



MÉMOIRE
PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR :
AMIDOU BETIE

CONTRIBUTION A L'AMÉLIORATION DE L'INTERPRÉTATION DES TECHNIQUES
DE DIAGNOSTIC DES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE PAR
SPECTROSCOPIE DIÉLECTRIQUE

DÉCEMBRE 2012

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein de la chaire de recherche du Canada (CRC) sur les Isolants Liquides et Mixtes en Electrotechnologie (ISOLIME). Ce projet s'arrime avec l'un des axes de recherche de la CRC relatif au développement d'outils de diagnostic modernes pour la surveillance des appareils des réseaux d'énergie.

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à mon directeur de recherche, le professeur Issouf FOFANA, titulaire de la chaire ISOLIME pour avoir encadré et orienté mes travaux. Son investissement et sa disponibilité à travers ses nombreuses réflexions et interrogations ainsi que les discussions que nous avons échangées, m'ont permis non seulement d'évoluer dans les meilleures conditions, mais ont été les moteurs de ce travail. Je lui suis très reconnaissant pour son soutien et la confiance qu'il m'a témoignée ainsi que pour ses grandes qualités humaines.

Mes remerciements vont également à mes co-directeurs à savoir: Le Professeur YEO Zié, Maître de Conférences à l'Institut National Polytechnique Félix HOUPHOUET-BOIGNY de Yamoussoukro (CÔTE d'IVOIRE), qui malgré toutes ses occupations n'a ménagé aucun effort pour codiriger ce travail et le Docteur Fethi Meghnefi, chercheur à ISOLIME et professeur associé à l'UQAC pour sa disponibilité, son appui professionnel et technique, ainsi que sa contribution à l'avancement de ce travail de recherche.

Les membres du comité d'évaluation me font l'honneur d'accepter de sanctionner mes travaux, qu'ils en soient ici remerciés.

Un grand remerciement à tous mes collègues chercheurs et les étudiants-stagiaires du laboratoire ISOLIME pour la superbe ambiance, favorable au travail que nous avons su créer au sein et en dehors du cadre de travail.

Je voudrais adresser mes remerciements à toute ma famille pour le soutien moral et les encouragements tout au long de mes études en générale, mais particulièrement pour la maîtrise en ingénierie.

Je tiens enfin à exprimer mes sincères remerciements à mon épouse, Djeneba, pour son inconditionnel soutien et ses encouragements.

RÉSUMÉ

Les transformateurs de puissance sont les équipements les plus importants et les plus coûteux utilisés dans le transport et la distribution de l'énergie électrique. Malgré de grands progrès dans la conception des équipements de puissance ces dernières années, le maillon faible de la chaîne reste encore le système d'isolation. Lorsque les transformateurs de puissance tombent en panne, la défaillance est généralement due à un défaut d'isolement. Les défaillances imprévues provoquent d'importantes perturbations des systèmes d'exploitation. Ce qui entraîne des pannes subites et des problèmes de livraison d'énergie. Une fiabilité extrême est exigée de la distribution dans la mesure où en cas de panne, ils conduisent inévitablement à des coûts de réparation élevés, les temps d'arrêt à long et éventuels risques de sécurité du personnel. De plus, les aspects environnementaux tels que les dommages indirects, les incendies et la pollution sont à haut risques.

Les besoins croissants en outils appropriés pour le diagnostic de l'isolation des systèmes de puissance, de manière non destructive et fiable, ont conduit au développement d'outils de diagnostic tels que la mesure dans le domaine des fréquences (FDS), au cours de ces dernières années. Cette technique s'est révélée être sensible à l'humidité et l'isolation du vieillissement, c'est-à-dire qu'avec cette technique, il est difficile de prédire l'état réel de l'isolation solide d'un transformateur de puissance et partant d'estimer sa durée de vie résiduelle. Le présent projet de recherche vise à améliorer cette situation.

À ce titre, l'objectif principal visé est la séparation de l'effet de l'humidité et du vieillissement sur l'isolation solide des transformateurs de puissance à partir des mesures diélectriques réalisés dans le domaine fréquentiel. À cet objectif principal, a été ajouté un objectif secondaire relatif à la transformation des mesures effectuées dans le domaine temporel en fréquentiel. Le but ultime est de réduire considérablement le temps des tests effectués par la technique FDS.

Pour mener à bien cette étude, nous avons essayé de reproduire les conditions d'utilisation du papier dans les transformateurs en effectuant des vieillissements accélérés sur des échantillons de papiers imprégnés d'huile dans un four à convection à 115°C

pendant des durées de 250, 500, 750 et 1000 heures. L'analyse des résultats, a permis de constater qu'il est possible de trouver une corrélation entre le degré de polymérisation (DP) qui indique l'état de dégradation réel du papier et les mesures du facteur de dissipation ($\tan\delta$) indiquant l'état global de l'isolation des transformateurs de puissance. En effet, l'analyse des résultats a permis de montrer qu'il est possible de séparer l'effet du vieillissement et de l'humidité de l'isolation solide pour des teneurs en humidité inférieures ou égales à 2%, en analysant les valeurs du facteur de dissipation aux basses fréquences de 1 mHz à 0,1 mHz.

Afin de faciliter et surtout d'automatiser l'analyse des données relatives aux mesures effectuées dans le domaine fréquentiel par le IDA 200, nous avons utilisé les réseaux de neurones en tant qu'outil d'aide à la prise de décision qui permettra d'obtenir rapidement les résultats concernant l'état de l'isolation solide (papier). Ainsi, après le prétraitement réalisé par l'analyse statistique, puis l'apprentissage et la validation du traitement d'un réseau de neurones, nous avons pu obtenir en sortie les informations concernant le classement des données des mesures en fonction de l'humidité et du vieillissement. Cette analyse, réalisée par l'utilisation des réseaux de neurones a également permis d'obtenir la séparation de l'humidité et du vieillissement pour des taux d'humidité inférieurs à 2%.

Concernant le deuxième objectif, nous avons montré qu'il est possible de réduire le temps des mesures effectuées dans le domaine fréquentiel, en effectuant les mesures dans le domaine temporel par la mesure des courants de polarisation et de dépolarisation (PDC) convertis dans le domaine fréquentiel en utilisant la méthode de la décomposition en somme de fonctions exponentielles. Par cette technique, nous avons réduit le temps des tests de 15 heures à environ 2 heures 30 minutes.

Mots clés: Transformateurs de puissance, papier, papier imprégné, isolation solide, isolation liquide, vieillissement, température, humidité, réponse diélectrique, degré de polymérisation.

ABSTRACT

Power transformers are the most important and most expensive equipment used in transport and distribution of electrical energy. Despite major advances in the design of power equipment in recent years, the weak link in the chain remains the insulation system. When power transformers fail, this is usually due to an insulation fault. Unexpected failures cause significant disruption of operating systems, causing unscheduled outages and problems of energy delivery. Extreme reliability is required for distribution to the extent that in case of failure, they inevitably lead to costly repairs, downtime and long possible security risks staff. In addition, environmental aspects such as indirect damage, fires and pollution are at high risk.

The increasing need for appropriate tools for the diagnosis of insulation systems of power to non-destructively and reliably led to the development of diagnostic tools such as the measurement in the frequency domain (FDS), the recent years. This technique was found to be sensitive to moisture and insulation aging, that is to say that with this technique it is impossible to predict the real state of the solid insulation of a transformer power and hence to estimate its remaining life.

The present research project aims at closing some gaps in our basic knowledge on the dielectric spectroscopic techniques. The main goal is to emphasize the separation between the effect of moisture and aging on the oil paper insulation using frequency domain dielectric measurements. In addition to this main objective, the transformation of measurements performed in time domain to frequency domain with the aim of significantly reducing testing time will be investigated.

To carry out this study, accelerated aging tests were conducted on oil impregnated paper insulation used in transformers. The samples of paper were impregnated with oil in a convection oven at 115° C for extended period of 250, 500, 750 and 1000 hours. The analysis of the results showed that it is possible to find a correlation between the degree of polymerization (DP) which indicates the real degradation condition of the paper and the dissipation factor ($\tan\delta$), indicating the overall condition of the insulation. Indeed, the analysis of the results showed that it is possible to separate the effect of aging and

moisture of the solid insulation for moisture contents lower than 2%, by analyzing the values of dissipation factor at low frequencies from 1 to 0,1 mHz.

In order to facilitate, and especially automate the analysis of (data relating to measurements) in the frequency domain, we used neural networks as a tool for decision making which allowed predicting quickly the condition of solid impregnated insulation (paper). After pretreatment performed by statistical analysis, followed by learning and validation of a neural network treatment, we were able to obtain output information concerning the classification of measurement data according to moisture and aging. This analysis also yielded that, it may be possible to obtain the separation of moisture and aging effects, for moisture content below 2%.

Regarding the second objective, we have shown that it is possible to reduce the measurements time in the frequency domain, by performing measurements in the time domain and converting them into frequency domain using the decomposition method based on a sum of exponential functions. By this technique, we reduced the testing time from 15 hours to about 2 and half hours.

Keywords: Power transformers, paper, impregnated paper, solid insulation, insulating liquid, aging, temperature, humidity, dielectric response, degree of polymerization.

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Réseau d'alimentation.....	3
Figure 2: Vue interne d'un transformateur	16
Figure 3: Une partie de la section transversale d'un système d'isolation des transformateurs de puissance.....	22
Figure 4: Les étapes de l'oxydation d'huile.	22
Figure 5: Système d'isolation des enroulements d'un transformateur.	23
Figure 6: Motif élémentaire d'une cellulose	24
Figure 7: Courbes d'Oommen de l'équilibre de l'humidité entre le papier et l'huile.	28
Figure 8: Interaction entre les différentes contraintes et le système d'isolation du transformateur	30
Figure 9: État de la dégradation du papier en fonction du DP	32
Figure 10: La polarisation moléculaire	36
Figure 11: Polarisation d'un matériau diélectrique	37
Figure 12: Influence des différents types de polarisation sur ϵ' et ϵ''	42
Figure 13: Représentation du facteur de puissance et du Facteur de dissipation diélectrique	48
Figure 14: Circuit RC parallèle.	50
Figure 15: Circuit RC série.	51
Figure 16: Schéma de principe de la méthode PDC	52
Figure 17: Courbes typiques de courant de polarisation et de dépolarisation	53
Figure 18: Interprétation des données de mesurée PDC	55
Figure 19: Schéma de principe de la mesure RVM	56
Figure 20: Courbes typiques des différentes étapes du processus de la mesure RVM [.....	57
Figure 21: Exemple de courbe RVM	59
Figure 22: Schéma de principe de la mesure dans le domaine fréquentiel	60
Figure 23: Courbe du facteur de dissipation en fonction de la fréquence	61
Figure 24: Comparaison des différentes méthodes	73
Figure 25: Titreur Coulométrique Karl Fisher pour la mesure de la teneur en eau....	80
Figure 26: Système de diagnostic d'isolation IDA 200 pour la mesure du facteur de dissipation et de la conductivité.....	82
Figure 27: Cellule de mesure du papier.	82
Figure 28: Unité de contrôle de la température - type 2967.....	83
Figure 29: CANNON-FENSKE Viscometers.....	84
Figure 30: Évolution de la $\tan\delta$ en fonction de l'humidité pour un papier neuf.	87

Figure 31: Évolution de la $\tan\delta$ en fonction de l'humidité pour un papier vieilli à 250 h.....	88
Figure 32: Évolution de la $\tan\delta$ en fonction de l'humidité pour un papier vieilli à 1000 h.	88
Figure 33: Évolution du déphasage en fonction de l'humidité pour un papier neuf..	89
Figure 34: Évolution du déphasage en fonction de l'humidité pour un papier vieilli à 250 h.	90
Figure 35: Évolution du déphasage en fonction de l'humidité pour un papier vieilli à 1000 h.	90
Figure 36: Évolution de la $\tan\delta$ en fonction du vieillissement pour une humidité de 0,5%.	92
Figure 37: Évolution de la $\tan\delta$ en fonction du vieillissement pour une humidité de 2,0%.	92
Figure 38: Évolution de la $\tan\delta$ en fonction du vieillissement pour une humidité de 5,0%.	93
Figure 39: Évolution du déphasage en fonction du vieillissement pour une humidité de 0,5%.	94
Figure 40: Évolution du déphasage en fonction du vieillissement pour une humidité de 2,0%.	94
Figure 41: Évolution du déphasage en fonction du vieillissement pour une humidité de 5,0%.	95
Figure 42: Évolution de la $\tan\delta$ en fonction de la température et de l'humidité.	97
Figure 43: Évolution du déphasage en fonction de la température et de l'humidité.	97
Figure 44: Tangente Delta en fonction de l'humidité à 60 Hz.....	100
Figure 45: Tangente Delta en fonction de l'humidité à 1 Hz.....	101
Figure 46: Tangente Delta en fonction de l'humidité à 0,01 Hz.	101
Figure 47: Tangente delta à 0,1 mHz en fonction du vieillissement et de l'humidité pour 0 h.	103
Figure 48: Tangente delta à 0,1 mHz en fonction du vieillissement et de l'humidité pour 250 h.	103
Figure 49: Tangente delta à 0,1 mHz en fonction du vieillissement et de l'humidité pour 500 h.	104
Figure 50: Tangente delta à 0,1 mHz en fonction du vieillissement et de l'humidité pour 750 h.	104
Figure 51: Tangente delta à 0,1 mHz en fonction du vieillissement et de l'humidité pour 1000 h.	105
Figure 52: Tangente delta à 0,1 mHz en fonction du vieillissement et de l'humidité.	105
Figure 53: Tangente delta et facteur de puissance en fonction du vieillissement et de l'humidité pour un papier neuf.....	108

Figure 54: Tangente delta et facteur de puissance en fonction du vieillissement et de l'humidité pour un papier vieilli à 1000 heures.....	108
Figure 55: Rapport FP/ $\tan\delta$ en fonction de l'humidité pour un papier neuf.	109
Figure 56: Rapport FP/ $\tan\delta$ en fonction de l'humidité pour un papier de 1000 heures.	110
Figure 57: Rapport FP/ $\tan\delta$ en fonction du vieillissement pour un papier sec.	110
Figure 58: Rapport FP/ $\tan\delta$ en fonction du vieillissement pour un papier humide.	111
Figure 59: Aire entre $\tan\delta$ et FP en fonction de l'humidité et du vieillissement.	113
Figure 60: Courbes du rapport du facteur de dissipation ($\tan\delta$) et du facteur de puissance en fonction de l'humidité et du vieillissement.	115
Figure 61: Architecture d'un neurone.	118
Figure 62: Architecture d'un réseau de neurones à 3 couches.	119
Figure 63: Comparaison entre l'humidité mesurée et l'humidité estimée du déphasage.	129
Figure 64: Comparaison entre l'humidité mesurée et l'humidité estimée du rapport FP/ $\tan\delta$	130
Figure 65: Comparaison entre l'humidité mesurée et l'humidité estimée de la $\tan\delta$	130
Figure 66: Comparaison entre l'humidité mesurée et l'humidité estimée du facteur de puissance.	131
Figure 67: Comparaison entre l'humidité mesurée et l'humidité estimée de la combinaison facteur de puissance et déphasage.	131
Figure 68: Modèle de Debye pour les diélectriques linéaires [37].	135
Figure 69: Schéma de mesure du courant de polarisation.	137
Figure 70: Courant de polarisation mesuré dans le domaine temporel [48].	137
Figure 71: courant de polarisation estimé dans le domaine temporel.	140
Figure 72: courant de polarisation estimé et mesuré dans le domaine temporel. ...	141
Figure 73: Impédance Z mesurée et estimée dans le domaine fréquentiel.	143
Figure 74: Déphasage mesuré et estimé dans le domaine fréquentiel.	143

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Paramètres mesurés et appareils utilisés.....	8
Tableau 2: Permittivité relative de quelques matériaux.....	18
Tableau 3: Illustration schématique des différents mécanismes de polarisation[21].....	39
Tableau 4: Résultats de la mesure du degré de polymérisation.....	86
Tableau 5: Facteur de dissipation en fonction du vieillissement et de l'humidité à 60 Hz.....	99
Tableau 6: Facteur de dissipation en fonction du vieillissement et de l'humidité à 1 Hz.....	99
Tableau 7: Facteur de dissipation en fonction du vieillissement et de l'humidité à 0,01 Hz.....	100
Tableau 8: Facteur de dissipation en fonction du vieillissement et de l'humidité à 0,1 mHz.....	102
Tableau 9: Valeurs du rapport du facteur de dissipation ($\tan\delta$) et du facteur de puissance en fonction de l'humidité et du vieillissement.....	114
Tableau 10: Différents tests utilisés dans cette étude.....	121
Tableau 11: Base de données utilisée pour l'apprentissage.....	125
Tableau 12: Base de données utilisée pour la validation.....	126
Tableau 13: Résultats du test de validation.....	128
Tableau 14: Coefficient de détermination des différents paramètres.....	132

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

ISOLIME	Isolants Liquides et Mixtes en Electrotechnologie
FDS	Frequency Domain Spectroscopy
PDC	Polarization and Depolarization Currents
RVM	Return Voltage Measurements
DP	Degré de polymérisation
ASTM	American Society for Testing and Materials
IDA	Insulation Diagnostic Analyser
HPLC	High-performance liquid chromatography
$\tan\delta$	facteur de dissipation
Argz	Argument de l'impédance z
Fp	Facteur de puissance
Wrel	Humidité relative (%).
Wabs	Humidité absolue (ppm)
WL(T)	limite de la saturation
δ	Angle de perte.
σ	Conductivité (S/m).
ρ	Résistivité (Ωm).
ϵ_0	permittivité du vide = $8,85 \times 10^{-12}$ F/m
ϵ_r	permittivité relative ou la constante diélectrique d'un matériau
ϵ'	Constante diélectrique ou permittivité relative.
ϵ''	Partie imaginaire de la permittivité complexe
χ	Susceptibilité électrique du matériau
R_p	Résistance du circuit parallèle équivalent du diélectrique (Ω).
R_s	Résistance du circuit série équivalent du diélectrique (Ω).
T	Température ($^{\circ}\text{C}$).
C0	Capacité à vide (F).
C_p	Capacité du circuit parallèle équivalent du diélectrique (F).
C_s	Capacité du circuit série équivalent du diélectrique (F)
f	Fréquence (Hz).
CO	Monoxyde de carbone.
CO ₂	Dioxyde de carbone.
H ₂ O	formule brute de l'eau.
H ₂	Hydrogène.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	i
RÉSUMÉ	ii
ABSTRACT	iv
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES	x
TABLE DES MATIÈRES.....	xi
CHAPITRE 1	1
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 INTRODUCTION	1
2 PROBLEMATIQUE	3
3 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	5
3.1 Le premier objectif spécifique.....	5
3.2 Le deuxième objectif spécifique	6
4 MÉTHODOLOGIE	6
4.1 Séparation de l'humidité et du vieillissement du papier	7
4.2 Conversion des mesures effectuées dans le domaine temporel au domaine fréquentiel.....	9
5 ORGANISATION DU MÉMOIRE.....	10
6 ORIGINALITÉ ET AVANTAGES.....	11
CHAPITRE 2	13
REVUE DE LITTÉRATURE.....	13
2.1 Introduction	13
2.2 Présentation générale des transformateurs de puissance.....	14
2.2.1 Constitution des transformateurs de puissance.....	14
2.2.2 Présentation de l'isolation des transformateurs de puissance.....	16
2.3 Étude du phénomène de la polarisation des matériaux diélectriques.....	35
2.3.1 Polarisation statique	35

2.3.2	Différents types de polarisation.....	38
2.3.3	Fonction de réponse d'un diélectrique dans le domaine du temps	42
2.3.4	Expression des courants de polarisation et de dépolarisation	44
2.3.5	Fonction de réponse d'un diélectrique dans le domaine des fréquences.....	46
2.3.6	Facteur de dissipation diélectrique ou pertes diélectriques	47
2.3.7	Circuit équivalent d'une isolation en courant alternatif.....	49
2.4	Les mesures diélectriques des courants de polarisation et de dépolarisation	52
2.4.1	Les mesures dans le domaine du temps	52
2.5	État de l'art des travaux rapportés dans la littérature	61
2.5.1	Séparation de l'humidité et du vieillissement du papier	61
2.5.2	Conversion des mesures effectuées dans le domaine temporel au domaine fréquentiel.....	69
2.5.3	Conclusion	75
CHAPITRE 3		78
MATÉRIELS ET MÉTHODES DE MESURES		78
3.1	Introduction	78
3.2	Mesure de l'humidité.....	79
3.3	Préparation des échantillons	80
3.4	Mesure du facteur de dissipation diélectrique.....	81
3.5	Mesure du degré de polymérisation (DPv).....	83
3.6	Conclusion.....	84
CHAPITRE 4		85
ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS		85
4.1	Mesure du degré de polymérisation du papier	85
4.2	Effet de l'humidité.	86
4.3	Effet du vieillissement.....	91
4.4	Effet de la température	96
4.5	Analyse du facteur de dissipation en fonction de la fréquence	99
4.6	Effet de l'humidité et du vieillissement sur le rapport entre facteur de puissance et le facteur de dissipation	107
4.7	Effet de l'humidité et du vieillissement sur l'aire comprise entre la tangente delta et facteur de puissance.....	112

4.8 Effet de l'humidité et du vieillissement sur le rapport entre facteur de dissipation et le facteur de puissance.....	114
4.8.1 Analyse des valeurs du rapport du facteur de dissipation ($\tan\delta$) et du facteur de puissance en fonction de la fréquence à 0,1 mHz.	114
4.9 Conclusion.....	116
CHAPITRE 5	117
PRÉDICTION PAR RÉSEAUX DE NEURONES.....	117
5.1 Introduction	117
5.2 Vue d'ensemble des réseaux de neurones.....	118
5.3 Présentation de la base de données.....	120
5.4 Mise en œuvre du réseau	123
5.4.1 Le prétraitement	123
5.4.2 L'apprentissage.....	123
5.4.3 La validation	125
5.5 Constitution du réseau de neurone utilisé	127
5.6 Présentation des résultats	127
5.7 Analyse des résultats et conclusion	132
CHAPITRE 6	133
CONVERSION DES MESURES EFFECTUÉES DANS LE DOMAINE TEMPOREL AU DOMAINE FRÉQUENTIEL.....	133
6.1 Introduction	133
6.2 Modélisation du papier imprégné des transformateurs par le modèle étendu de Debye.....	134
6.3 Principe	136
6.4 Estimation du courant de polarisation mesuré	138
6.5 Détermination de l'expression de l'impédance du diélectrique.	141
6.6 Conclusion et analyse des résultats.....	143
CHAPITRE 7	145
CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS.....	145
7.1 Conclusions générales.....	145
7.2 Recommandations pour les travaux futurs	149
7.2.1 Impact du vieillissement sur les mesures diélectriques.....	149

7.2.2	Influence de l'imprégnation sur la dégradation du papier	149
7.2.3	Reconnaissance du vieillissement pas les réseaux de neurones	150
BIBLIOGRAPHIE.....		151

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1 INTRODUCTION

De nos jours, garantir aux utilisateurs une énergie sûre et disponibilité dans les meilleures conditions est le souci majeur de tous les producteurs et les distributeurs de l'énergie électrique. Une rupture de la production de l'énergie entraînera toujours, pour les producteurs et les distributeurs, des conséquences extrêmement coûteuses [1, 2].

