Principal Consulting Scientist for Dielectric Fluids, Oct. 29, 2009.
- [17] K. Dumke, H. Borsi, and E. Gockenbach, “Experimental investigation on the behaviour of decomposition gases in insulating liquids caused by partial discharge,” in *Proc. 12th Int. Conf. Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids (ICDL)*, Rome, Italy, Jul. 1996.
- [18] I. Lounnas and S. Larbi, “Étude des caractéristiques de l’huile minérale de transformateur,” Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algeria.
- [19] A. Reffas, “Étude des Décharges Électriques dans les Huiles Isolantes Végétales,” Ph.D. dissertation, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Algeria, Mar. 2018.
- [20] J. Vergne, “Étude du vieillissement physico-chimique du complexe papier-huile dans les transformateurs électriques,” Ph.D. dissertation, INPT, France, 1992.
- [21] M. Talhi Bouri, “Contribution à l’étude du phénomène d’électrisation par écoulement dans les transformateurs de puissance,” Ph.D. dissertation, Université d’Oran Mohamed Boudiaf, Algeria, 2018.
- [22] IEC Committee, *Evaluation and Qualification of Electrical Insulation Systems*, Tech. Rep. 98/60 505/ed.2, 1998.
- [23] Working Group 09 of CIGRE Study Committee 12, “Lifetime Evaluation of Transformers,” *Electra*, vol. 150, pp. 38–52, Oct. 1993.

- [24] O. H. Arroyo Fernández, “Thèse présentée à l’Université du Québec à Chicoutimi en vue de l’obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.) en ingénierie,” Ph.D. dissertation, Université du Québec à Chicoutimi, Canada, Nov. 2017.
- [25] A. Betie, “Impacts de la qualité du système d’isolation sur la condition et l’efficacité des transformateurs de puissance,” Université du Québec, Canada, Sep. 2015.
- [26] R. Fournié, *Les isolants en électrotechnique : Essais, mécanismes de dégradation, applications industrielles*. Paris, France: Eyrolles, 1990.
- [27] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*, 2nd ed. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [28] H. C. Miller, “Surface flashover of insulators,” *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 5, pp. 765–786, 1989.
- [29] S. Kumara, Y. V. Serdyuk, and S. M. Gubanski, “Surface charge decay on polymeric insulators under different environmental conditions,” 2010.
- [30] L. Kebbabi, “Caractérisation des décharges glissantes se propageant aux interfaces liquide/solide sous différentes formes de tension – Relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale,” Ph.D. dissertation, École Centrale de Lyon, Lyon, France, 2006.
- [31] R. Bartnikas, “Partial discharges: Their mechanism, detection, and measurement,” 2002.
- [32] A. Cavallini, G. C. Montanari, A. Contin, and F. Pulzoni, “Advanced PD inference in on-line measurements,” 2003.
- [33] W. J. K. Raymond, H. A. Illias, A. H. A. Bakar, and H. Mokhlis, “Partial discharge classification: A review of recent progress,” 2015.
- [34] J. W. Cooley and J. W. Tukey, “An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series,” *Math. Comput.*, vol. 19, no. 90, pp. 297–301, 1965.
- [35] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, 3rd ed. Pearson, 2010.
- [36] S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press, 1999.
- [37] J. G. Proakis and D. K. Manolakis, *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*, 4th ed. Pearson, 2006.
- [38] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering Fundamentals*, 2nd ed. Newnes, 2000.

- [39] I. Daubechies, “The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis,” 1990.
- [40] S. G. Mallat, “A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation,” 1989.
- [41] O. Rioul and M. Vetterli, “Wavelets and signal processing,” 1991.
- [42] D. L. Donoho, “De-noising by soft-thresholding,” 1995.
- [43] L. Satish and B. Nazneen, “Wavelet-based denoising of partial discharge signals buried in excessive noise and interference,” 2003.
- [44] L. Breiman, “Random forests,” *Machine Learning*, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, 2001.
- [45] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning*. Springer, 2009.
- [46] A. Liaw and M. Wiener, “Classification and regression by randomForest,” 2002.
- [47] W. J. K. Raymond, H. A. Illias, A. H. A. Bakar, and H. Mokhlis, “Partial discharge classification: A review of recent progress,” 2015.
- [48] M. Fernández-Delgado, E. Cernadas, S. Barro, and D. Amorim, “Do we need hundreds of classifiers to solve real world classification problems?,” *J. Mach. Learn. Res.*, 2014.
- [49] U. Mohan Rao, I. Fofana, T. Jaya, E. M. Rodriguez-Celis, J. Jalbert and P. Picher, "Alternative Dielectric Fluids for Transformer Insulation System: Progress, Challenges, and Future Prospects," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 184552-184571, 2019.
- [50] A. Reffas, H. Moulai and A. Beroual, "Comparison of dielectric properties of olive oil, mineral oil, and other natural and synthetic ester liquids under AC and lightning impulse stresses," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 5, pp. 1822-1830, Oct. 2018.