Il s'agit donc pour les producteurs et les distributeurs d'énergie électrique de disposer d'équipements de production, de transport et de distribution extrêmement fiables. Parmi ces équipements, les transformateurs de puissance sont non seulement les organes vitaux des réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique mais également les plus coûteux : En termes d'investissement, ces équipements représentent près de 60 % du prix d'un poste de transformation et les coûts associés à leur réparation ou à leur remplacement lorsqu'une panne survient, se comptent souvent en millions de

dollars [1, 2]. Ils sont utilisés pour la conversion et le maintien du flux de puissance. Sur les réseaux électriques, les transformateurs sont utilisés dans les niveaux suivants :

- À la sortie des centrales où la tension est élevée pour la transmission;
- Dans les postes d'interconnexion ou de répartition;
- Dans les sous station de distribution où la tension est réduite pour être adaptée à la tension de la distribution;
- Dans les postes de distribution où la tension est réduite pour être adaptée au niveau de la tension d'utilisation des entreprises et des résidences (voir figure 1) [3].

Bien que leur durée de vie excède souvent les 30 ans, les défaillances peuvent survenir et ce en fonction des conditions d'utilisation et d'exploitation. Les principales causes de pannes des transformateurs sont les suivantes : Foudre/surtension, courant de fuite, détérioration des isolants, maintenance inadéquate, humidité, mauvaise connexion, défaut de fabrication, surcharges.

Ces différentes causes des pannes des transformateurs sont principalement dues à une défaillance du système d'isolation qui par la même occasion a une influence significative sur leur durée de vie.

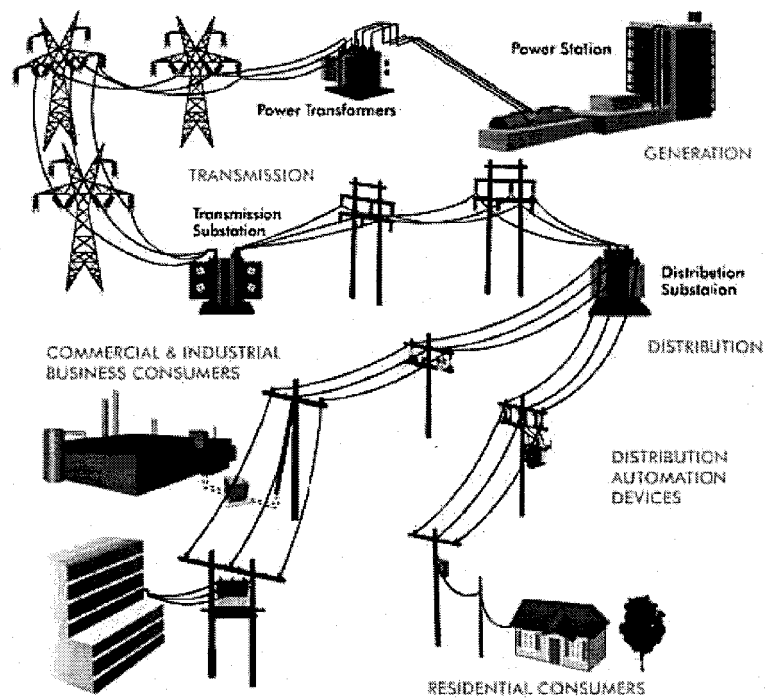


Figure 1: Réseau d'alimentation.

2 PROBLEMATIQUE

Sachant que la durée de vie des transformateurs de puissance à isolation papier/huile est rigoureusement limitée par la durée de vie de l'isolation papier des enroulements, il s'avère nécessaire de mettre en place des moyens de surveillance de l'isolation des transformateurs à partir des mesures et des analyses des différents facteurs caractéristiques des isolants liquides (huile) et solides (papier). Ces mesures permettront de disposer de données nécessaires à la prise des décisions, à savoir si :

- Le remplacement ou le traitement de l'huile est nécessaire pour cause de vieillissement, de présence d'humidité, de gaz dans le transformateur ou de sous produits liés à la dégradation de l'huile et du papier,
- Un séchage du transformateur est nécessaire pour cause de présence d'humidité dans le papier isolant,
- Le transformateur doit tout simplement être ré-bobiné.

À ce niveau se pose les problèmes suivants :

- 1) Pour connaître l'état de l'huile d'un transformateur, on en prélève un échantillon, sans démonter le transformateur et on le fait analyser en laboratoire. Mais-en ce qui concerne le papier, le processus du contrôle de son état est beaucoup plus complexe du fait qu'il faut d'abord mettre le transformateur hors tension puis procéder à son démontage afin d'en prélever un échantillon qui sera ensuite analysé: Ce processus est très couteux car en plus des désagréments causés par la coupure de l'énergie électrique, il faut prendre en compte les frais de démontage et remontage.
- 2) Il existe deux techniques de diagnostic des isolants liquide et solide par la spectroscopie diélectrique à savoir les mesures effectuées dans le domaine temporel et celles effectuées dans le domaine fréquentiel. Les mesures effectuées dans le domaine fréquentiel permettent d'obtenir des informations globales

concernant le taux d'humidité et l'état du vieillissement de l'isolation papier aux très basses fréquences, ce qui nécessite un temps extrêmement long d'environ 15 heures (uniquement pour une mesure). Évidemment, cette opération entraîne l'immobilisation du transformateur pendant un temps; ce qui n'est pas acceptable par une unité de production.

3 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Cette étude vise à améliorer l'interprétation de la spectroscopie diélectrique pratiquée sur les transformateurs de puissance pour en faire un outil de diagnostic capable de donner des informations fiables et précises sur l'état de la dégradation de l'isolation solide. Les informations qui découleraient de ces études permettront de prévenir les pannes et d'évaluer la durée de vie résiduelle dans le cadre de la gestion de la durée de vie d'un transformateur installé.

L'atteinte de cet objectif principal reposera sur les objectifs spécifiques suivants :

3.1 Le premier objectif spécifique

Ce premier objectif intermédiaire peut être ainsi défini : Création d'une base de données fiable à partir des mesures effectuées par la technique FDS (Frequency Domain Spectroscopy), sur des échantillons de papier (diélectriques solide) dont le niveau de dégradation est contrôlé au laboratoire par un vieillissement accéléré.

Le but de ce premier objectif est de trouver une corrélation entre ces mesures FDS, que l'on peut effectuer sans le démontage du transformateur, et le degré de polymérisation (DP) qui indique l'état de vieillissement du papier. Ainsi, après avoir effectué une mesure FDS, sur des équipements électriques de puissance, on pourra avoir une information claire sur l'état de dégradation du papier isolant.

3.2 Le deuxième objectif spécifique

Le second objectif spécifique concernera la conversion des mesures effectuées dans le domaine temporel au domaine fréquentiel. Il s'agit ici d'élaborer des techniques qui nous permettront de pouvoir à partir des mesures effectuées dans le domaine temporel par la technique PDC (Polarization Depolarization Current), de convertir et d'exporter ces mesures vers la technique FDS (domaine fréquentiel). Le but de ce deuxième objectif est de diminuer considérablement le temps de mesure en effectuant seulement la mesure du courant de polarisation par la technique PDC et de la convertir dans le domaine fréquentiel (technique FDS : frequency domain spectroscopy) vu que le temps nécessaire pour la mesure de la FDS est beaucoup plus long que celui du PDC.

4 MÉTHODOLOGIE

Dans un premier temps, une étude bibliographique a été réalisée afin de comprendre les mécanismes de dégradation de l'isolation (liquide et solide) des

transformateurs, d'être informé sur les travaux antérieurs déjà effectués concernant le sujet du travail demandé.

L'étude bibliographique a permis non seulement de dégager les objectifs du travail à réaliser, mais surtout de pouvoir définir les étapes à suivre (travaux à réaliser) pour l'atteinte des objectifs. C'est ainsi que pour le premier objectif intermédiaire, l'étude sera réalisée dans le domaine fréquentiel (technique FDS) selon les étapes suivantes:

4.1 Séparation de l'humidité et du vieillissement du papier

Le déroulement de l'étude de cette partie se fera selon les étapes suivantes :

4.1.1 Préparation des échantillons

Cette phase consiste à :

- Déterminer le nombre d'échantillons de papier et la quantité d'huile nécessaire.
- Dégazer et à sécher l'huile sous vide (humidité < 5 ppm)
- Sécher le papier sous vide (<1 mbar), pendant 48 heures à une température de 60°C
- Imprégner le papier
- Vieillir de l'huile et du papier: le vieillissement se fera à une température contrôlée de 115 °C dans un four en présence de catalyseurs en cuivre (3 g/l), pendant 250 heures, 500 heures, 750 heures et 1000 heures.

- Après le vieillissement, nous ferons varier le degré d'humidité (0,5%, 2% et 5%) de chaque échantillon avant les mesures des différents paramètres.

4.1.2 Mesures

Pour chaque niveau de vieillissement et chaque degré d'humidité, nous allons mesurer les paramètres suivants :

PAPIER	PARAMÈTRE MESURÉ	APPAREIL
	Le facteur de dissipation ($\tan \delta$)	IDA 200
	Le facteur de puissance	
	Le déphasage ($\arg Z$)	
	Le module de l'impédance	
	L'humidité	Titreur coulométrique Karl Fischer 831 KF
	Le degré de polymérisation (DP)	Viscosimètre
	Courant de polarisation dépolariation	PDC conçu à ISOLIME

Tableau 1: Paramètres mesurés et appareils utilisés.

Les mesures seront réalisées aux températures de 25°C et 65°C.

Pour chaque niveau de vieillissement, le degré de polymérisation (DP) sera mesuré.

Cette mesure du DP confirmera le vieillissement effectif du papier.

4.1.3 Analyse des résultats

Les analyses vont consister:

En premier lieu, à rassembler tous les résultats des mesures des différents paramètres afin de constituer une base de données fiable et de faire ensuite une analyse statistique dans le but de trouver une corrélation entre ces différents paramètres mesurés

et l'état de vieillissement de l'isolation solide (papier). Il s'agira ici de mettre en évidence une relation entre l'effet du vieillissement et de l'humidité sur le papier afin de pouvoir les séparer.

En second lieu, l'analyse consistera à entraîner différents types de réseaux de neurones en utilisant la base de données formée ainsi que les différents résultats obtenus de l'analyse statistique, afin de déterminer le type de réseaux de neurones permettant de donner une décision concernant l'état de vieillissement et la teneur en eau de l'isolation solide.

4.2 Conversion des mesures effectuées dans le domaine temporel au domaine fréquentiel.

Les travaux de cette partie consisteront à la mesure du courant de polarisation effectué dans le domaine temporel par la technique PDC. Le courant de polarisation sera par la suite analysé et traité par des méthodes et des algorithmes afin de le convertir dans le domaine fréquentiel. La conversion consiste en la décomposition des mesures du courant de polarisation, en une somme de fonctions exponentielles dont le but est de représenter les mesures du courant par une fonction analytique afin de déterminer sa transformée de Laplace et par la suite, déterminer la réponse fréquentielle de l'impédance du diélectrique. Cette conversion permet de diminuer considérablement le temps de mesure vu que le temps nécessaire pour la mesure de la FDS est beaucoup plus long que celui du PDC.

5 ORGANISATION DU MÉMOIRE

Pour rendre compte au mieux des travaux entrepris, ce rapport sera structuré autour de sept chapitres.

Le premier permettra de situer le lecteur en lui permettant d'avoir une vue d'ensemble, de se faire une idée générale du contenu de ce mémoire et par la même occasion être situé sur le travail effectué.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude bibliographique qui débutera par une présentation générale des transformateurs et de leur système d'isolation y compris les mécanismes de vieillissement et de dégradation des isolants qui seront également présentés, ainsi qu'un rappel sur la polarisation des isolants. Ce chapitre sera clos par une présentation des travaux de recherches antérieurs concernant la thématique du travail demandé; ce qui permettra d'orienter le travail à effectuer.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des matériels et des méthodes de mesure utilisés dans la partie expérimentale de ce travail. Les méthodes utilisées seront conformes aux normes ASTM [4].

Le quatrième chapitre concernera la création de la base de données à partir des résultats des mesures effectuées qui permettront d'aborder l'analyse et l'interprétation des résultats des mesures afin d'aboutir à une possibilité de la séparation de l'effet de

l'humidité et du vieillissement permettant ainsi de déterminer l'état de l'isolation solide des transformateur à partir des mesures effectuées dans le domaine fréquentiel.

Le cinquième chapitre présentera l'utilisation des réseaux de neurones pour l'analyse des résultats.

Le sixième chapitre concernera la conversion des mesures effectuées dans le domaine temporel au domaine fréquentiel.

Pour finir, les conclusions générales ainsi que les recommandations sur les travaux futurs seront présentées au septième chapitre.

6 ORIGINALITÉ ET AVANTAGES

La surveillance de la condition de l'isolation des transformateurs est d'une importance capitale puisque beaucoup de transformateurs installés à travers le monde, approchent la fin de vie, et ce tant au Québec qu'à l'échelle internationale.

L'originalité du programme proposé tient aux investigations électriques et physico-chimiques qu'il est prévu de corréler. Il paraît dès lors raisonnable d'espérer voir ces travaux aboutir à une méthode de diagnostic significativement plus performante que celles disponibles aujourd'hui, afin d'évaluer précisément l'état d'un transformateur. De telles possibilités présenteraient des intérêts évidents, pour l'avancement de la science et pour les exploitants de réseaux électriques qui disposeraient ainsi d'un outil approprié

pour la planification de leurs investissements, que ce soit dans le cadre de l'extension des réseaux ou dans celui du renouvellement des équipements existants.

Le projet de recherche proposé offrira, aux exploitants de réseaux électriques, un moyen puissant de réduction des coûts, et cela sur différents plans. Tout d'abord, une méthode de diagnostic efficace des transformateurs permet d'intervenir avant qu'une défaillance majeure ne se produise. Ainsi, il est possible d'éviter, en premier lieu, les couvertures d'assurance que cette intervention précoce rend inutiles et, en second lieu, les pertes de production qui résulteraient inévitablement du sinistre, ne sont généralement pas couvertes par les assurances. S'il est possible de prédire les pannes, il devient possible de les éviter !

Ensuite, l'évaluation précise de l'état d'un transformateur permet de prévoir son remplacement au moment optimal. Aujourd'hui, pour éviter de mauvaises surprises, il est fréquent de remplacer un tel transformateur lorsqu'il atteint un âge donné, alors même qu'il pourrait peut-être encore fonctionner durant plusieurs années sans problème. Un moyen de diagnostic fiable constitue donc un outil économique et de planification de l'entretien du réseau électrique.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Ce chapitre permet de faire le point sur les principales techniques de diagnostic des transformateurs de puissance par la spectroscopie diélectrique existantes utilisées pour évaluer l'état de leur isolation liquide et solide. Après un aperçu sur les transformateurs et leur système d'isolation, l'accent sera mis sur l'analyse du vieillissement de l'isolation des transformateurs. Les notions fondamentales concernant la polarisation des diélectriques seront également abordés, pour aboutir à l'utilisation des mesures diélectriques effectuées dans les domaine du temps et de la fréquence comme outils de diagnostic de l'état de l'isolation des transformateurs et de prise de décision des services de maintenance et de gestion des réseaux d'énergie électrique.

Ce chapitre se terminera par un résumé de la revue de littérature:

- ♦ Sur les études des différentes techniques de diagnostic par la spectroscopie diélectrique concernant la possibilité de la séparation de l'effet du vieillissement et de l'humidité sur les caractéristiques de l'isolation des transformateurs afin de pouvoir prédire avec suffisamment de précision, l'état de l'isolation solide (papier) des transformateurs.

- ♦ Sur la Conversion des mesures effectuées dans le domaine temporel au domaine fréquentiel afin de réduire les temps de diagnostic.

2.2 Présentation générale des transformateurs de puissance

2.2.1 Constitution des transformateurs de puissance

Les transformateurs de puissance (figure 2) sont des machines d'induction qui dans la majorité des cas sont de construction triphasée, mais pour des raisons d'encombrement (poids et dimensions), de transport et facilité de maintenance, on les trouve également en unités monophasées facilement interchangeables.

Un transformateur de puissance se compose essentiellement d'un circuit magnétique et d'un circuit électrique

- Un circuit magnétique qui a pour fonction de créer un champ magnétique alternatif et de canaliser le flux magnétique. Le circuit magnétique est feuilleté pour réduire les pertes par hystérésis et les courants de Foucault.

- Une partie électrique constituée des bobinages qui sont constituées des enroulements primaires et secondaires et de leurs éléments permettant de les raccorder aux réseaux HT et BT: leur fonction est de produire une induction alternative au primaire, de créer une tension induite au secondaire et d'assurer les liaisons électriques avec les réseaux extérieurs.
- Une partie mécanique qui a pour fonction de supporter l'ensemble, de protéger les enroulements, de permettre la fixation et la manutention et d'assurer le refroidissement.

Tout cet ensemble se trouve à l'intérieur d'une cuve métallique étanche.

- Les bornes de raccordement

Elles permettent les liaisons des bobinages avec les réseaux extérieurs. Ce sont généralement des traversées isolantes fixées sur le couvercle du transformateur.

- Plaque signalétique

Les transformateurs de distribution doivent posséder une plaque signalétique comportant toutes les indications permettant de l'identifier et d'en connaître ses caractéristiques.

- Refroidissement des transformateurs:

Les transformateurs Immergés dans une cuve contenant de l'huile qui assure le transfert des calories entre le transformateur et la cuve munie d'ailettes.

Les transformateurs à refroidissement dans l'air dont les bobinages sont imprégnés de résines synthétiques et en contact avec l'air ambiant.

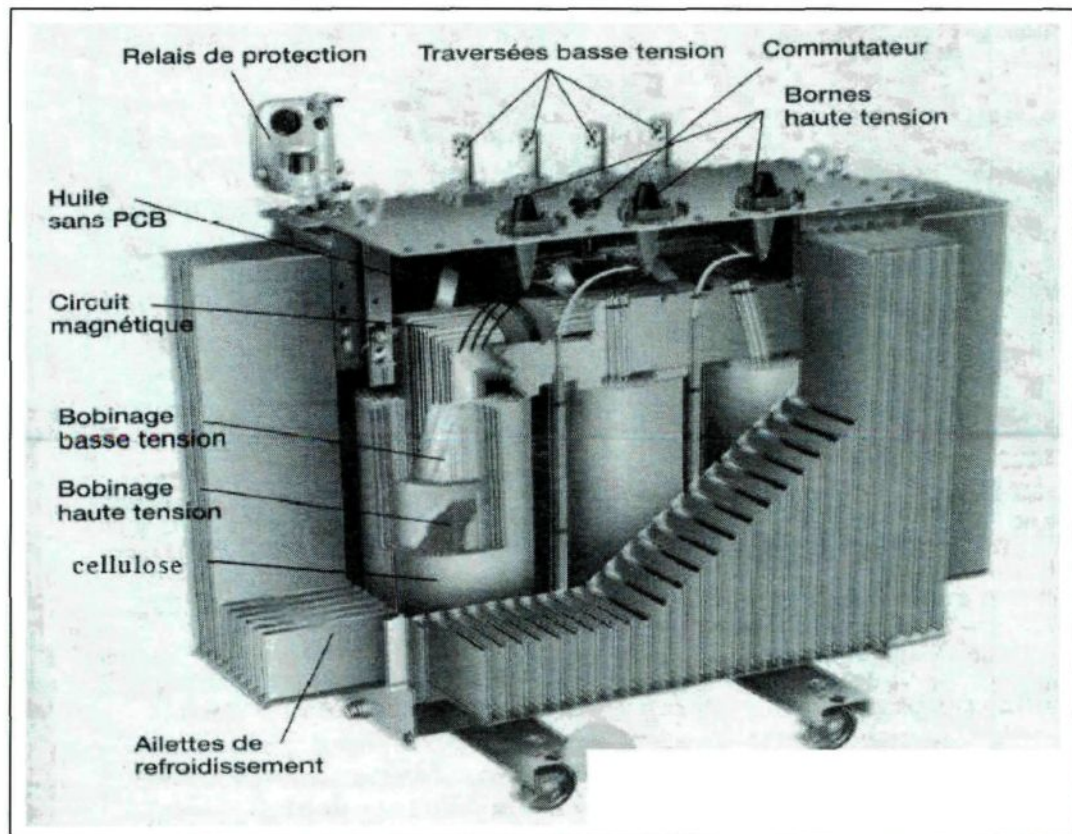


Figure 2: Vue interne d'un transformateur [5].

2.2.2 Présentation de l'isolation des transformateurs de puissance

L'isolation des parties actives des transformateurs de puissance est réalisée à l'aide de papier, de carton et d'huile (minérale ou synthétique).

2.2.2.1 Caractéristiques diélectriques des isolants

Les performances diélectriques des isolants liquide (huile) et solide (papier et carton) sont principalement caractérisées par leur permittivité relative, la rigidité diélectrique, leur conductivité ainsi que leur facteur de pertes ou de dissipation.

a) La permittivité relative

La permittivité est une propriété caractéristique du point de vue électrique des matériaux diélectriques, elle reflète l'intensité des mécanismes de polarisation dans le matériau.

La permittivité relative ϵ_r d'un produit est définie comme le rapport entre la capacité C_p d'un condensateur rempli de ce produit et la capacité du même condensateur vide C_0 [6] :

$$\epsilon_r = \frac{C_p}{C_0} \quad (1)$$

La permittivité absolue est le produit de la permittivité relative ϵ_r par la permittivité du vide ϵ_0 :

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad \text{en (F/m)} \quad (2) \quad \text{avec } \epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

Les matériaux diélectriques sont souvent classés selon leur permittivité relative. Le tableau 2 présente la permittivité de certains matériaux (ces valeurs sont approximatives

et peuvent varier nettement en fonction de la fréquence, de la température, de l'hygrométrie voire de la pression atmosphérique).

ISOLANT	PERMITTIVITÉ RELATIVE	RIGIDITÉ DIÉLECTRIQUE kV/mm
Air sec	1	4
Carton	4	10
Mica	6	70
Papier	2	6
Huile minérale	2,2	9 à 10
Polyéthylène	2,25	18
Porcelaine	5 à 6	16

Tableau 2: Permittivité relative de quelques matériaux.

b) Conductivité électrique

Un liquide ou un solide, pour être isolant électrique, doit conduire le moins possible l'électricité lorsqu'une tension lui est appliquée. Sa conductivité doit donc être la plus faible possible.

La conductivité d'un isolant est due à la présence de charges libres positives et négatives (des ions) en quantités égales. Sous l'effet d'un champ électrique, ces ions se déplacent provoquant ainsi un courant de conduction.

La conductivité s'exprime en S/m (siemens par mètre).

La résistivité ρ est définie comme l'inverse de la conductivité σ :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (3)$$

Elle s'exprime en $\Omega \cdot m$ (ohmmètre).

c) Facteur de dissipation ($\tan \delta$)

Dans le cas des diélectriques réels (donc imparfaits), on définit la permittivité relative complexe ε_r^* . Cette notion permet d'analyser le défaut de quadrature entre le courant et la tension aux bornes d'un condensateur, et donc d'introduire des pertes diélectriques :

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (4)$$

Le facteur de dissipation diélectrique est égal au quotient $\varepsilon_r'' / \varepsilon_r'$.

Ce quotient est également appelé tangente de l'angle de pertes ou $\tan \delta$.

δ est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée au diélectrique et le courant qui en résulte [7].

Sous tension alternative sinusoïdale de fréquence f et de pulsation $\omega = 2\pi f$, les pertes par conduction sont caractérisées par la tangente de l'angle de perte δ , ou facteur de dissipation (le déphasage entre courant et tension étant : $\pi/2 - \delta$) tel que :

$$\tan \delta = \frac{\sigma}{\varepsilon \varepsilon_0 \rho \omega} = \frac{1}{\varepsilon \varepsilon_0 \rho \omega} \quad (5)$$

Le produit $\varepsilon_r' * \tan \delta = \varepsilon_r''$ est appelé **indice de pertes** car il caractérise l'énergie dissipée dans le diélectrique.

d) Influence du vieillissement sur la conductivité et le facteur de dissipation

La conductivité d'un produit neuf est en général beaucoup plus faible que celle d'un produit en service, puisque celui-ci récupère des impuretés au contact des matériaux solides contenus dans l'équipement. De même, le vieillissement du produit, qu'il soit thermique, dû à une oxydation, à une hydrolyse, ou à tout autre processus, conduit systématiquement à la formation de sous-produits qui contribuent également à l'augmentation de la conductivité. Ainsi, si une huile minérale neuve a fréquemment une valeur de $\tan \delta$ à 90 °C inférieure à 10^{-4} , une huile dans un transformateur peut avoir une valeur de $\tan \delta$ à 90 °C supérieure à 1 [6].

e) La rigidité diélectrique

Si on augmente la tension à laquelle est soumis un isolant au delà d'une certaine valeur appelée tension de claquage, il apparaît un arc électrique dans l'isolant : courant intense traversant l'isolant en suivant un chemin formé par l'arc lui-même. Dans ce cas, l'isolant est défectueux : il y a rupture diélectrique ou claquage entraînant la destruction de l'isolant, irréversible pour les isolants solides (carbonisation), réversible pour les isolants gazeux et liquides (recombinaison des ions avec des électrons).

La rigidité diélectrique d'un milieu représente donc la valeur maximale du champ électrique (V/m) que le milieu peut supporter sans que se produise une dégradation irréversible nommée claquage.

La rigidité du milieu, r est définie d'après l'équation 6 :

$$r = \frac{U_c}{d} \quad (6)$$

où d est l'épaisseur de l'isolant placé entre les deux électrodes planes et U_c sa tension de claquage.

Il faut noter que la rigidité diélectrique dépend de :

- la fréquence, la forme et la durée d'application de la tension ;
- la température, la pression et l'humidité de l'atmosphère ;
- la présence d'impuretés dans l'isolant (bulles d'air, humidité, ...).

2.2.2.2 Isolation liquide

L'huile est utilisée pour sa grande rigidité diélectrique et ses propriétés de dissipation de chaleur nécessaire au refroidissement des transformateurs en assurant le transfert des calories entre le transformateur et la cuve munie d'ailettes. L'huile permet également de remplir les pores du papier mais aussi les vacuoles d'air (cause des décharges partielles) qui sont inévitablement présentes dans et entre les couches de

papier enroulé sur les fils de cuivre augmentant ainsi la rigidité du papier (Papier sec: $r \approx 50$ a 80 kV/mm , Papier imprégné d'huile: $r \approx 100 \text{ kV/mm}$) voir la figure 3 [8]. Il faut noter également que l'huile qui se dégrade (Figure 4) est aussi utilisée comme moyen de diagnostic, car il contient environ 70% des informations de diagnostic [9-11].

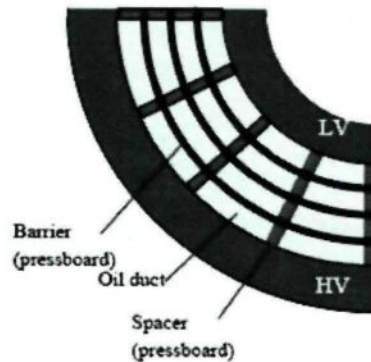


Figure 3: Une partie de la section transversale d'un système d'isolation des transformateurs de puissance.



Figure 4: Les étapes de l'oxydation d'huile [8].

Afin de pouvoir jouer pleinement son rôle, une huile isolante doit posséder les principales qualités suivantes [12] :

- Une faible viscosité et un bas point d'écoulement pour assurer sa circulation;
- Un point d'éclair (ou point d'inflammabilité) élevé;
- Une bonne stabilité chimique essentiellement vis-à-vis des phénomènes d'oxydation et de décomposition;

2.2.2.3 Isolation solide

Le papier sert à l'isolation des enroulements et le carton, sert d'isolation entre les enroulements, et entre les enroulements et le noyau (Figure 5) [13, 14]. En plus de leurs prix relativement bas, ils possèdent d'excellentes caractéristiques diélectriques. L'imprégnation par un isolant liquide, essentiellement l'huile minérale leur confère une rigidité diélectrique remarquable. Le papier Kraft est l'un des papiers les plus utilisés dans l'industrie électrique.

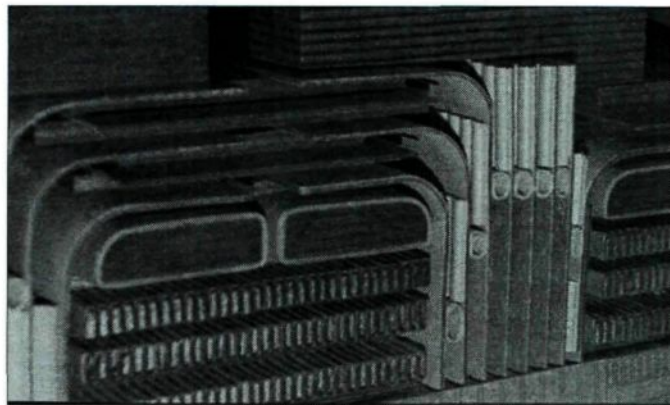


Figure 5: Système d'isolation des enroulements d'un transformateur.

Le papier et le carton sont constitués de fibres de celluloses (chaînes de glucose extraites de la pulpe de bois ou de fibres de coton) dont l'unité est $C_6H_{10}O_5$. Les celluloses

sont formées de longues chaînes comprenant environ 1 200 anneaux de glucose reliés par des ponts d'oxygène (figure 6). La longueur de ces fibres varie de 1 à 20 mm et leur diamètre de 15 à 30 pm. La longueur moyenne d'une chaîne de cellulose peut être évaluée par la mesure du degré de polymérisation (DP) Lorsque le papier est neuf, la valeur du DP est d'environ 1 200 et sa résistance à la traction est alors égale à 117 000 kPa et lorsque cette valeur atteint 200 et la résistance à la traction une valeur de 30 000 kPa, le papier est considéré comme ayant atteint la fin de sa durée de vie utile entraînant par la même occasion celle du transformateur de puissance. La densité, la longueur et la diversité des fibres de cellulose qui les constituent, confèrent à ces matériaux des caractéristiques mécaniques et électriques particulières [15].

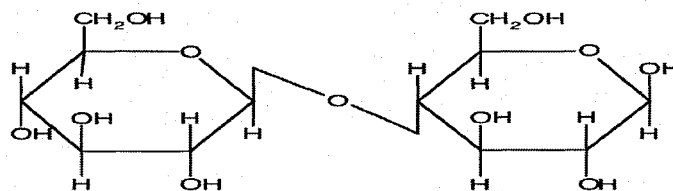


Figure 6: Motif élémentaire d'une cellulose [15].

Le papier Kraft est constitué principalement de cellulose (90%) et des composants suivants: lignines (6 à 7%), d'hémicellulose généralement du pentosane (3 à 4%) et des traces de cations métalliques [15].

2.2.2.4 Humidité dans les transformateurs

L'humidité est la principale cause de la dégradation des isolants électriques dans les transformateurs, car contrairement aux isolants, elle est conductrice de l'électricité. La présence d'eau dans un transformateur est particulièrement préjudiciable aux propriétés diélectriques à son système d'isolation huile-papier, surtout lorsqu'elle se combine à l'oxygène et en présence d'une chaleur excessive. Cette combinaison entraîne le processus du vieillissement accéléré du système d'isolation, donc du transformateur.

L'humidité affecte la conductivité de l'isolant, ce qui augmente le facteur de dissipation. Des études antérieures ont indiqué que le taux de dégradation du papier augmente en proportion directe de la teneur en eau.

L'infiltration de l'humidité dans l'isolant peut être due à divers facteurs tel que la respiration du transformateur qui expose l'huile à l'atmosphère, des fuites au niveau des joints, l'installation du transformateur ou sa réparation peut aussi conduire à l'augmentation de l'humidité dans le transformateur. Le processus normal de vieillissement peut aussi entraîner l'apparition d'eau produite par la décomposition thermique de la cellulose. Bien que le papier soit séché, il subsiste au moins 0,2% d'humidité en son sein [16].

a) L'humidité dans l'huile

La bonne santé d'un transformateur est conditionnée par l'humidité présente dans son système d'isolation qui est le facteur fondamental garantissant son bon fonctionnement. L'augmentation de la saturation relative représente l'effet le plus dévastateur de l'humidité, en effet cet augmentation entraîne également l'augmentation de la conductivité tout en réduisant la rigidité diélectrique de l'huile. L'eau peut se trouver dans l'huile du transformateur sous trois formes: sous forme dissoute dans l'huile, sous forme dispersée (en gouttelettes d'eau) lorsque l'humidité dans l'huile dépasse la valeur de saturation et en émulsion (apparition de deux phases non miscibles). La solubilité de l'eau dans l'huile est donnée en mg/kg ou ppm. Elle dépend de l'état de l'huile, de la température et du type d'huile.

L'influence de l'eau sur les propriétés d'un liquide isolant dépend généralement de l'humidité relative $W_{rel}(\%)$ qui est le rapport entre la teneur en eau de l'huile $W_{abs}(\text{ppm})$ et la limite de la saturation $W_L(T)$. Elle est donnée par la relation suivante:

$$W_{rel} = \frac{W_{abs}}{W_L(T)} \quad (7)$$

La solubilité maximum de l'eau dans l'huile à une température T peut être exprimée sous la forme:

$$W_L = K \cdot e^{-\frac{H}{T}} \quad (8)$$

Où les constantes H et K dépendant du liquide lui-même et doivent être déterminées expérimentalement [17].

L'augmentation de la température entraîne une augmentation de la solubilité de l'eau dans l'huile. Cette variation de la solubilité avec la température peut engendrer de graves conséquences: lorsque l'appareil est chaud (par exemple en été), l'eau se dissout en grande quantité dans l'huile et lorsque l'appareil se refroidit (en hiver), la solubilité de l'eau diminuant à nouveau va laisser apparaître de l'eau libre.

b) L'humidité dans le papier

L'unité de la concentration de l'humidité dans le papier est généralement exprimée en %, qui représente le poids de l'humidité, divisé par le poids du papier sec sans huile. Lors de la fabrication du transformateur, l'isolation papier est séchée à une valeur d'humidité comprise entre 0,5 à 1%. Les transformateurs de puissance fonctionnant à des tensions inférieures à 120 kV, la limite de la teneur en humidité du papier pour un fonctionnement normal est estimée à environ 3-4%, et pour les transformateurs supportant de plus grandes tensions plus grands, cette limite se situe autour de 2%. L'eau peut se trouver dans le papier du transformateur sous trois formes: vapeur, eau libre dans les capillaires, imbibée d'eau libre, et il peut être adsorbé sur les surfaces. La concentration d'humidité dans le papier peut être beaucoup plus grande que celle de l'huile [17].

c) Interactions papier-huile

L'humidité entre l'huile et le papier est le résultat d'interactions continues qui évoluent en fonction de la température. Plusieurs chercheurs, Fabre et Pichon en 1960, puis Oommen en 1983 [18] ont mis en évidence l'équilibre de l'humidité entre ces deux matériaux en développant des courbes dites d'équilibre de l'humidité du système d'isolation papier/huile des transformateurs en fonction de la température. Les courbes d'Oommen (figure 7) étant considérées comme étant les plus précises, sont actuellement les plus utilisées [18]. On s'aperçoit à l'analyse de ces courbes que l'humidité du papier a tendance à diminuer avec la température alors que celle de l'huile augmente (la solubilité de l'eau dans l'huile augmente avec la température).

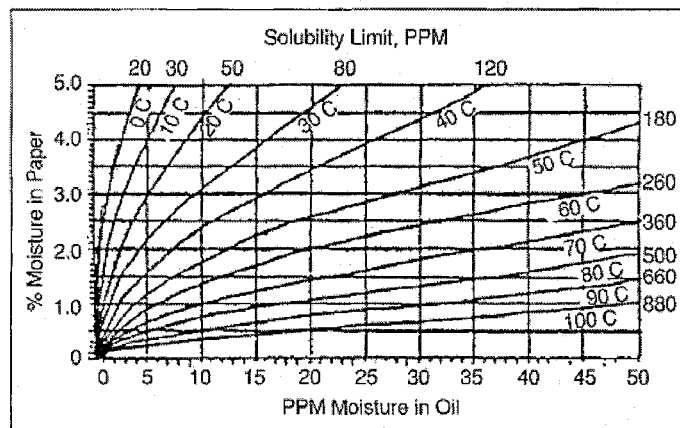


Figure 7: Courbes d'Oommen de l'équilibre de l'humidité entre le papier et l'huile [18].

2.2.2.5 Vieillessement et dégradation de l'isolation des transformateurs

La durée de vie des transformateurs de puissance dépend essentiellement de l'affaiblissement des caractéristiques mécaniques du papier. Lors du fonctionnement du transformateur, son système d'isolation est soumis à diverses contraintes dont les interactions peuvent être préjudiciables à la durée de vie du transformateur. Les contraintes susceptibles d'affecter le bon fonctionnement des équipements électriques sont au nombre de quatre :

- Contraintes électriques (décharges partielles, courts-circuits, surtensions de manœuvre ou atmosphériques, etc.) ;
- Contraintes mécaniques (courts-circuits, régimes transitoires, surcharges, vibrations, etc.) ;
- Contraintes thermiques (effet joules, courants de Foucault, pertes magnétiques et diélectriques, etc.) ;
- Contraintes chimiques (humidité relative, eau, oxygène, etc.).

La figure 8 illustre simplement l'interaction entre ces contraintes et le système d'isolation du transformateur de puissance conduisant ainsi à son vieillissement [17].

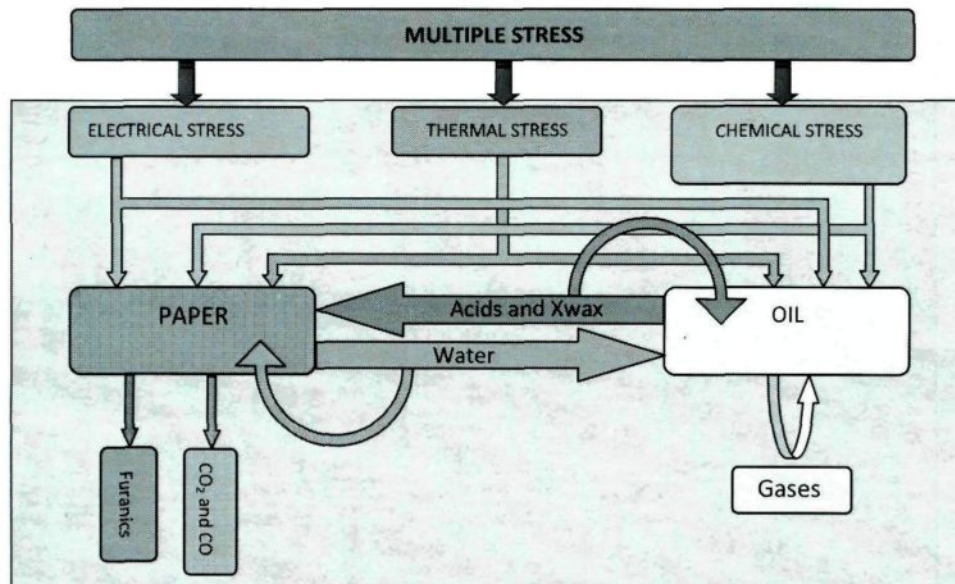


Figure 8: Interaction entre les différentes contraintes et le système d'isolation du transformateur [17].

a) Vieillissement du papier

Le papier, habituellement utilisé dans les isolations papier/huile, est composé en majorité de cellulose. Ce dernier est formé de longues chaînes comprenant environ 1200 anneaux de glucose reliés par des ponts d'« oxygène ». Selon la température atteinte, il peut se produire:

- la pyrolyse qui entraîne la décomposition de la cellulose, avec production de CO, CO₂, H₂O, H₂ principalement. Ce phénomène n'affecte sensiblement les qualités mécaniques du papier qu'au dessus de 150°C ;

- l'oxydation qui consiste en l'attaque des anneaux de glucose par l'oxygène; elle provoque une dépolymérisation. Les produits formés sont des aldéhydes et des acides, mais aussi des gaz tels que CO, CO₂ et H₂;
- l'hydrolyse qui est la réaction de l'eau avec les ponts oxygène, provoque la rupture de chaîne sans formation de produits libres. L'eau formée par pyrolyse et oxydation, contribue à augmenter l'hydrolyse [15].

Pour des températures inférieures à 140°C, Il est presque impossible de distinguer ces trois mécanismes liés à la dégradation du papier. En effet, la dégradation du papier dans ce cas est due à l'action combinée de l'oxygène ou de l'eau, catalysée par la température.

Ces trois mécanismes (la pyrolyse, l'oxydation et l'hydrolyse), entraînent la formation de sucres suite à la scission de la chaîne cellulosique. L'analyse des sucres dans l'huile pourrait constituer un moyen de diagnostic de l'état de l'isolation solide, mais cela n'est pas possible à cause de la faible solubilité des sucres dans l'huile. Sous influence de l'humidité et des acides, le glucose se dégrade en 5-hydroxymethyl-2-furfuraldéhyde. Étant instable, ce dernier se décompose à son tour en d'autres dérivés furaniques tels que le 2-acetyl-furan, le 5-methyl-2-furfuraldéhyde. En raison de leur solubilité partielle dans l'huile, ces produits sont actuellement utilisés comme traceurs caractéristiques de la dégradation du papier. Parmi les composés furaniques issus de la dégradation du papier, le 2-furaldéhyde est le plus significatif et sa concentration dans l'huile est liée au degré de polymérisation moyen DP. Une analyse effectuée en utilisant la chromatographie en

phase liquide haute performance (HPLC) d'un échantillon de l'huile prélevée dans le transformateur permet de mesurer le 2-furaldéhyde. À partir de cette valeur, le DP peut être estimé, indiquant ainsi l'état de l'isolation papier (figure 9) [15, 19].

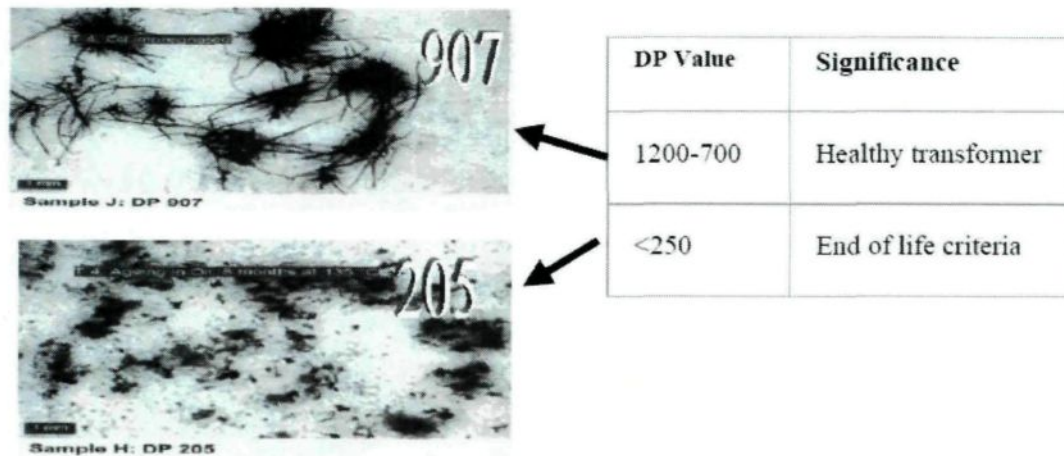


Figure 9: État de la dégradation du papier en fonction du DP [19].

Il existe trois méthodes pour mesurer la dégradation du papier;

- 1) Le degré de polymérisation (DP) qui permet de quantifier la scission des chaînes dans le papier. Plus ce nombre est faible et plus le papier est dégradé. Ce test est réalisé suivant le standard ASTM D4243.
- 2) La tenue en traction qui permet d'évaluer directement la tenue mécanique du papier. Ce test se fait selon ASTM D828.
- 3) L'analyse des dérivées furaniques apparaissant lors de la rupture des chaînes et de la création de glucose (ASTM D5837).

Remarque: Les méthodes 1 et 2 nécessitent la prise d'un échantillon du papier isolant.

b) Vieillissement de l'huile

En absence d'oxygène et d'eau, la décomposition purement thermique de l'huile minérale n'est significative que pour des températures autour de 300°C. En présence d'oxygène, il se produit une oxydation qui comporte un certain nombre d'étapes (initiation, propagation, terminaison). On désigne par oxydation un ensemble de réactions chimiques complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène dissous. Les produits finaux résultant de l'oxydation de l'huile sont des alcools, des aldéhydes, des cétones, des esters, des acides, H_2O , CO , CO_2 et des hydrocarbures légers. Il y a également la production des peroxydes qui sont définis comme étant des produits intermédiaires du processus d'oxydation. Il se forme également des produits solides par condensation des produits d'oxydation ou par polymérisation de fragments de chaînes d'hydrocarbures, donnant naissance à la production de boues. Les produits de dégradation issus de l'oxydation de l'huile entraînent tout naturellement un changement de couleur (figure 4).

L'oxydation a des conséquences néfastes sur le bon fonctionnement des transformateurs. Elle entraîne:

- Une augmentation des pertes diélectriques ;
- Une augmentation de la viscosité, d'où une diminution de la capacité à éliminer les dégagements de chaleur. Ceci étant dû au fait que les boues produites vont

obstruer les conduits de circulation d'huile et affecter le coefficient de transfert de chaleur entre les enroulements et l'huile. Le système de refroidissement perd ainsi son efficacité et l'élévation de la température qui en résulte accélère l'oxydation et la dégradation des isolants solides.

- Une augmentation de la corrosivité vis-à-vis de la cellulose.
- Une augmentation de la corrosivité vis-à-vis des parties métalliques.

Les principaux facteurs qui influencent l'oxydation des huiles minérales sont l'oxygène, la température et les certains métaux (cuivre, fer, le plomb) agissant comme catalyseurs (la vitesse des réactions d'oxydation croît avec la température et la concentration en oxygène : on admet qu'elle double tous les 8 à 10 °C, à partir de 60 °C) [7, 15].

c) Vieillissement du complexe huile/papier

Il a été constaté que les phénomènes ou les processus de vieillissement de chaque composante restent les mêmes, mais il est à noter que les produits d'oxydation de l'huile contribuent au vieillissement du papier soit par leur action propre, soit par augmentation de l'hygroscopicité de l'huile. Par exemple, la vitesse de dégradation du papier peut être 10 fois plus rapide dans l'huile que dans un diélectrique chloré qui ne s'oxyde pas [15]. Il a été également constaté que l'eau accélère fortement le vieillissement, car elle se fixe

principalement dans le papier. L'effet de l'air n'est pas toujours mis en évidence, car l'oxygène réagit surtout avec l'huile [15].

2.3 Étude du phénomène de la polarisation des matériaux diélectriques

2.3.1 Polarisation statique

Dans les matériaux isolants, il n'y a pas, ou très peu, de charges libres permettant la circulation du courant électrique. Par contre, les charges électriques présentes dans le matériau, si elles ne peuvent se mouvoir d'une électrode à l'autre peuvent se déplacer localement et entraîner une variation des charges images sur les électrodes. Cette variation des charges se traduit par un courant appelé courant de déplacement. En absence de champ électrique, les charges sont généralement orientées de façon aléatoire et ne peuvent pas être considérées comme étant des dipôles permanents (figure 10a). Mais sous l'action d'un champ électrique externe, le matériau réagit et crée un champ interne qui s'oppose au champ externe: c'est la polarisation (figure 10b) [17, 20, 21]

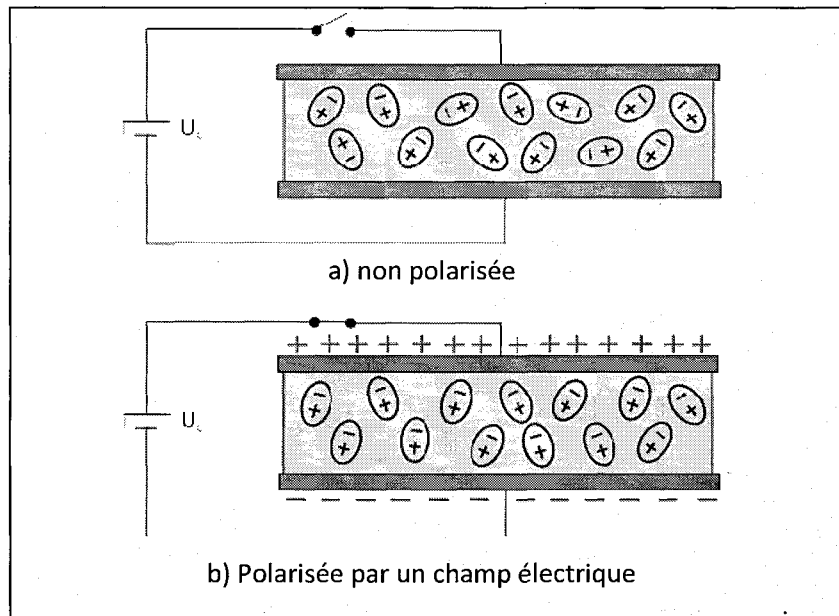


Figure 10: La polarisation moléculaire [17].

Le phénomène de polarisation provient en général de l'orientation d'un dipôle électrique, induit ou permanent, en présence d'un champ appliqué (l'application d'un champ électrique E déplace légèrement les charges positives et négatives les unes par rapport aux autres, provoquant l'apparition de dipôles électriques). Un dipôle électrique est formé par deux charges Q de signes opposés séparées par une distance l . Le moment dipolaire électrique est défini par [21-23]:

$$p = ql \quad (9)$$

Ces dipôles électriques peuvent provenir de différentes sources microscopiques ou macroscopiques. Habituellement, lorsqu'un matériau diélectrique se dégrade le nombre de dipôles électriques augmente et conséquemment le courant de polarisation, celui relié au mouvement des dipôles, augmente aussi. La polarisation due à ces dipôles correspond

à la somme vectorielle de tous les dipôles par unité de volume. On peut donc définir la polarisation P due aux dipôles correspond à la somme vectorielle de tous les dipôles [21-23].

$$P = \sum p_i \quad (10)$$

Si on considère une substance diélectrique linéaire (figure 11), la relation entre P et E est linéaire.

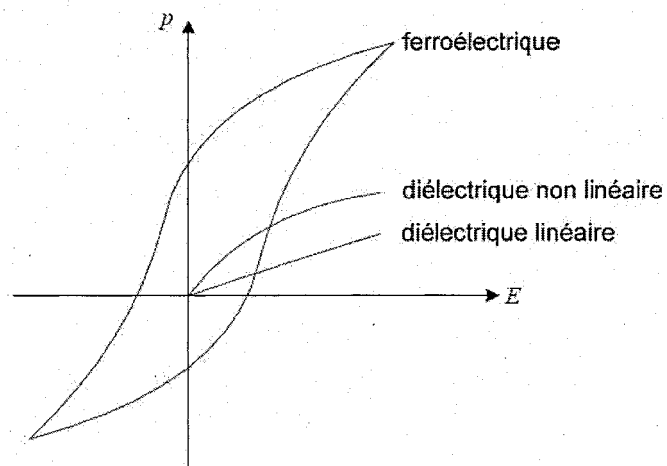


Figure 11: Polarisation d'un matériau diélectrique [21].

On peut donc écrire :

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi \mathbf{E} \quad (11)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (12)$$

où χ est la susceptibilité électrique du matériau (elle informe sur la capacité du matériau à se polariser.), \mathbf{D} est l'induction électrique et $\epsilon_0 = 8.852 \cdot 10^{-12}$ As/Vm est la permittivité du vide, en posant :

$$\epsilon_r = (1 + \chi) \quad (13)$$

on obtient :

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} \quad (14)$$

ϵ_r est la permittivité relative ou la constante diélectrique d'un matériau.

2.3.2 Différents types de polarisation

Polarisation des matériaux peut être due à plusieurs mécanismes connus sous le nom électronique, ionique ou atomique, dipolaire, la polarisation interfaciale, représentés schématiquement dans le tableau 2 [20, 21]:

2.3.2.1 La polarisation électronique

La polarisation électronique est due à un déplacement relatif du noyau de l'atome par rapport à l'ensemble des électrons qui l'entourent. Tous les atomes présentent, à des degrés divers, ce type de polarisation qui s'établit en un temps très court ($\sim 10^{-15}$ secondes).

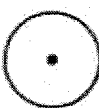
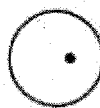
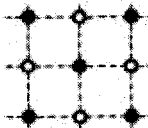
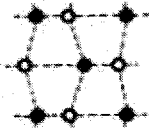
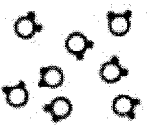
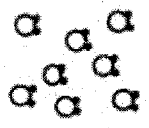


$$Pe = N\alpha_e E_1 \quad (15)$$


E_1 étant le champ électrique local, N représente le nombre de dipôles induits par unité de volume, α_e , la polarisabilité qui dépend de la nature du matériau (Fm^2). $\alpha_e = 4\pi\epsilon_0 r^3$ (r est le rayon de l'atome).


2.3.2.2 La polarisation ionique


La polarisation ionique résulte du déplacement en sens contraire des ions de signes opposés à l'intérieur de la molécule. Cette polarisation s'établit plus lentement que la précédente, la durée correspondante est d'environ 10^{-13} à 10^{-12} secondes.

$$P_i = N\alpha_i E_1 \quad (16)$$

Type de polarisation	$E = 0$	\xrightarrow{E}
Electronique		
Ionique		
par orientation		
Interfaciale		

 atome
noyau

 anion
cations

 molécule
polaire


 grain

Tableau 3: Illustration schématique des différents mécanismes de polarisation[21]

2.3.2.3 La polarisation par orientation

Dans le cas général, en l'absence d'un champ électrique externe, tous les dipôles permanents sont orientés de façon aléatoire de telle sorte que la polarisation nette résultante est nulle, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de polarisation macroscopique observable. Par contre, sous l'effet d'un champ, les moments ont tendance à s'aligner. Il en résulte une polarisation appelée polarisation par orientation. Ce type de polarisation dépend de la température et la durée correspondante est d'environ 10^{-10} à 10^{-7} secondes:

En plus de ce phénomène d'orientation, le champ peut faire varier le moment de la molécule, par déformation de cette dernière et de ses orbitales.

$$P_d = N \alpha_d E \quad (17)$$

$$\text{avec } \alpha_d = \frac{p^2}{3kT}$$

p étant le moment dipolaire de la molécule, $k = 1.380658 \cdot 10^{-23}$ J / K constante de Boltzmann, tandis que T représente la température.

La polarisation d'orientation peut exister seulement dans les gaz, les liquides et les matières amorphes visqueuses. Dans les matières solides, les dipôles sont «figés» et ne peuvent être orientés.

2.3.2.4 La polarisation interfaciale

Dans un diélectrique, les porteurs de charges qui jamais totalement absents, migrent sous l'effet du champ et ont tendance à se concentrer autour de défauts tels que les impuretés, les lacunes, les joints de grains, etc. On regroupe sous le nom de polarisation interfaciale, la polarisation résultant des accumulations locales de charges dues à l'ensemble des phénomènes de migration. Le délai nécessaire pour l'apparition d'une telle polarisation est de 10^{-2} à 10^{-1} secondes.

2.3.2.5 La polarisabilité

En supposant que les quatre mécanismes de polarisation agissent de façon indépendante les uns des autres, la polarisabilité totale α d'un matériau diélectrique donné peut être définie comme étant la somme des quatre termes:

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_i + \alpha_d + \alpha_c \quad (18)$$

2.3.2.6 Influence des différents types de polarisation sur ϵ' et ϵ''

Les différents types de polarisation ne se produisent pas tous à la même fréquence, mais ont un impact sur la permittivité relative ϵ' et l'indice de pertes ϵ'' des matériaux diélectriques.

Aux plus basses fréquences, les quatre polarisations contribuent à une valeur élevée de la permittivité relative ϵ' . Lorsque la fréquence croît, les contributions apportées par

chaque type de polarisation disparaissent les uns après les autres ; la constante diélectrique décroît donc avec la fréquence.

En ce qui concerne l'indice de pertes ϵ'' , on voit qu'il présente des pics dans les régions du domaine spectral où un type de polarisation cesse de répondre au signal appliqué (figure 12) [22].

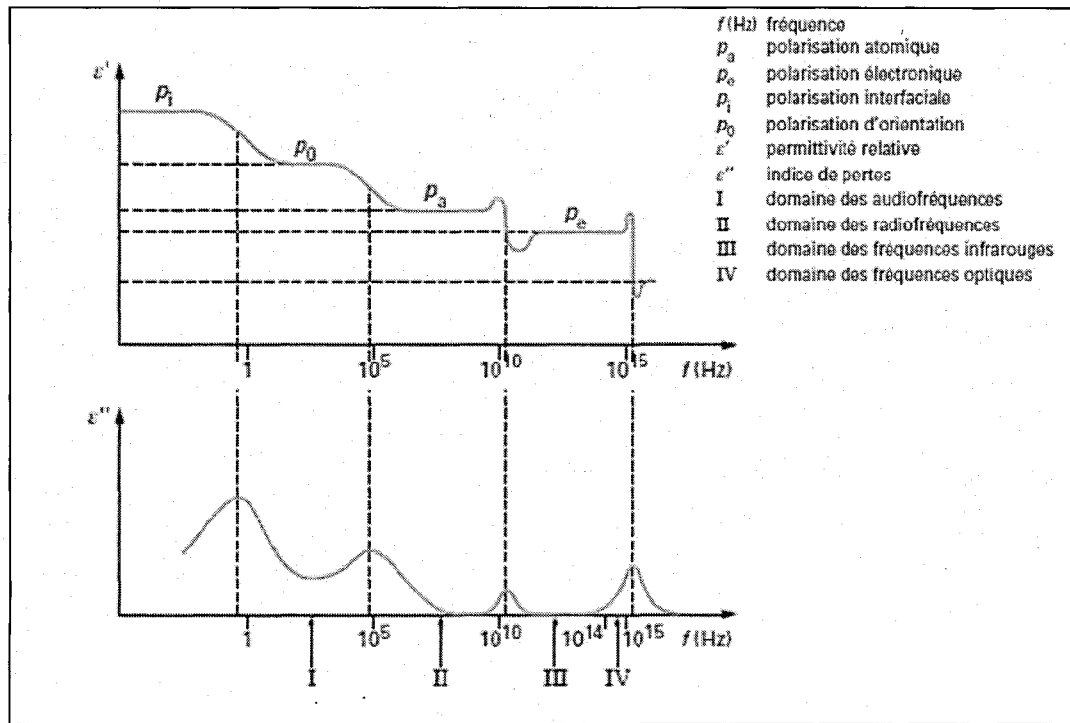


Figure 12: Influence des différents types de polarisation sur ϵ' et ϵ'' [22].

2.3.3 Fonction de réponse d'un diélectrique dans le domaine du temps

Les équations (11) à (14) sont des équations statiques et ne sont valables que lorsque le champ électrique appliqué est constant, c'est-à-dire très longtemps ($t \rightarrow \infty$)

après l'application d'un échelon de tension. Si on soumet un diélectrique à un champ électrique $E(t)$ dépendant du temps, l'équation (12) devient:

$$D(t) = \varepsilon_0 E(t) + P(t) \quad (19)$$

$\varepsilon_0 E(t)$: est la réponse instantanée pour la contribution du vide ou encore définie comme étant la polarisation rapide.

$P(t)$: qui s'établit avec un certain retard dont la durée dépend de la nature du matériau, est la polarisation lente.

Afin de pouvoir analyser la dépendance temporelle de la polarisation sous l'action d'une sollicitation électrique, Il faut définir une fonction $f(t)$ pour caractériser la réponse de l'isolant à des contraintes électriques spécifiques pouvant être du type impulsionnel (impulsion de Dirac $\delta(t)$ ou échelon unité).

Considérons une impulsion de champ électrique E appliquée durant une courte période Δt . Si le champ électrique appliqué tend vers une impulsion de Dirac $E\delta(t)$, la polarisation $P(t)$ prend la forme simple [21-23]

$$P(t) = \varepsilon_0 (E\Delta t) f(t) \quad (20)$$

La réponse $f(t)$ est une fonction réelle qui vérifie :

$$f(t) = 0 \text{ pour } t < 0 \text{ et } \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = 0$$

Le champ électrique $E(t)$ variant de façon arbitraire, peut être vue comme une somme d'impulsions. En appliquant le théorème de superposition, on peut ainsi faire la somme de toutes les polarisations pour chacune de ces impulsions de telle sorte que la polarisation peut s'exprimer par la convolution suivante :

$$P(t) = \sum_i P_i = \varepsilon_0 \int_0^\infty f(\tau) E(t - \tau) d\tau \quad (21)$$

Sous l'effet un champ diélectrique statique ($E = E_0$), (21) devient :

$$P_s = \varepsilon_0 E_0 \int_0^\infty f(\tau) d\tau = \varepsilon_0 \chi_s E_0 \quad (22)$$

où χ_s est la susceptibilité statique c'est-à-dire pour une sollicitation continue.

2.3.4 Expression des courants de polarisation et de dépolarisation

Pour des considérations pratiques, on préfère mesurer le courant qui traverse un diélectrique, plutôt que de mesurer directement sa polarisation. Sachant que la polarisation est reliée au courant par la loi d'Ampère qui exprime le courant total mesuré par un circuit par la somme du courant de déplacement avec celui de conduction directe, on peut écrire [21, 22]:

$$J(t) = \sigma E(t) + \frac{\partial D(t)}{\partial t} \quad (23)$$

En combinant les équations (12) et (23), on obtient:

$$J(t) = \sigma E(t) + \frac{\partial}{\partial t} [\varepsilon_0 E(t) + P(t)] \quad (24)$$

où $J(t)$ est la densité de courant total (A/m^2) et σ la conductivité. En combinant (21) et (24) on obtient :

$$J(t) = \sigma E(t) + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left[E(t) + \int_0^\infty f(\tau) E(t - \tau) d\tau \right] \quad (25)$$

Il est plus pratique d'exprimer (25) en termes du courant, $I(t)$, et de la tension, $U(t)$, plutôt qu'en termes de densité de courant et de champ électrique. Considérons le cas d'un condensateur plan-plan de surface A et de distance inter-électrodes d . Le courant et la tension sont reliés à la densité de courant et au champ électrique par [21-23].

$$J(t) = \frac{I(t)}{A} \quad (26)$$

$$E(t) = \frac{U(t)}{d} \quad (27)$$

Finalement, à partir de (25), (26) et de (27), on obtient :

$$I(t) = \frac{C_0 \sigma U(t)}{\varepsilon_0} + C_0 \frac{\partial}{\partial t} \left[U(t) + \int_0^\infty f(\tau) U(t - \tau) d\tau \right] \quad (28)$$

où C_0 est la capacité sous vide.

En appliquant un échelon de tension défini par [21]:

$$U(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ U_0 & 0 \leq t \end{cases} \quad (29)$$

on obtient le courant suivant :

$$I(t) = \frac{C_0 \sigma}{\varepsilon_0} U_0 + U_0 C_0 [\delta(t) + f(t)] \quad (30)$$

Le terme $[(C_0 \sigma / \varepsilon_0) U_0]$ est la conduction directe, représentant les courants de fuite à travers le diélectrique.

$U_0 C_0 [\delta(t) + f(t)]$, est le courant dû aux mécanismes de polarisation.

2.3.5 Fonction de réponse d'un diélectrique dans le domaine des fréquences

L'application d'une tension sinusoïdale permet d'exprimer la polarisation dans le domaine des fréquences. La conversion de la polarisation du domaine du temps au domaine des fréquences des expressions du courant de polarisation et de dépolarisation peut se faire en utilisant la transformée de Fourier [21].

Pour obtenir la réponse en fréquence du courant de polarisation, il suffit de prendre la transformée de Fourier de l'équation (28), et on peut écrire [21, 22]:

$$I(\omega) = \frac{C_0 \sigma U(\omega)}{\varepsilon_0} + j\omega C_0 U(\omega) [1 + F(\omega)] \quad (31)$$

$$F(\omega) = \int_0^{\infty} f(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (32)$$

La transformée de Fourier d'un produit de convolution étant un produit simple, on a donc:

$$F(\omega) = \varepsilon_0 U(\omega) \chi(\omega) \quad (33)$$

En posant pour la susceptibilité:

$$\chi(\omega) = \chi'(\omega) - j\chi''(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) - 1 - j\varepsilon_r''(\omega) \quad (34)$$

Finalement en combinant (31) et (34), on obtient l'expression du courant de polarisation exprimé dans le domaine des fréquences [21]:

$$I(\omega) = C_0 \omega \left[\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} + \varepsilon_r''(\omega) + j\varepsilon_r'(\omega) \right] U(\omega) \quad (35)$$

2.3.6 Facteur de dissipation diélectrique ou pertes diélectriques

On constate que le courant est déphasé par rapport à la tension. Pour un diélectrique parfait ou idéal, c'est-à-dire sans pertes, ce déphasage serait de 90° . Mais dans la réalité cet angle est légèrement inférieur à 90° , à cause des pertes diélectriques représentées par le terme ε'' et des courants de fuite reliés à la conductivité, comme l'indique la figure 13 [17, 21].

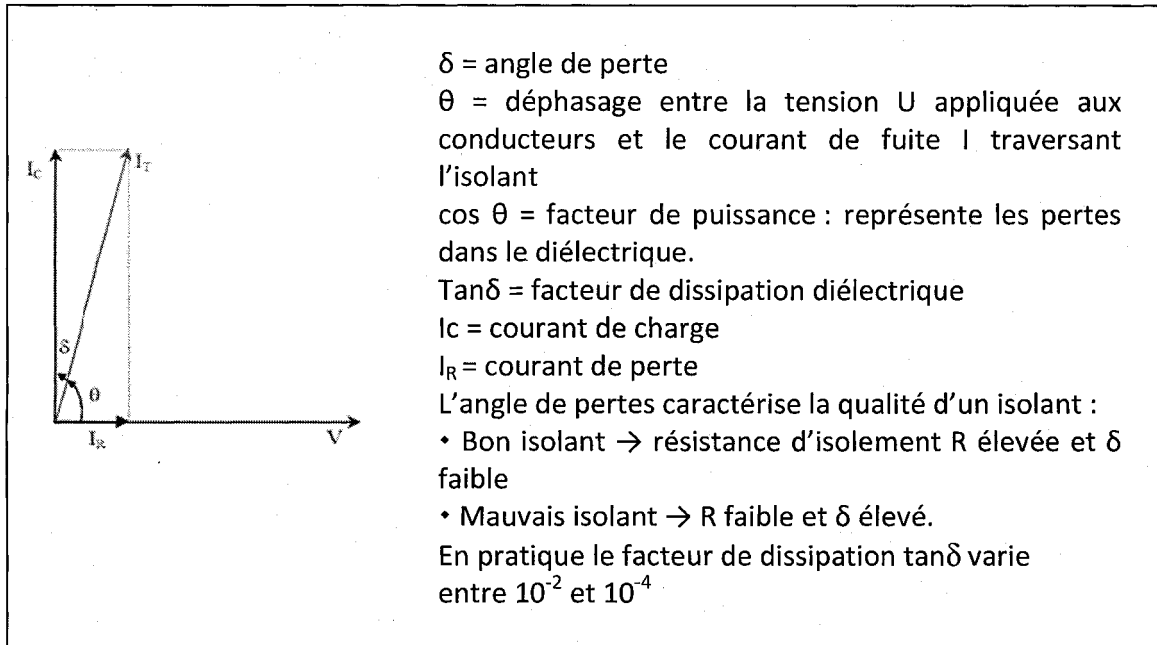


Figure 13: Représentation du facteur de puissance et du Facteur de dissipation diélectrique [17].

En utilisant le concept de capacité complexe pour décrire le comportement d'un diélectrique, l'expression du courant de polarisation (35) devient:

$$I(\omega) = j\omega[C''(\omega) - jC'(\omega)]U(\omega) \quad (36)$$

Où :

$$C'(\omega) = [\varepsilon_0 + \chi'(\omega)]C_0 \quad (37)$$

$$C''(\omega) = \left[\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} + \chi''(\omega) \right] C_0 \quad (38)$$

Le terme $\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega}$ représente les pertes produites par les charges libres, soit les pertes par conduction.

Le terme $\chi''(\omega)$ représente les pertes dues à l'inertie des charges liées, soit les pertes diélectriques.

La tangente de l'angle des pertes δ ($\tan \delta$) est souvent utilisée pour exprimer les pertes. Elle représente le rapport de la partie imaginaire sur la partie réelle. Selon la Figure 13, la tangente delta (ou le facteur de dissipation) est calculée selon l'équation suivante [17, 21] :

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''(\omega) + \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}}{\varepsilon_r'(\omega)} \quad (39)$$

Les pertes dues à la conduction étant souvent négligées, le facteur de dissipation $\tan \delta$ peut être exprimée par:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''(\omega)}{\varepsilon_r'(\omega)} \quad (40)$$

On peut également définir les pertes par unité de volume:

$$P_D = \varepsilon_0 \varepsilon_r' \omega \tan \delta E^2 \quad (41)$$

2.3.7 Circuit équivalent d'une isolation en courant alternatif

Un matériau isolant placé entre deux conducteurs peut être modélisé de manière simplifiée comme une connexion parallèle / série d'un condensateur et une résistance.

C représente la capacité entre les deux conducteurs et R est la résistance d'isolement de l'isolant; elle est toujours $\geq 10^{12} \Omega$ [17].

a) Circuit parallèle équivalent

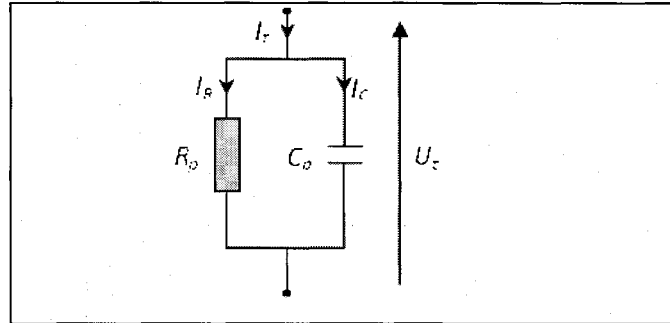


Figure 14: Circuit RC parallèle.

L'impédance Z_p équivalente du circuit RC parallèle (Figure 14) est:

$$Z_p = \frac{R_p}{1 + jR_p C_p \omega} = \frac{R_p}{1 + jR_p^2 C_p^2 \omega^2} (1 - jR_p C_p \omega) \quad (42)$$

$$\tan \delta = \frac{1}{R_p C_p \omega}; \quad \epsilon_r' = \frac{C_p}{C_o}; \quad \epsilon_r'' = \frac{1}{C_o R_p \omega} \text{ et } C_o = \epsilon_o \frac{S}{d} \quad (43)$$

Cette configuration explique le fait qu'en appliquant une tension alternative à un isolant, il y a une circulation d'un courant de fuite du aux composantes réactive et capacitive. Ce courant de fuite qui est négligeable pour un isolant de bonne qualité, peut pour une dégradation de la qualité de l'isolant devenir important et présenter un danger pour les personnes et les équipements. On note que pour un bon isolant, le courant I_C est 100 fois plus grand que I_R , et faisant un angle d'environ 90° avec la tension appliquée:

Pour une limite acceptable, on doit avoir I_c environ égal à $50 I_R$ et un angle θ environ égal à 88° [17].

Les pertes diélectriques sont représentées par les pertes joules dans R_p , soit:

$$P_D = U^2 / R_p = \omega C_p U^2 \tan \delta = \omega C_p \left(\frac{E}{d} \right)^2 \tan \delta \quad (44)$$

b) Circuit série équivalent

L'impédance équivalente au modèle RC série (figure 15) d'un diélectrique est [17] :

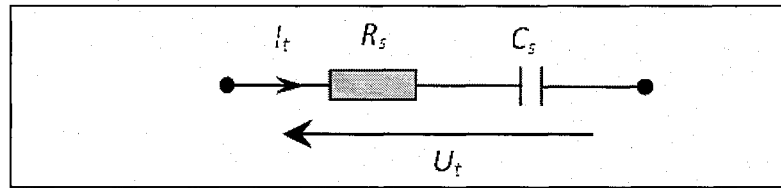


Figure 15: Circuit RC série.

$$Z_s = R_s - j \frac{1}{C_s \omega} \quad (45)$$

$$\tan \delta = R_s C_s \omega \quad (46)$$

$$\epsilon'_r = \frac{C_p}{C_o} \frac{1}{1 + (R_s C_s \omega)^2} \quad (47)$$

$$\epsilon''_r = \frac{C_s}{C_o} \frac{R_s C_s \omega}{1 + (R_s C_s \omega)^2} \quad (48)$$

$$\text{avec } C_o = \epsilon_o \frac{S}{d} \quad (49)$$

Les pertes diélectriques sont représentées par les pertes joules dans R_p , soit [17]:

$$P_{Dr} = \frac{U_R^2}{R_s} = U^2 \left[\frac{R_s}{R_s^2 + \left(\frac{1}{C_s^2 \omega^2} \right)} \right] = U^2 C_s \omega \left[\frac{\tan \delta}{1 + \tan \delta} \right] \quad (50)$$

2.4 Les mesures diélectriques des courants de polarisation et de dépolarisation

2.4.1 Les mesures dans le domaine du temps

2.4.1.1 Mesure des courants de polarisation et de dépolarisation (PDC)

a) Principe

Le schéma de principe de la mesure PDC est représenté à la figure suivante.

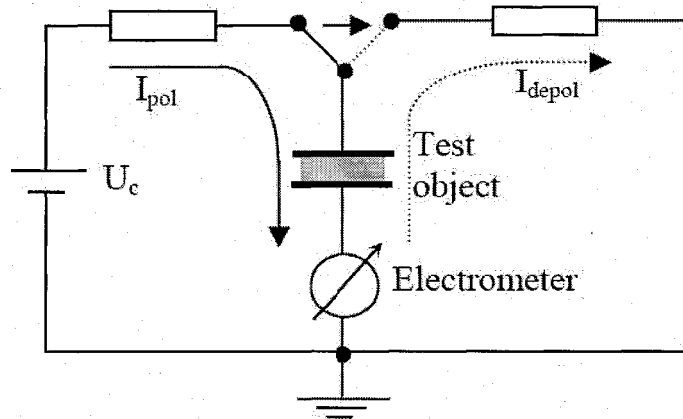


Figure 16: Schéma de principe de la méthode PDC [17].

Le principe de la mesure des courants de polarisation et de dépolarisation est basé sur l'application d'une tension continue sur l'objet à tester (le diélectrique) pendant une longue période (environ 10 000 secondes).

Pendant ce temps, le courant de polarisation $I_{pol}(t)$ résultant en raison de la conductivité de l'objet est mesuré. Ensuite, la tension est retirée et l'objet est court-circuité. Le processus précédent de la polarisation donne maintenant lieu à un courant de décharge $I_{dépol}(t)$ dans la direction opposée.

La figure 17 représente des courbes typiques du courant de polarisation et de dépolarisation.

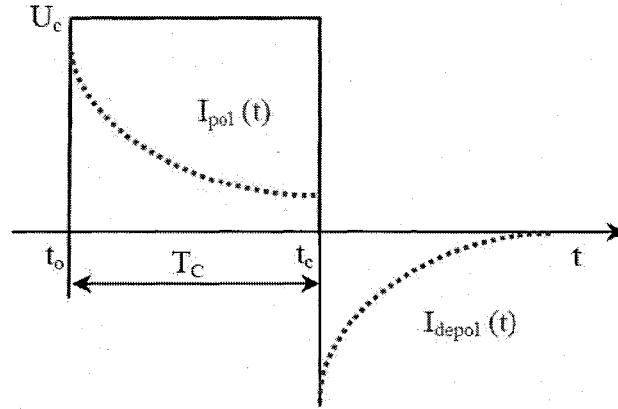


Figure 17: Courbes typiques de courant de polarisation et de dépolarisation [17].

Les courants de polarisation et de dépolarisation sont influencés par les propriétés des matériaux isolants ainsi que par la géométrie moyenne de la structure du système d'isolation et sont donnés par les expressions suivantes :

$$I_{pol}(t) = C_o U_c \left[\frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} + \varepsilon_{\infty} \delta(t) + f(t) \right] \quad (51)$$

$$I_{dépol}(t) = -C_o U_c [f(t) - f(t + T_c)] \quad (52)$$

Où

C_0 : Capacité géométrique de l'élément testé

$\varepsilon_\infty \delta$: Représente la polarisation instantanée à $t = 0$.

U_c : Échelon de tension appliquée

$\delta(t)$: Est la fonction Dirac et est la dérivée de l'échelon de tension appliquée à $t=t_0$

ε_∞ : Permittivité à une fréquence élevée égale à $(1 + \chi_\infty)$ (sans unité).

T_c : Représente le temps de charge (s)

σ_0 : Conductivité du matériau (S/m)

$f(t)$: Fonction de réponse du diélectrique

La conductivité σ_0 , du composant testé peut également être estimée à partir des mesures des courants de polarisation et de dépolarisation. En effet si le composant testé est chargé pendant un temps suffisamment long pour que $f(t+T_c) \equiv 0$, la fonction de réponse diélectrique $f(t)$ devient proportionnelle au courant de dépolarisation, et on obtient finalement,

$$\sigma_0 \approx \frac{\varepsilon_0}{C_0 U_c} (I_{pol}(t_b) - I_{dépol}(t_b)) \quad (53)$$

Ainsi même sans effectuer des mesures directes de la conductivité sur un échantillon d'huile, la conductivité de l'huile peut être calculée en utilisant l'équation (53) où $I_{pol}(t)$ et $I_{dépol}(t)$ sont les valeurs initiales des courants de polarisation et de dépolarisation [17].

b) Interprétation des données mesurées.

Les courbes de la figure 18 déterminées par la méthode PDC permettent d'obtenir les informations concernant l'humidité contenue dans le papier isolant, la conductivité de l'huile ainsi que les informations sur la dégradation de l'huile et son état de vieillissement.

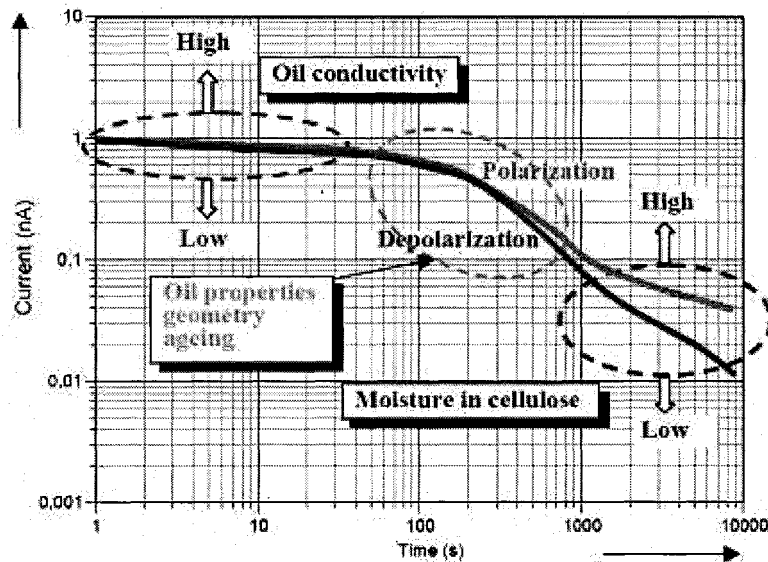


Figure 18: Interprétation des données de mesure PDC [17].

L'interprétation de cette figure nous indique que :

Le premier intervalle (1-100 secondes) est influencé par la conductivité de l'huile.

Les valeurs obtenues par le courant de fin de polarisation nous donne des informations sur la conductivité et donc de l'humidité contenue dans l'isolant [17].

2.4.1.2 Mesure de la tension de retour (RVM)

a) Principe

La méthode de mesure RVM d'un diélectrique est la plus ancienne, elle est basée sur la polarisation dans le domaine temporel permettant d'évaluer l'état de l'isolement. Le Schéma de principe de la mesure de cette technique est indiqué à la Figure 19.

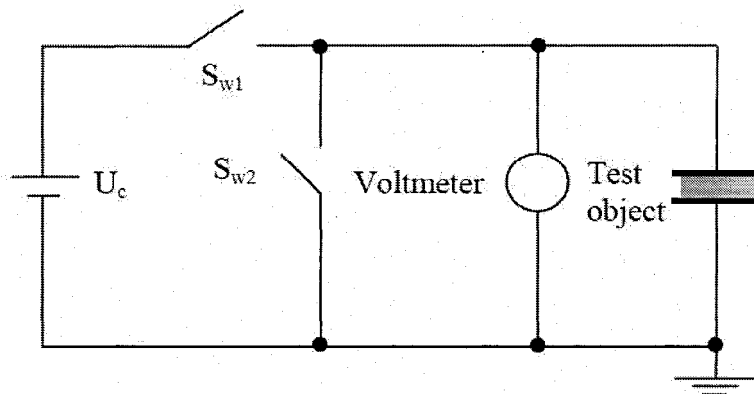


Figure 19: Schéma de principe de la mesure RVM [17].

Cette technique consiste à appliquer une tension continue U_c entre les électrodes du composant à tester. On utilise en général une tension variant de 500 à 2000 V pour tester le système d'isolation. Après une courte période T_d (temps de décharge) à partir du quel le circuit est ouvert une tension de rétablissement, $V_R(t)$ peut alors être mesurée. Après l'ouverture du court-circuit, les charges liées par la polarisation vont se transformer en charges libres et une tension va se créer entre les électrodes du diélectrique. Ce phénomène est appelé la tension de recouvrement, figure 19. La séquence de mesure de la tension de recouvrement est répétée de façon séquentielle pour un temps de charge T_c de 1 à 1200 s [17].

La densité de courant qui s'applique lors d'une mesure RVM est obtenue par l'équation suivante :

$$J(t) = \sigma_0 E(t) + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{dE(t)}{dt} + \varepsilon_0 \frac{d \left[\int_0^t f(t-\tau) E(\tau) d\tau \right]}{dt} \quad (54)$$

Pendant la tension de recouvrement, la densité du courant est nulle (boucle ouverte), l'équation (54) est résolue en considérant que $J(t)=0$. En admettant que la réponse de la fonction et la conductivité sont connues, le champ électrique peut être calculé à partir de cette équation. Le courant de dépolarisation à travers le composant testé, causé par la tension de recouvrement est décrit par l'intégrale de convolution [17].

La Figure 20 représente les courbes typiques des différentes étapes du processus de la mesure RVM.

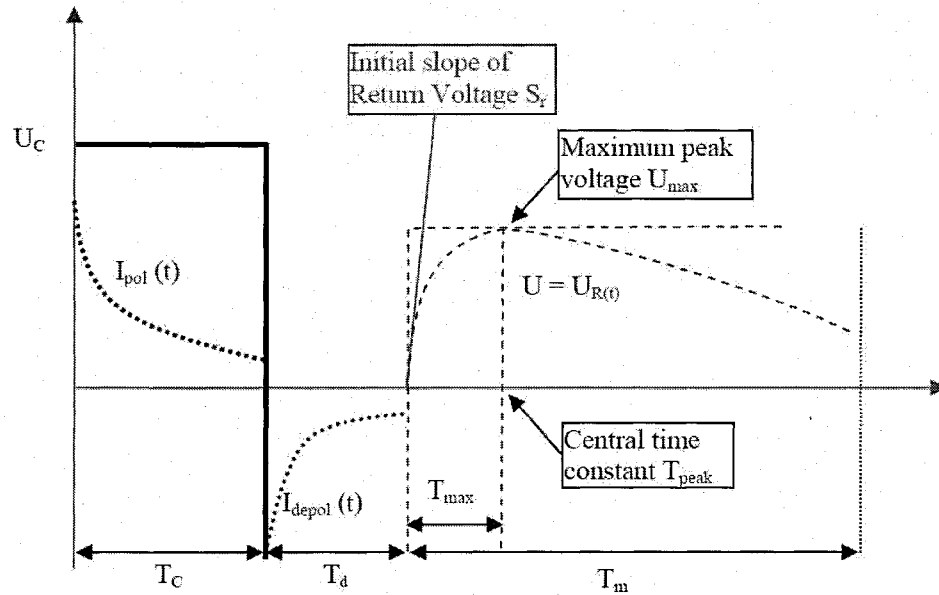


Figure 20: Courbes typiques des différentes étapes du processus de la mesure RVM [17].

b) Interprétation des résultats de la mesure.

Les paramètres de base recherchés lors d'une mesure de RVM (Figure 21) sont les suivants :

U_{\max} : La valeur de crête de la tension de rétablissement correspondant au maximum de la tension après l'ouverture du court-circuit du composant testé [V].

T_{peak} : la constante de temps centrale [s], obtenue à partir du maximum de la tension obtenue sur la courbe.

S_r : la pente initiale, correspondant à la pente de la montée de la tension immédiatement après l'ouverture du circuit [V/s].

La courbe indiquant les réponses du système d'isolation par rapport à la tension de polarisation est obtenue en reportant la valeur de crête de la tension de rétablissement (U_{\max}), la constante de temps centrale (T_{peak}) ou la pente initiale (S_r) par rapport à T_c , Figure 21.

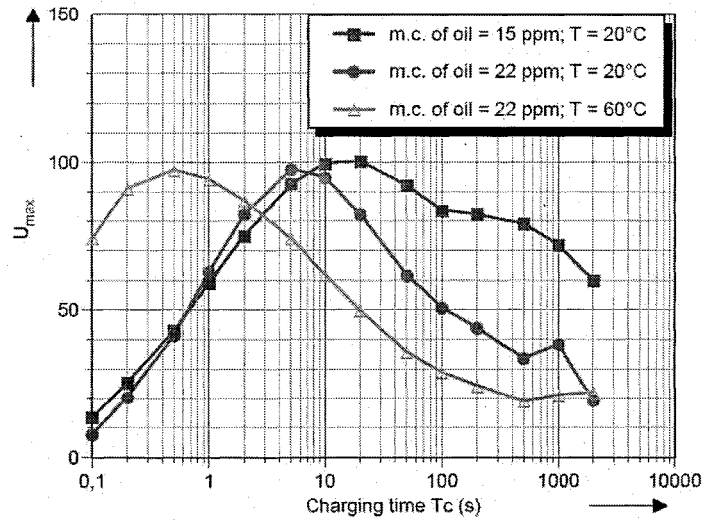


Figure 21: Exemple de courbe RVM [17].

2.4.1.3 Les mesures dans le domaine des fréquences

a) Principe:

Le principe de la mesure dans le domaine fréquentiel consiste à appliquer une tension sinusoïdale aux bornes du composant (diélectrique) dont on veut déterminer les paramètres. L'application de la tension alternative permet de mesurer le courant et le déphasage.

Puis par l'application de la loi d'Ohm, l'impédance du diélectrique est calculée.

$$Z(\omega) = \frac{U(\omega)}{I(\omega)} \quad (55)$$

La connaissance de $Z(\omega)$, de la tension $U(\omega)$, du courant $I(\omega)$ et du déphasage permet de déterminer les composantes capacitives et résistives de l'impédance où la partie résistive représente les pertes. Puis finalement l'angle de pertes ($\tan\delta$) ou le facteur de pertes. Le schéma de principe est représenté à la figure 22.

Cette technique permet également de déterminer les autres paramètres diélectriques tels que: la permittivité, la capacitance, la conductivité.

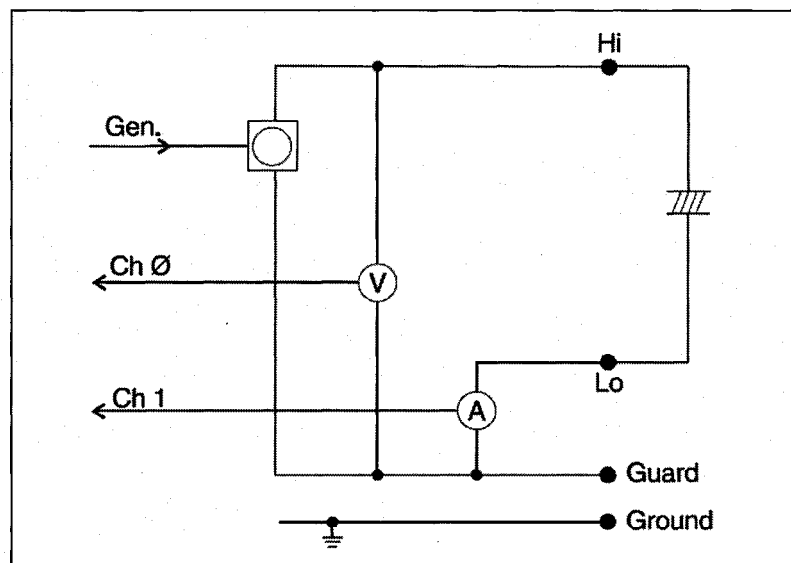


Figure 22: Schéma de principe de la mesure dans le domaine fréquentiel [16].

b) Interprétation résultats.

La technique de la mesure dans le domaine des fréquences permet de tracer la courbe de l'évolution du facteur de dissipation ou de la capacitance en fonction de la fréquence (figure 23).

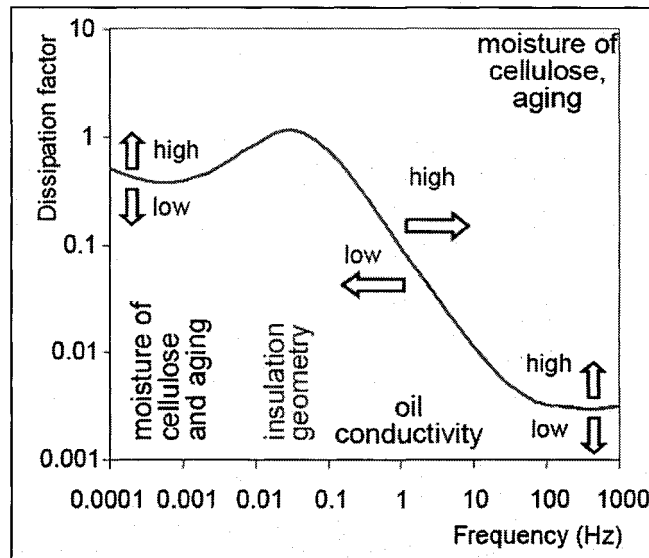


Figure 23: Courbe du facteur de dissipation en fonction de la fréquence [24].

La courbe du facteur de dissipation permet de déterminer l'état :

- De l'huile, par la mesure de la conductivité;
- Du papier, en indiquant le taux d'humidité contenu dans le papier et son état de vieillissement

2.5 État de l'art des travaux rapportés dans la littérature

2.5.1 Séparation de l'humidité et du vieillissement du papier

2.5.1.1 Mesure dans le domaine du temps (RVM) et (PDC)

Concernant les mesures diélectriques effectuées dans le domaine du temps (RVM et PDC), les recherches ont surtout mis en évidence l'impact des paramètres tels que les effets de la température, de la variation de l'humidité et du vieillissement sur les résultats

des tests obtenus. Les résultats des mesures, s'ils permettent d'obtenir un résultat global sur l'état de l'isolation (huile-papier) des transformateurs, ne peuvent pas permettre de déterminer avec une bonne précision, l'état de l'isolation solide (papier et carton) dont dépend la durée de vie du transformateur.

Il faut noter que la littérature abonde dans ce domaine, cela montre l'intérêt que suscite la nécessité de la mise en œuvre des nouveaux moyens ou du perfectionnement des moyens de diagnostic des transformateurs de puissance en particulier l'isolation solide. Mais ce qu'il faut noter, c'est que jusqu'à présent, les études entreprises dans le but de pouvoir connaître avec assez de précision l'état de l'isolation solide, n'ont pas encore abouti à des résultats permettant de déterminer l'état du papier. Les différents travaux de recherche ont abouti dans la majorité des cas aux conclusions suivantes:

- Küchler et al [25], ont établi que la mesure PDC permet d'obtenir des informations fiables sur l'état de l'isolation des transformateurs, en fournissant la quantité d'humidité contenue dans le système d'isolation ainsi que la conductivité de l'huile. Les autres éléments de diagnostic tels que la tangente δ , l'index de polarisation et les spectres de polarisation peuvent être directement calculés à partir des mesures PDC. Ils indiquent l'existence d'une bonne corrélation entre les résultats PDC, les résultats de titrage Karl-Fischer [25].
- Bassi et al [8], suite à leurs travaux, ont abouti à la même conclusion à savoir que les résultats des mesures PDC sont influencés par les effets de l'humidité et du

vieillissement, mais ils ajoutent que la teneur en eau représente une importante information concernant la fiabilité lors de la planification du fonctionnement et de gestion de la vie du transformateur [8].

- Saha et al [26], après avoir effectué les tests PDC sur un certain nombre de transformateurs ont suggérés que la mesure des courants de polarisation et de dépolarisation permet d'estimer l'humidité et en général l'état du vieillissement de l'isolation du complexe huile-papier par des calculs de la conductivité [26]. Ils ont également admis que la remise en état de l'huile réduit de façon importante le taux d'humidité de l'isolation et la teneur de furannes (éléments indicateur de l'état de l'isolation solide). Ils précisent que les sous-produits de vieillissement des transformateurs étant pour la plupart de nature polaire, restent liés à la surface du papier, finissent par se retrouver dans l'huile et en fonction des conditions d'exploitation à se déposer à l'intérieur du transformateur [26].
- Yao et al [27], entreprennent des travaux afin de séparer le vieillissement et les effets de l'humidité sur les mesures diélectriques dans le domaine du temporel (PDC et RVM). Ils ont abouti à la conclusion suivante:

Le courant de polarisation est très sensible à l'humidité, ainsi que l'huile et le papier qui ont été jugés sensibles à l'humidité et au vieillissement.

Concernant la mesure RVM, la constante de temps centrale a été jugée très sensible à l'humidité et au vieillissement.

Ils sont donc arrivés à la conclusion que les effets de l'humidité et du vieillissement de l'isolation papier des transformateurs de puissance ne peuvent pas être séparés par les mesures PDC et RVM. Ils ont néanmoins réorienté leurs travaux en intégrant divers paramètres : le nombre moyen, la masse moyenne et la valeur crête moyenne de la masse moléculaire (number average, weight average and peak average molecular weight) mesurés par le Gel Permeation Chromatography (GPC). Ils ont constaté de petites réductions du poids moyen moléculaire pour les échantillons vieillis ayant 2% d'humidité , tandis que pour les échantillons ayant une humidité de 3%, ils constataient une réduction significative du poids moléculaire pour les échantillons vieillis: Ils ont donc continué leur travaux en essayant de trouver une corrélation entre le courant de polarisation et les mesures chimiques [27].

- Noirhomme et al [28], ont présenté les premiers résultats des travaux initiés en 2002 par l'IREQ (Institut de recherche d'Hydro- Québec). Cette étude avait pour but d'évaluer le vieillissement du papier d'isolation des transformateurs. Après des mesures diélectriques PDC et FDS effectuées sur huit maquettes à différents taux d'humidité et à différentes étapes du vieillissement, les résultats ont clairement indiqué qu'il y avait une corrélation entre le degré de polymérisation du papier et les mesures PDC pour les maquettes ayant un taux d'humidité plus inférieur 2 %. Concernant les mesures effectuées dans le domaine fréquentiel, ils ont constaté

que le facteur de dissipation à 0,003 Hz semble avoir une bonne corrélation avec la dégradation du papier et que le facteur de dissipation $\tan\delta$ à 0,1 Hz semble en bonne corrélation avec le facteur de puissance de l'huile à 100 ° C qui a une relation avec la conductivité de l'huile. Ces mesures ont été effectuées sur le système d'isolation papier/huile des transformateurs. Cependant, l'effet du vieillissement et de l'humidité sur l'état de l'huile et du papier n'ont pas pu être séparé pour l'instant [28].

2.5.1.1 Mesure dans le domaine des fréquences (FDS)

Les chercheurs ont tenté de dissocier l'effet du vieillissement et de l'humidité, en utilisant la technique FDS afin de pouvoir déterminer l'état de la dégradation de l'isolation papier des transformateurs, en analysant les effets de la température, du vieillissement et de l'humidité sur le système d'isolation papier/huile des transformateurs.

Amir et al [29], ont confirmé à l'issue de leurs travaux que les mesures diélectriques peuvent être utilisées comme un outil pour le diagnostic des systèmes d'isolation papier/huile des transformateurs.

La qualité de l'huile ayant une forte influence sur les mesures de la réponse diélectrique, doit être prise en compte dans l'interprétation des résultats des mesures.

L'humidité peut être détectée par une augmentation de la capacitance du système d'isolation, cette augmentation présentant différentes valeurs aux différentes fréquences.

Le vieillissement produit le même effet sur l'humidité et sur les effets de la qualité de l'huile. Ces phénomènes peuvent être la base des erreurs commises dans la détermination de l'humidité par les méthodes mesure des réponses diélectriques.

La comparaison entre le comportement de la capacitance aux hautes et basses fréquences en fonction de l'humidité ou du vieillissement laisse entrevoir que la séparation des effets de l'humidité et le vieillissement peut être possible [29].

Omar et al [30], Entreprennent des études afin de déterminer l'influence du vieillissement et de l'humidité sur des échantillons papier imprégnés d'huile. Afin de simuler un vieillissement réel, ils ont ajouté des catalyseurs métalliques tels que l'aluminium, le cuivre, le zinc et le fer en respectant les proportions présents dans les transformateurs. Le but de ces études était de séparer l'effet du vieillissement et de l'humidité, à partir des mesures effectuées sur plusieurs échantillons de papiers imprégnés en utilisant les techniques RVM et FDS.

- La méthode RVM ne peut pas être utilisée pour obtenir une séparation de l'effet du vieillissement et de l'humidité car parmi les paramètres à considérer, la constante de temps centrale est très sensible au vieillissement et à l'humidité et de plus, aux hautes températures, les pics des spectres RV sont obtenus pour des temps très faibles.

- Concernant les mesures dans le domaine fréquentiel, ils ont axé leurs observations sur la fréquence à laquelle les courbes du facteur de dissipation $\tan\delta$ et du facteur de

puissance $\cos\theta$ se séparent. Ils ont constaté que les deux courbes étaient parfaitement confondues pour hautes fréquences (50-1000 Hz) et les fréquences intermédiaires (1 -50 Hz), se séparaient pour les basses fréquences (inférieures à 1 Hz). La séparation de ces deux courbes n'apparaissant pas pour une variation de l'humidité. Ils ont conclu qu'aux basses fréquences, le vieillissement et l'humidité peuvent être séparés [30].

Linhell et al [31], effectuent une étude dans le but de pouvoir séparer les effets du vieillissement et de l'humidité afin de pouvoir prédire l'état réel de l'isolation solide des transformateurs de puissance. Ils effectuent leur recherche sur des échantillons de papiers imprégnés ayant subi un vieillissement accéléré et en faisant varier le degré d'humidité, leurs investigations ont abouti aux résultats et aux constats suivants:

L'effet du vieillissement présente moins d'impact que l'effet de l'humidité et qu'un taux plus élevé d'humidité entraîne un vieillissement plus important, donc une plus grande dégradation du papier et par la même occasion une augmentation des pertes diélectriques.

Les pertes diélectriques sont causées par les acides produits par le vieillissement du papier ainsi que par les acides légers présents dans l'humidité contenu dans l'isolation.

Les acides lourds ne sont pas la cause de la dégradation du papier, tout simplement parce qu'ils ne sont présents que dans l'huile et à cela s'ajoute les poches d'air qui augmente la conductivité de l'huile. Finalement ils ont conclu que ce n'est pas la

dégradation du papier (la baisse du DP), qui influence les réponses diélectriques, mais que ce sont les sous produits liés au vieillissement qui influence les résultats: Pour cette raison dans le cas d'un transformateur réel, il n'est pas possible de faire la distinction entre les effets des acides et les effets de l'humidité. En conclusion finale, ils proposent que les diagnostics diélectriques doivent être complétés par des analyses chimiques de l'huile pour être en mesure de séparer le vieillissement de l'humidité [31].

En vue de vérifier les hypothèses formulées en 2004, Linhjell et Lundgaard [32] ont repris la même étude. Mais cette fois en ajoutant des acides au papier non vieillis, afin d'étudier la réponse sur la réponse diélectrique, puisqu'en 2004, ils avaient conclu que c'était l'effet des acides qui influençaient les résultats des mesures diélectriques. Les résultats ont indiqué que l'effet du vieillissement est faible par rapport à l'effet de l'humidité, car les échantillons humides présentaient des valeurs plus importantes. Ils ont conclu que l'effet de l'humidité et du vieillissement ne peut pas être séparé par les mesures diélectriques [32].

HASSAN GHARBI [33], dans le cadre un programme de la recherche initiée depuis 2002 par l'IREQ, visant à évaluer la séparation du vieillissement du papier des autres paramètres tels que l'humidité et le vieillissement de l'huile et cela, à partir des mesures diélectriques, a effectué ses travaux de recherche sur les maquettes de transformateurs développées à cet effet. Ses investigations ont montré que la séparation est possible en absence d'humidité excessive, c'est-à-dire pour des humidités inférieures à 2,25%. il a pu

mettre en évidence l'existence d'une relation entre la réponse diélectrique et l'état de l'isolation [33].

PROVENCHER Hélène [14, 34] a effectué des travaux de recherche dans le cadre du projet initié par l'IREQ. Ces travaux faisaient suite à ceux entrepris par HASSAN GHARBI [33]. Ainsi les mesures effectuées sur les échantillons de papier vieillis avec l'huile d'imprégnation ont permis de constater les points suivants :

- L'influence des produits de dégradation du papier n'affectent pas la mesure diélectrique de façon notable jusqu' à un DP de 600. L'étude n'ayant pas permis de vérifier cette influence pour des DP inférieurs à 600.
- Le type d'huile utilisé influence les mesures diélectriques du fait que le vieillissement d'une huile s'oxydant facilement contribue à l'augmentation des pertes diélectriques jusqu'à la fréquence d'au moins 0,0001 Hz sur le papier imprégné. Finalement selon les résultats obtenus, les mesures ont démontré qu'il n'existe pas de corrélation entre les mesures diélectriques et le degré de polymérisation qui est la mesure de vieillissement du papier, la mesure diélectrique étant dominée par l'huile [14, 34].

2.5.2 Conversion des mesures effectuées dans le domaine temporel au domaine fréquentiel.

Les mesures effectuées dans le domaine fréquentiel permettent d'obtenir aux basses fréquences (environ 0,1 mHz) des informations intéressantes concernant l'état de

l'isolation solide (papier et carton) des transformateurs de puissance. L'inconvénient majeur de cette méthode se trouve être le temps nécessaire pour effectuer une mesure, ce temps peut durer jusqu'à environ 15 heures, entraînant une immobilisation des transformateurs. Par contre les mesures effectuées dans le temps (PDC), permettent une mesure du courant de polarisation en une durée d'environ 2 heures 30 minutes. Pour remédier à l'inconvénient de la technique FDS, plusieurs travaux de recherche ont été entrepris dans le but de pouvoir convertir les mesures effectuées dans temps (PDC) au domaine fréquentiel (FDS). Ce qui entraînerait un gain de temps important. Les travaux des chercheurs ont permis la mise en œuvre de plusieurs méthodes permettant d'effectuer la transformation temps-fréquences des mesures de réponse diélectriques effectuées dans le domaine temporel (PDC), à savoir [35, 36, 37, 38, 39]:

- Les réponses diélectriques universelles (Les fonctions analytiques telles que les réponses diélectriques universelles, Curie-von Schweidler (At^{-n}) et Debye (Be^{-mt})),
- L'approximation de Hamon
- La méthode d'intégration numérique directe appliquée à la fonction de réponse du courant de dépolarisation
- Décomposition du courant de dépolarisation PDC en une somme de fonctions exponentielles
- La Transformation de Fourier Rapide.

Nous présentons dans cette partie, quelques-uns des conclusions des travaux des chercheurs ayant travaillé sur ce projet, en commençant par les travaux de HAMON, qui fut le précurseur des travaux de la conversion des mesures diélectriques.

5.5.2.1 Présentation des travaux

Hamon, a démontré en développant une méthode approximative qui s'appellera par la suite «méthode de Hamon» que le facteur de pertes diélectriques (dans le fréquentiel) d'un matériau diélectrique peut-être déduit à partir de son courant de charge (dans le domaine temporel). Cette déduction est obtenue avec une précision d'environ 5% et cela, sous certaines conditions [35].

Shayegani et al [36], ont étudié en détail les différentes méthodes de transformation des données PDC, afin de déterminer leur précision et surtout leurs limites d'emploi, (figure 24).

Ils ont démontré que la précision des différentes méthodes se trouve être limitée non seulement par la précision du calcul de la capacité dû à la géométrie de l'équipement testé, mais également par les différents comportements de la conduction et de la polarisation en courant continu et en courant alternatif en raison de la non linéarité du milieu diélectrique. Les limites de l'utilisation de ces différentes méthodes sont décrites ci-dessous :

- ♦ Les fonctions analytiques telles que les réponses diélectriques universelles (Curie-von Schweidler (At^{-n}) ou Debye (Be^{-mt})), permettent d'effectuer la transformation. Mais lorsque la courbe de dépolarisation possède plus de 2 pentes dans le diagramme log-log, la précision de la transformation sera réduite.

- ♦ La méthode numérique intégrale directe se prête très bien à la transformation des données mesurées en PDC vers le domaine fréquentiel, spécialement dans la gamme des basses fréquences.

- ♦ La décomposition du courant de dépolarisation PDC en une somme de fonctions exponentielles est une autre méthode appliquée avec succès

- ♦ Les résultats de l'utilisation l'approximation de Hamon ont montré l'applicabilité de cette méthode pour la transformation des données PDC des papiers imprégnés. Toutefois pour une bonne applicabilité de nombre de pente de la courbe du courant de polarisation devrait être compris entre 1 et 2 dans le diagramme log-log, afin d'obtenir une bonne précision [36].

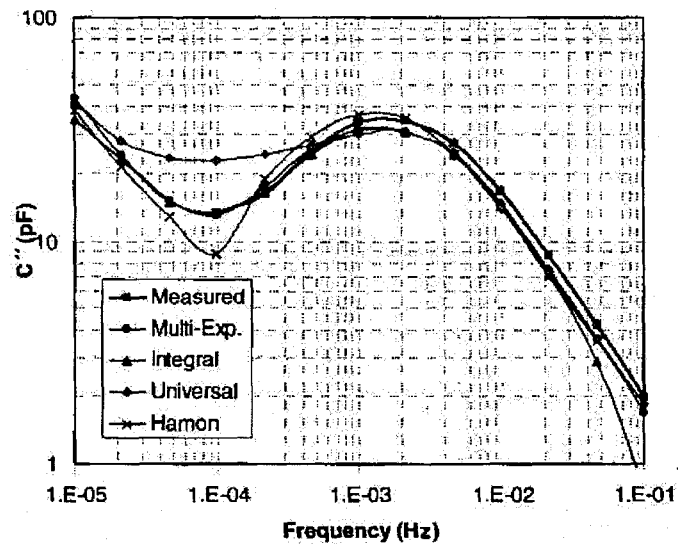


Figure 24: Comparaison des différentes méthodes [36].

Shayegani et al [37], dans le but d'améliorer les résultats obtenus en 2004, ont continué leurs investigations en étudiant la précision des différentes méthodes de transformation. Cette fois, les essais ont été effectués sur du papier imprégné d'huile et sur un système papier/huile. De plus la tension appliquée (donc le champ), était variable, ainsi que le temps de charge, entraînant une limitation de la fréquence. Concernant le cas du système papier/huile, ils ont constaté que lorsque la tension était faible, le système d'isolation avait un comportement linéaire. La méthode de Hamon dans ce cas pouvait être utilisée avec une très bonne précision. Mais pour des tensions très élevées, le comportement du système devenant non-linéaire, entraînait une diminution de la précision. Pour le temps de charge, il a été constaté que pour des faibles temps d'application, la précision était meilleure, mais pour des temps élevés la précision diminuait.

Ces différents cas limitaient la précision de la méthode de Hamon. Les autres méthodes, pouvait être appliquées avec moins d'erreurs.

En conclusion il a été admis que l'utilisation de la transformation PDC-FDS, permet de réduire le temps du diagnostic des transformateurs de puissance [37].

Kwan Chi Kao, a également montré que l'approximation de Hamon est utile pour une évaluation rapide des pertes diélectriques et la constante diélectrique à partir de la mesure du courant de polarisation ou la dépolarisation pratiqués sur les matériaux diélectriques, tels que les polymères [38]. Il a toutefois indiqué que l'approximation de Hamon n'est pas rigoureuse, puisque son expression ne tient pas dans la pratique sur tout l'intervalle du temps. Plus tard, Hyde [84] a résolu le problème de la transformation temps - fréquence à partir du calcul intégral des données du courant transitoire par rapport au temps, c'est-à-dire, la charge $Q(t)$ [38].

Saha et al [39], entreprirent les travaux dans le but de pouvoir déterminer les paramètres tels que le facteur de dissipation ($\tan\delta$) et la capacitance complexe ($C(\omega)$) du système d'isolation papier-huile des transformateurs de puissance, en utilisant la méthode de la décomposition du courant de dépolarisation PDC en une somme de fonctions exponentielles. À travers les résultats obtenus à partir de simulation, ils ont montré l'existence d'une corrélation entre les mesures effectuées dans le domaine temporel et les

résultats obtenus dans le domaine fréquentiel. Ils ont néanmoins précisé qu'il faut que le système d'isolation se comporte comme un système linéaire [39].

2.5.3 Conclusion

2.5.3.1 Séparation de l'humidité et du vieillissement du papier

Jusqu'à présent, les travaux effectués en vue de trouver une corrélation entre le vieillissement, l'âge et l'état du papier, n'ont pas encore abouti à des résultats permettant d'établir de manière claire et précise, l'état de la dégradation de l'isolation solide (papier ou carton) des transformateurs à partir de des mesures diélectriques (PDC, RVM et FDS). Nous avons cependant noté avec intérêt que:

Les mesures PDC sont influencées par le vieillissement du système d'isolation papier/huile ainsi que par l'humidité et se traduisent par une augmentation des courants de polarisation et dépolarisation. Cette technique permet d'avoir une idée globale de l'état du système d'isolation papier/huile des transformateurs et de pouvoir planifier les opérations de maintenance. Mais à ce jour l'impact de ces deux paramètres n'a pas encore été dissociée.

Concernant la technique RVM, il a été établi que les paramètres des spectres influencés par la température, l'humidité, le vieillissement et la géométrie de l'isolation, sont la tension maximale de retour U_{max} , la constante de temps centrale (T_{peak}) et la pente initiale (S_r). L'humidité et le vieillissement de l'isolation papier/huile influencent

particulièrement la constante de temps centrale (t_{peak}) et la pente initiale (S_r). Cette méthode n'a pas encore permis d'obtenir une séparation possible de l'effet de l'humidité et du vieillissement.

Concernant la technique FDS, il y a des pistes prometteuses, en effet il a été établi que l'effet de l'humidité peut être détecté en constatant une augmentation de la capacitance du système d'isolation aux basses fréquences. Il a également été constaté une séparation du facteur de dissipation $\tan\delta$ et du facteur de puissance $\cos\theta$ aux basses fréquences: Cette séparation étant causée par l'effet du vieillissement. Ces constats laissent entrevoir que la séparation des effets de l'humidité et du vieillissement peut être possible.

On peut donc conclure en affirmant que jusqu'à présent et aux meilleures de nos connaissances, les études menées n'ont pas encore permis de déterminer à partir de l'analyse par les méthodes de spectroscopie diélectrique, de déterminer si l'isolation solide d'un transformateur a atteint ou non sa durée de vie utile.

2.5.3.2 Conversion des mesures effectuées dans le domaine temporel au domaine fréquentiel.

Les bases théoriques de la faisabilité de cette transformation ont été développées par plusieurs chercheurs. Ils ont démontré que la transformation des mesures des caractéristiques diélectriques du système d'isolation papier/huile des transformateurs de

puissance, matérialisé par la mesure du courant de polarisation et de dépolarisation (PDC), effectuée dans le domaine du temps, peut être convertie dans le domaine fréquentiel. Cette transformation permet de déterminer les caractéristiques telles que le facteur de dissipation ($\tan\delta$), la capacitance, la permittivité relative. Elle permet ainsi d'obtenir un gain de temps très important dans le diagnostic des transformateurs de puissance. Nous avons noté également qu'il existe plusieurs méthodes pouvant être utilisées pour la réalisation de cette transformation, caractérisées par la précision obtenue lors de la transformation.

CHAPITRE 3

MATÉRIELS ET MÉTHODES DE MESURES

3.1 Introduction

L'atteinte de l'objectif principal du projet de recherche à savoir la séparation de l'effet de l'humidité et du vieillissement sur l'isolation solide (papier et carton) des transformateurs de puissance, repose en premier lieu sur le bon déroulement des tests et mesures à effectuer, c'est-à-dire la réalisation avec une bonne précision des mesures ou des tests à effectuer tout en conformité avec les standards. Dans le domaine du contrôle et du diagnostic du système d'isolation papier/huile des transformateurs de puissance, toutes mesures et tous les tests sont effectués selon des essais conventionnels appelés normes ou standards, qui sont indispensables pour apprécier l'état du système d'isolation neuf et après plusieurs années d'exploitation.

Dans ce chapitre, nous présenterons les matériels, les appareils et les méthodes ou les techniques de mesure et de diagnostic utilisés dans notre étude. Les méthodes de

mesure et les techniques de diagnostic seront toutes réalisées conformément aux standards de la norme ASTM (American Society for Testing and Materials).

3.2 Mesure de l'humidité

L'humidification est considérée comme étant parmi les principales causes de la défaillance des équipements de haute tension, dans la mesure où elle entraîne une baisse des performances diélectrique des isolants par l'augmentation de la conductivité électrique, du facteur de dissipation et la diminution de la résistivité du système d'isolation. Pour cette raison, il s'avère indispensable de pouvoir déterminer avec précision la quantité d'eau (teneur en eau) contenue dans le système d'isolation: La détermination de la teneur en eau est réalisée par titrage coulométrique de Karl Fisher selon le standard ASTM D1533 [40]. Pour la détermination de la teneur en eau des échantillons de papier, nous utiliserons le titreur automatique Karl Fischer 831 KF Coulometer (fabriqué et commercialisé par la société Metrohm) avec électrode génératrice sans diaphragme accompagné du four KF. Ce four est nécessaire lorsqu'il s'agit de déterminer la teneur en eau des échantillons solides tels que le papier. La figure 25 représente une photographie de l'équipement utilisé.

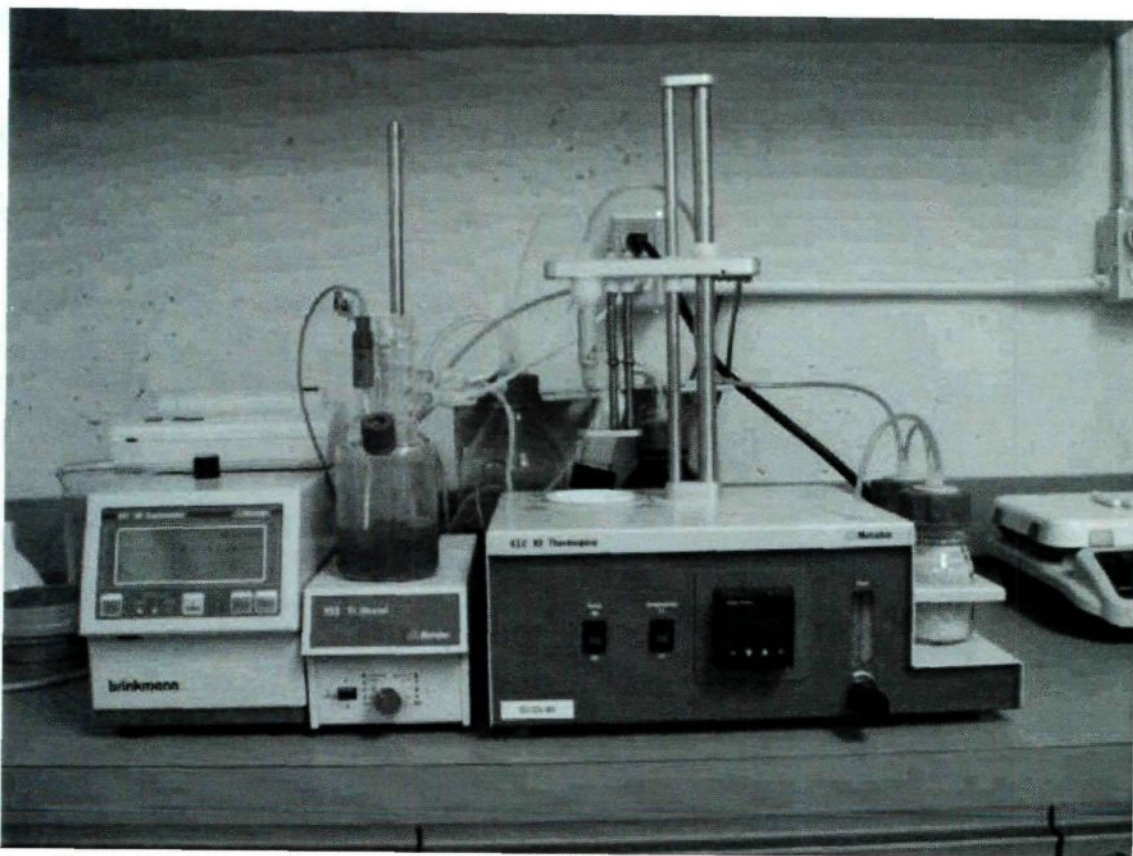


Figure 25: Titreur Coulométrique Karl Fisher pour la mesure de la teneur en eau.

La teneur en eau de l'huile est exprimée en parties par million (μg d'eau par g d'huile), notée ppm, tandis que la teneur en eau du papier est exprimée en pourcentage (%), à savoir la masse d'eau par la masse de l'isolant sans eau.

3.3 Préparation des échantillons

L'échantillon (papier ou carton) à analyser est chauffé dans le four connecté au Titreur Coulométrique, l'eau libérée par le chauffage du papier est transportée à l'aide d'un gaz porteur sec dans la cellule de titrage KF, où elle est ensuite déterminée par réaction. Comme seule l'eau est en contact avec la solution initiale et que l'échantillon lui-

même n'entre pas directement en contact avec le réactif KF, les réactions secondaires et les effets de matrice indésirables sont éliminés [41].

3.4 Mesure du facteur de dissipation diélectrique

La mesure du facteur de dissipation diélectrique ou $\tan\delta$ fait partie des mesures électriques appliquées aux transformateurs de puissance, en vue de diagnostiquer leur système d'isolation. Le facteur de dissipation des diélectriques constitue un moyen de contrôle de la qualité des isolants liquide et solide, permettant ainsi la mise en œuvre de la planification des opérations de maintenance. Notons que la technique de la mesure dans le domaine fréquentiel permet également la mesure des autres paramètres tels que: la permittivité relative, la capacitance, la conductivité, le facteur de pertes, etc.

La mesure du facteur de dissipation diélectrique est réalisée selon les prescriptions de la norme ASTM D 150-98 [42]. L'appareil utilisé pour la mesure du facteur de dissipation diélectrique est IDA 200 (figure 26). Le système IDA 200 calcule l'impédance d'un échantillon par une mesure de la tension et du courant en fonction d'une fréquence variable allant de 1 kHz à 0,1 MHz. Une unité de traitement du signal numérique génère un signal d'essai selon la fréquence désirée. La tension et le courant à travers sont mesurés avec une grande précision en utilisant un diviseur de tension et un électromètre. La mesure du courant et de la tension permet de déterminer l'impédance $Z(\omega)$ (voir l'équation (55)) et les autres paramètres du système d'isolation.

Le système IDA 200 utilise la cellule de test des papiers et carton (Guard ring capacitor) de type 2914, fabriqué par Tettex Instruments (figure 27) et à cet ensemble il faut ajouter le moniteur de température (Temperature control unit) de type 2967, fabriqué par Tettex Instruments, voir la figure 28 qui permet de contrôler la température de l'isolant sous test.

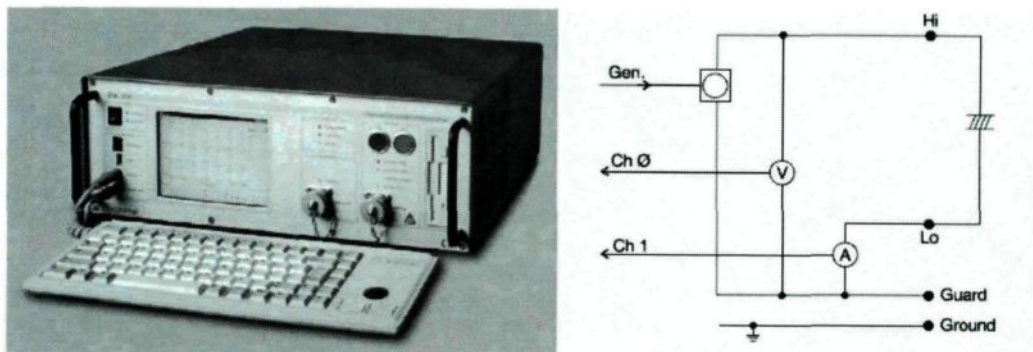


Figure 26: Système de diagnostic d'isolation IDA 200 pour la mesure du facteur de dissipation et de la conductivité.



Figure 27: Cellule de mesure du papier.



Figure 28: Unité de contrôle de la température - type 2967.

3.5 Mesure du degré de polymérisation (DPv)

Dans l'industrie, la détermination du degré de polymérisation moyen (DPv) de la cellulose se fait par une méthode viscosimétrique après dissolution de la cellulose dans la cupréthylènediamine, conformément au standard de la norme ASTM D 4243 – 99 [43]. Le degré de polymérisation pour le papier cellulose correspond au nombre des monomères anhydro- β -glucose, dans une molécule de cellulose.

Elle est effectuée à l'aide d'un viscosimètre de type capillaire (Cannon-Fenske Routine), illustrée à la figure 29. Le principe de la mesure du DP est basé sur une mesure viscosimétrique. Elle consiste à dissoudre 25, 50 ou 125 mg de papier (en fonction du degré de vieillissement du papier) dont on connaît la teneur en eau dans 22,5 ml d'eau distillée auquel on ajoute 22,5 ml de Cupriéthylènediamine 1 N. Après la dissolution on remplit le bulbe B, puis à partir de la mesure des temps d'écoulement du solvant et de la

solution entre les niveaux C et E, on détermine la viscosité intrinsèque η . Connaissant la viscosité, on peut alors calculer le DPv à l'aide la formule suivante [43]:

$$\eta = k.DP_v^\alpha \quad (56)$$

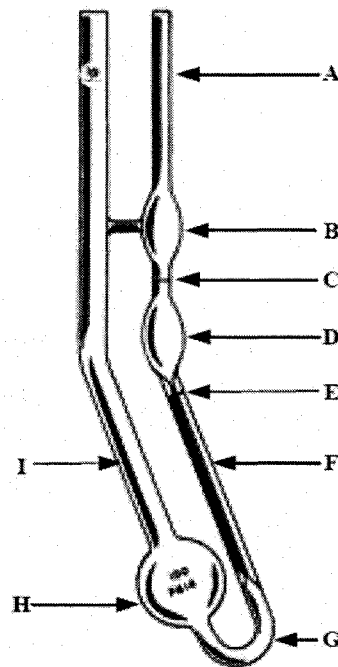


Figure 29: CANNON-FENSKE Viscometers.

3.6 Conclusion

Les différents matériels et les méthodes expérimentaux présentés dans ce chapitre, représentent les éléments indispensables à la bonne réalisation de notre projet. L'utilisation du matériel et la mise en œuvre des procédures des mesures seront réalisées conformément aux standards de la norme ASTM.

CHAPITRE 4

ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Nous allons analyser dans ce chapitre l'évolution des différents paramètres diélectriques en fonction de l'humidité et du vieillissement, afin de pouvoir mettre en évidence si possible, les paramètres sensibles à l'impact séparé de l'humidité et du vieillissement. Cette analyse devant permettre dans la mesure du possible, de mettre en évidence la séparation de l'effet du vieillissement et de l'humidité. L'analyse et l'interprétation des données des mesures prendront également en compte les conclusions des travaux antérieurs effectués par d'autres chercheurs.

4.1 Mesure du degré de polymérisation du papier

Afin de vérifier le vieillissement effectif des échantillons de papier utilisés pour l'étude, le degré de polymérisation (DP) a été mesuré pour chaque niveau de vieillissement accéléré, ainsi que pour le papier neuf et cela conformément à la norme ASTM 4243 [43].

NOMBRE D'HEURES DE VIEILLISSEMENT	DEGRÉ POLYMÉRISATION
0 heures	1322
250 heures	1099
500 heures	827
750 heures	740
1000 heures	425

Tableau 4: Résultats de la mesure du degré de polymérisation.

Les résultats de la mesure du DP indiquent que la qualité du papier diminue avec le vieillissement.

4.2 Effet de l'humidité.

Afin de mettre en évidence l'impact de l'humidité sur les propriétés diélectriques des isolants, nous avons, pour chaque niveau de vieillissement, fait varier le taux d'humidité de chaque échantillon. Et cela, avant de procéder aux mesures des paramètres diélectriques dans le domaine fréquentiel à l'aide du IDA 200, le taux d'humidité étant mesuré à l'aide du titreur coulométrique Karl-Fischer. Après les mesures, nous avons analysé les différentes courbes du facteur de dissipation qui est un facteur très important dans l'analyse de la qualité des isolants. Ce facteur permet d'obtenir les informations concernant les qualités diélectriques des isolants. En effet, pour un bon isolant, le facteur de dissipation doit avoir une valeur très faible variant entre 2.10^{-3} et 4.10^{-3} [44]. Le déphasage entre la tension et le courant fournit également des informations sur la qualité des diélectriques. En effet pour un diélectrique parfait, on devrait avoir un déphasage entre la tension et le courant de 90 degrés. Mais lorsque le papier se dégrade, la

conductivité augmentant entraîne la diminution de la résistance et conséquemment l'augmentation du facteur de dissipation. Les figures 30 à 35, représentent respectivement les résultats de la $\tan\delta$ et du déphasage des mesures effectuées sur des échantillons de papier ayant un vieillissement accéléré de 250 heures avec différents niveaux d'humidité.

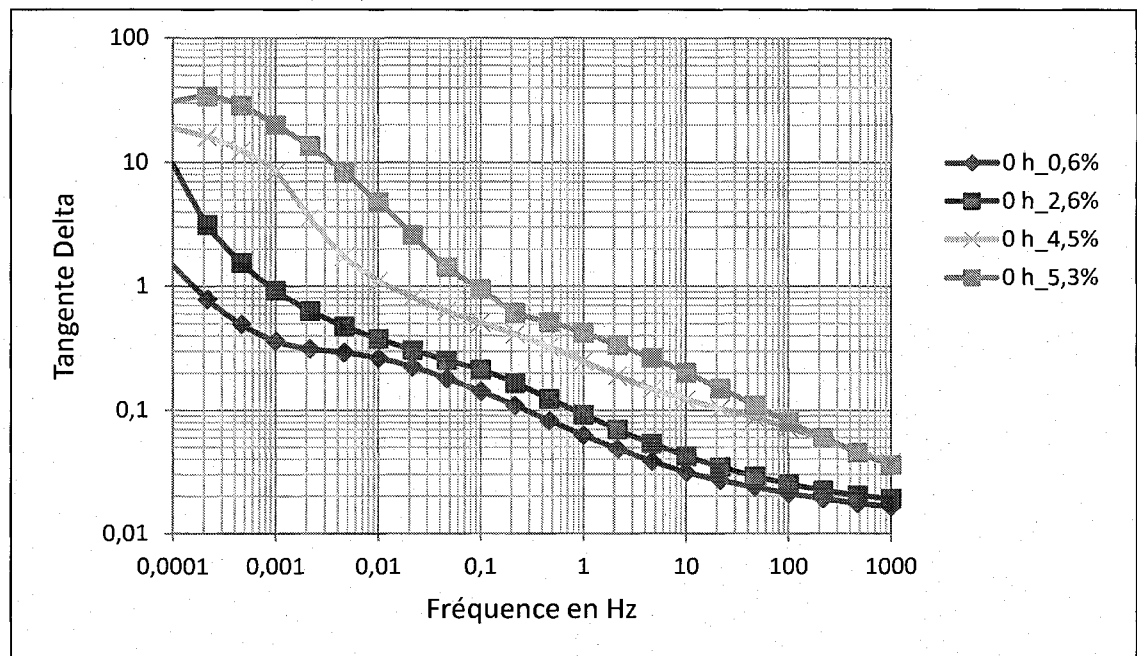


Figure 30: Évolution de la $\tan\delta$ en fonction de l'humidité pour un papier neuf.

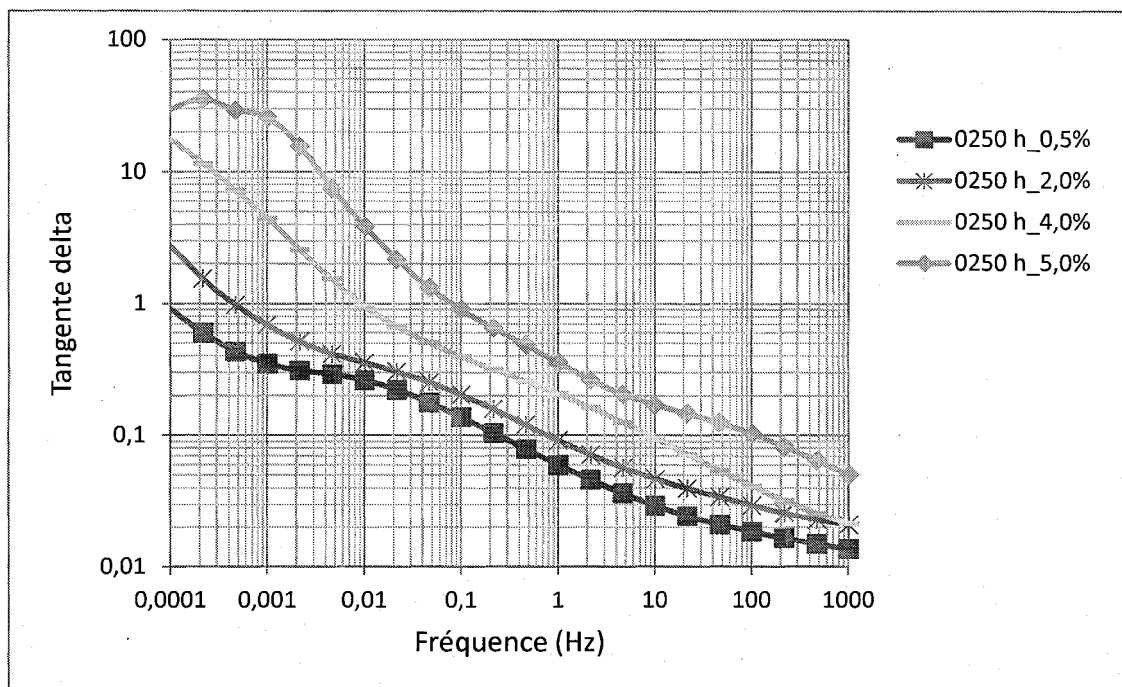


Figure 31: Évolution de la $\tan\delta$ en fonction de l'humidité pour un papier vieilli à 250 h.

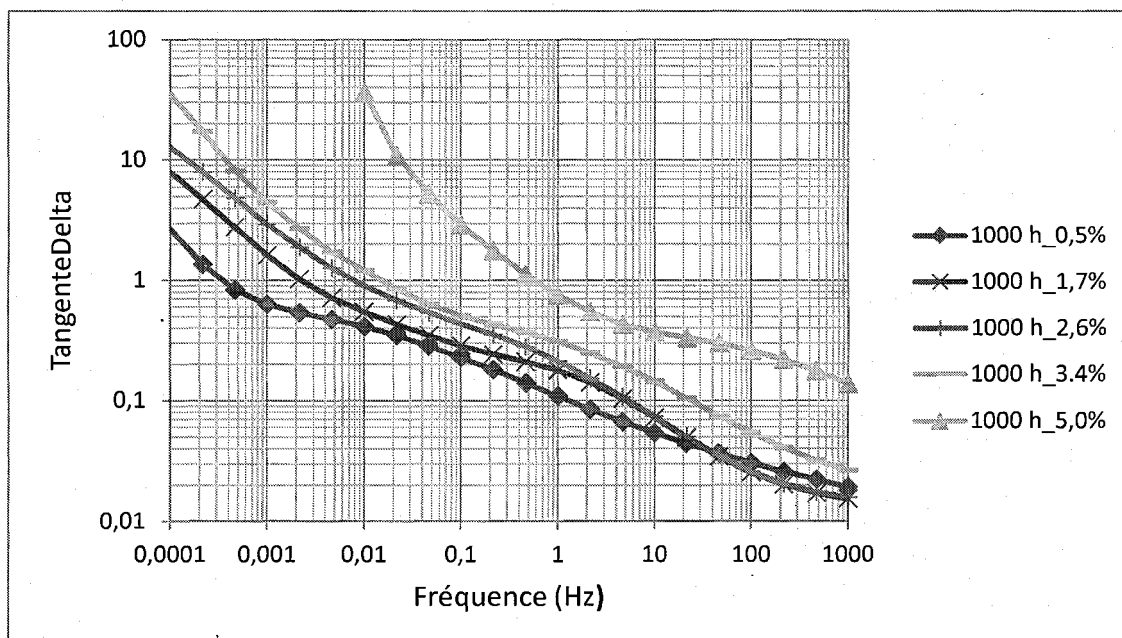


Figure 32: Évolution de la $\tan\delta$ en fonction de l'humidité pour un papier vieilli à 1000 h.

Il est important de souligner que les légendes dans les graphiques illustrent la durée du vieillissement et le taux d'humidité dans l'isolant solide. À titre d'exemple, « 1000 h_0,5% » signifie que l'isolant a subi un vieillissement de 1000h, le taux d'humidité mesuré était de 0,5%. L'analyse des courbes (figures 30 à 32) indique que le facteur de dissipation (tangente delta) est influencé par l'effet de l'humidité. On peut ainsi constater que la variation de l'humidité entraîne la variation du facteur de pertes diélectriques, en clair une augmentation de l'humidité entraîne une augmentation des pertes. Ce comportement est dû à l'hygroscopicité élevée du papier qui découle du caractère fortement polaire de la cellulose. Une partie de l'eau se fixe aux groupements hydroxyle (OH) de la cellulose et l'autre partie pénètre dans les capillaires par absorption classique, conduisant ainsi à une réduction des propriétés mécaniques et électriques [14].

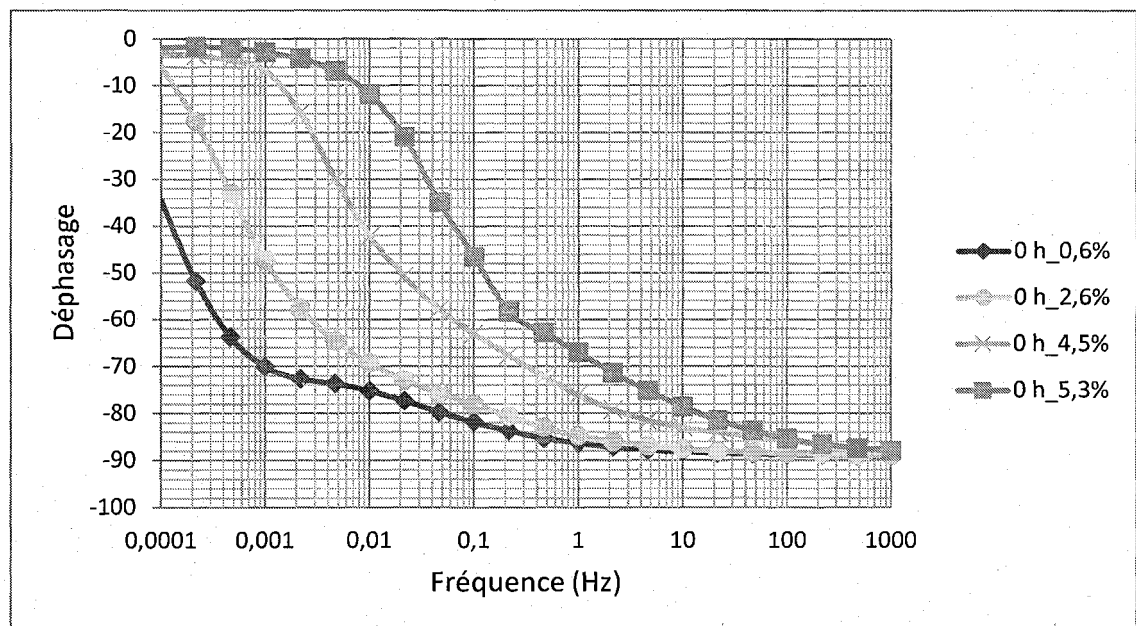


Figure 33: Évolution du déphasage en fonction de l'humidité pour un papier neuf.

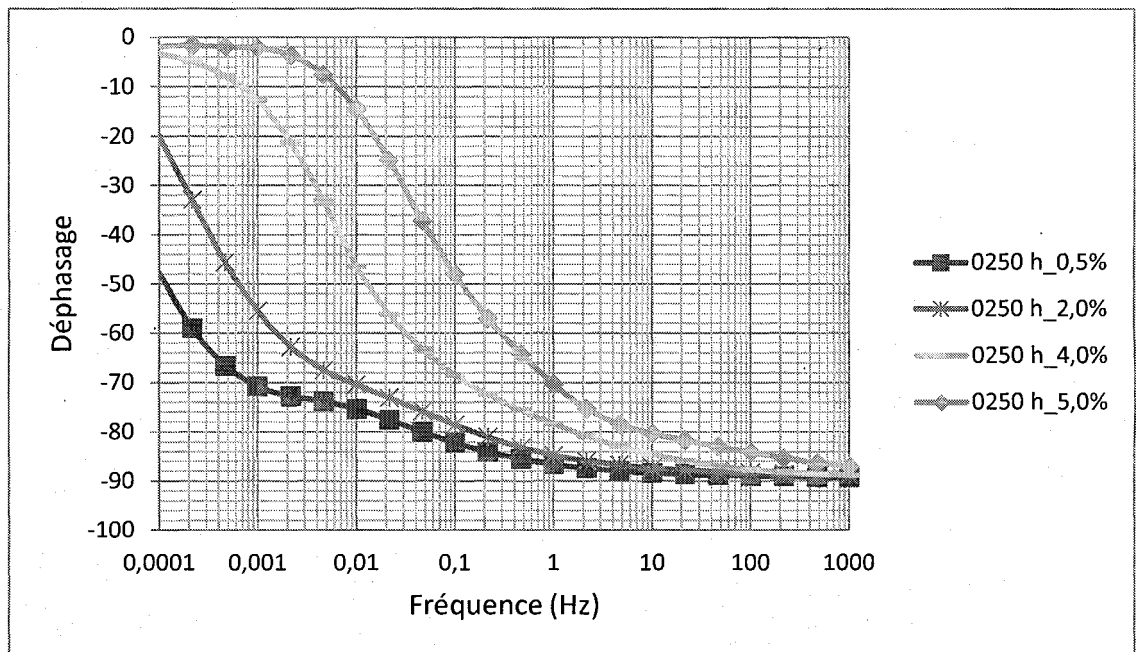


Figure 34: Évolution du déphasage en fonction de l'humidité pour un papier vieilli à 250 h.

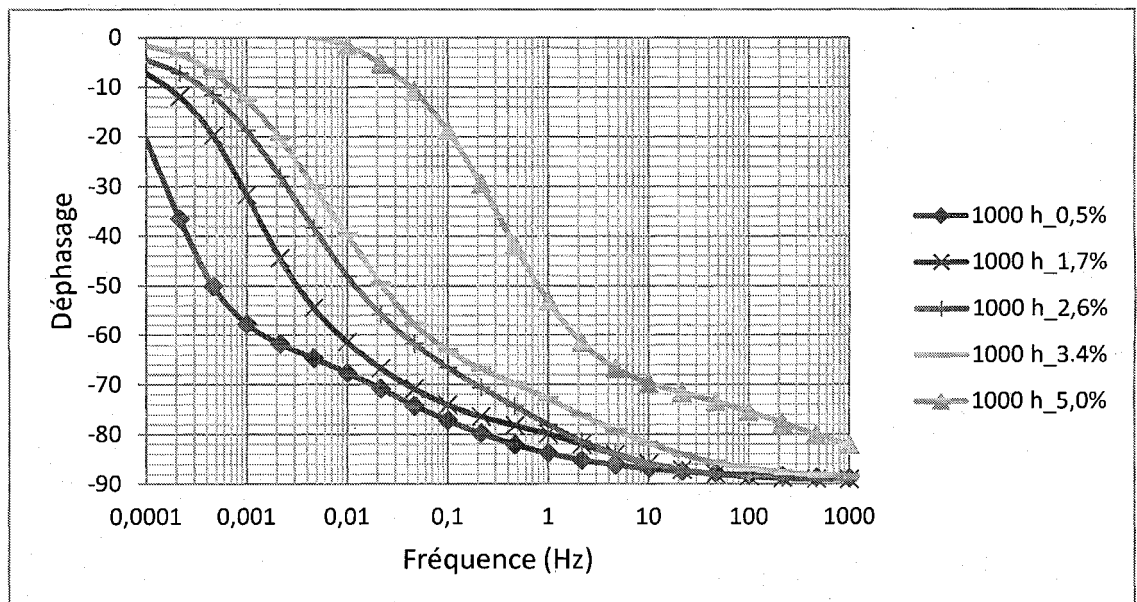


Figure 35: Évolution du déphasage en fonction de l'humidité pour un papier vieilli à 1000 h.

De même que le facteur de dissipation, le déphasage est également influencé par le taux d'humidité dans les isolants, ainsi on constate que pour des faibles teneurs en eau, l'impédance des diélectriques est globalement capacitive (figures 33 à 35).

4.3 Effet du vieillissement

Il est admis que lorsqu'un matériau diélectrique se dégrade, le nombre de dipôles électriques augmente et conséquemment le courant de polarisation, celui relié au mouvement des dipôles, augmente aussi, entraînant par la même occasion l'augmentation des pertes diélectriques. Pour mettre en évidence ce comportement des diélectriques, nous avons fait subir aux échantillons de papier un vieillissement accéléré (250, 500, 750 et 1000 heures) dans un four. Pour chaque niveau de vieillissement, nous avons mesuré à l'aide du IDA 200, le facteur de dissipation, ainsi que le déphasage et tous les autres paramètres diélectriques, en gardant fixe, le plus possible, le degré d'humidité, dans ce cas il est entre 0.5% et 0.6%. Suite aux mesures, nous avons analysé les courbes représentant le facteur de dissipation et le déphasage pour différents niveaux de vieillissement et cela pour presque un même taux d'humidité (voir les figures 36 à 41).

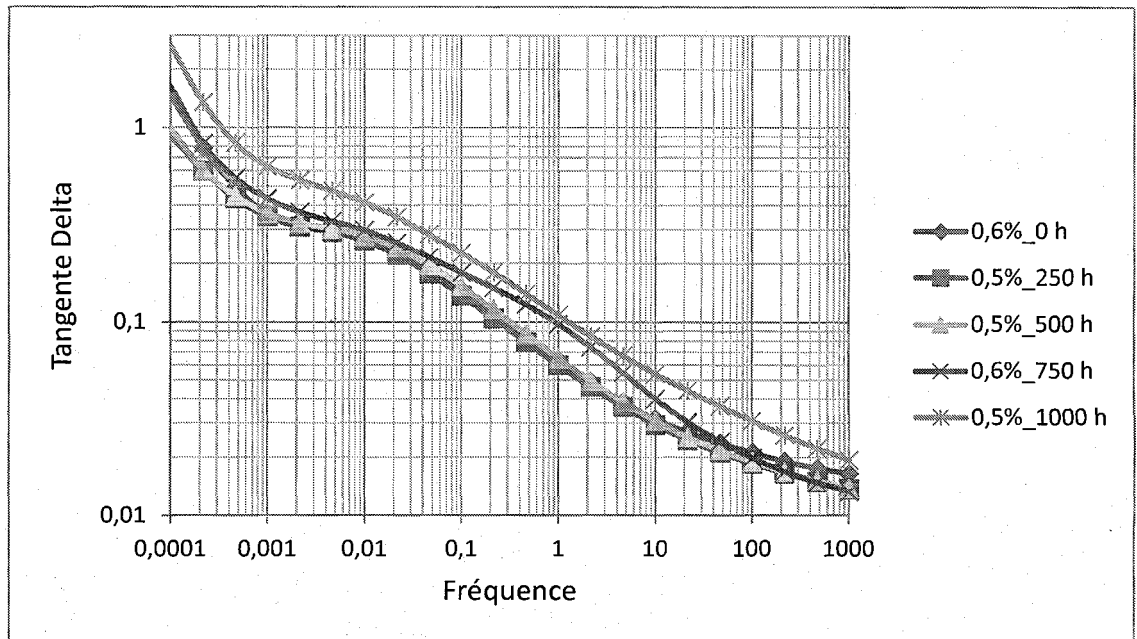


Figure 36: Évolution de la $\tan \delta$ en fonction du vieillissement pour une humidité de 0,5%.

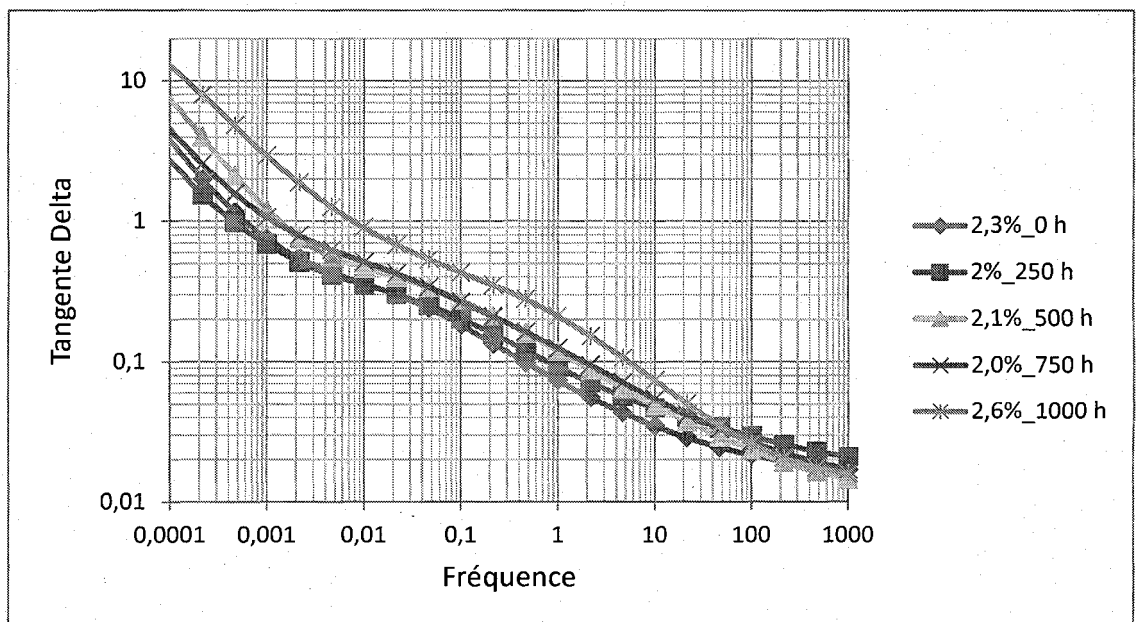


Figure 37: Évolution de la $\tan \delta$ en fonction du vieillissement pour une humidité de 2,0%.

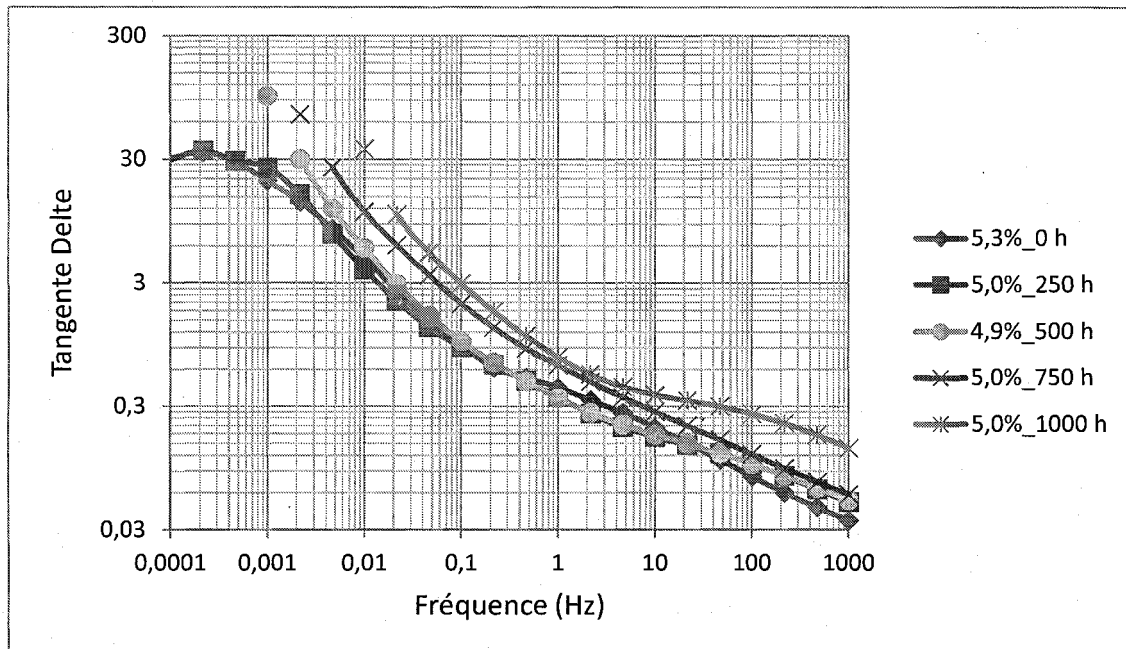


Figure 38: Évolution de la $\tan\delta$ en fonction du vieillissement pour une humidité de 5,0%.

Le facteur de dissipation des papiers est également sensible à l'influence du vieillissement qui modifie la valeur de la conductivité (σ) des diélectriques. Le vieillissement entraîne la dégradation du papier (confirmé par la mesure du DP). Or la dégradation d'un isolant entraîne l'augmentation du nombre de dipôles donc du courant de polarisation et cela se traduit par l'augmentation des pertes diélectriques. Cela démontre l'existence d'une corrélation entre le facteur de dissipation et le vieillissement.

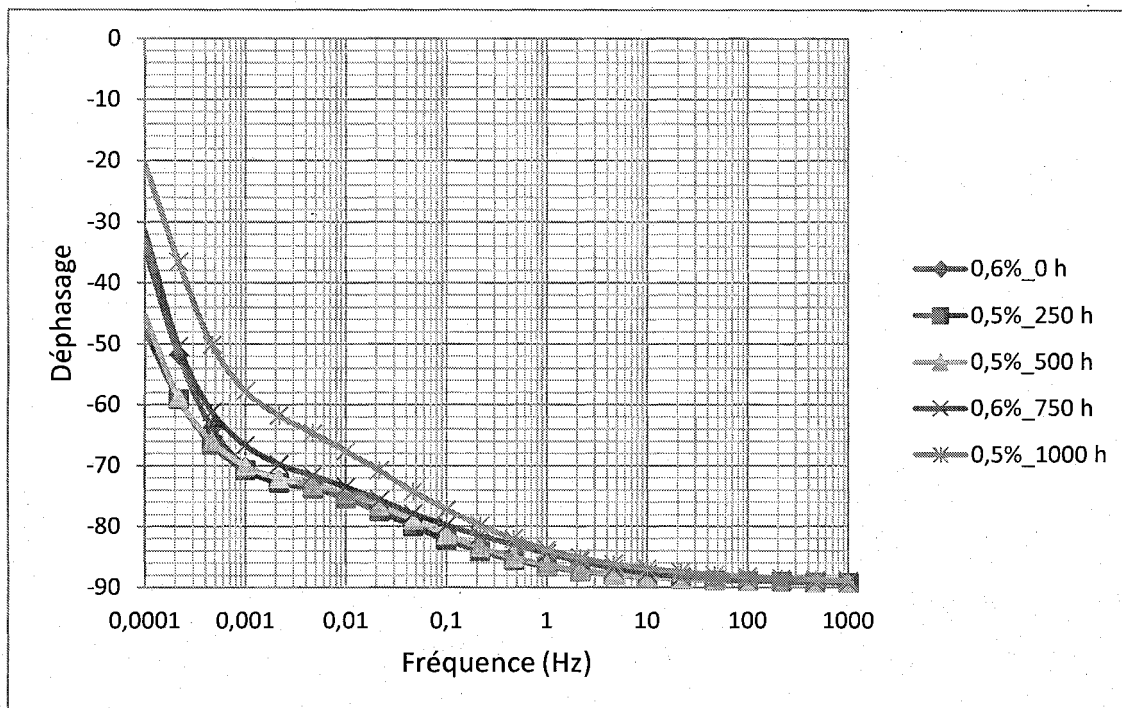


Figure 39: Évolution du déphasage en fonction du vieillissement pour une humidité de 0,5%.

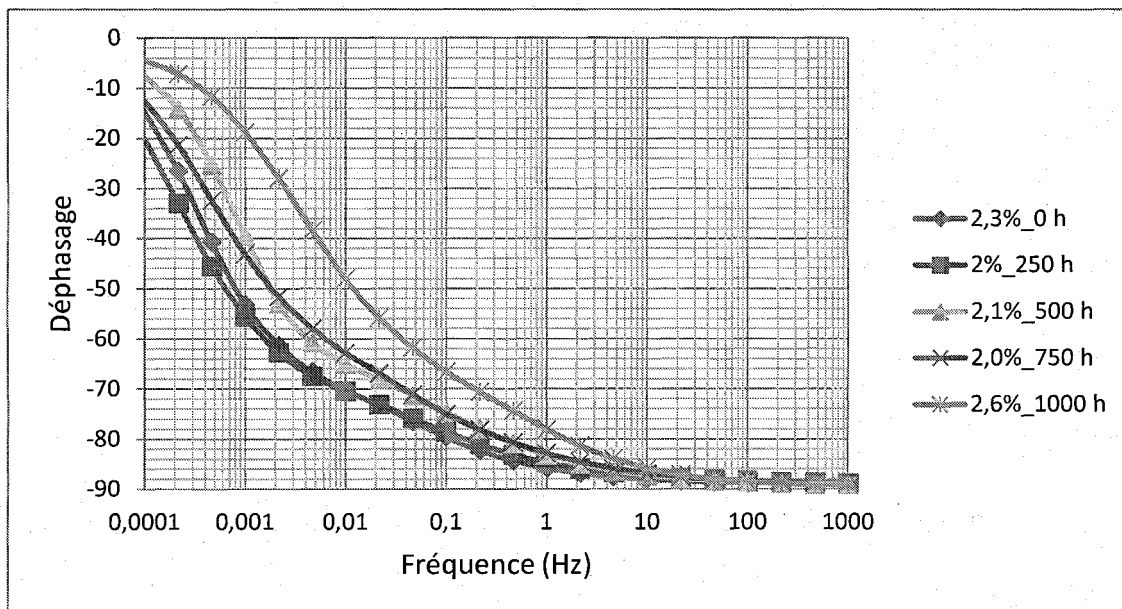


Figure 40: Évolution du déphasage en fonction du vieillissement pour une humidité de 2,0%.

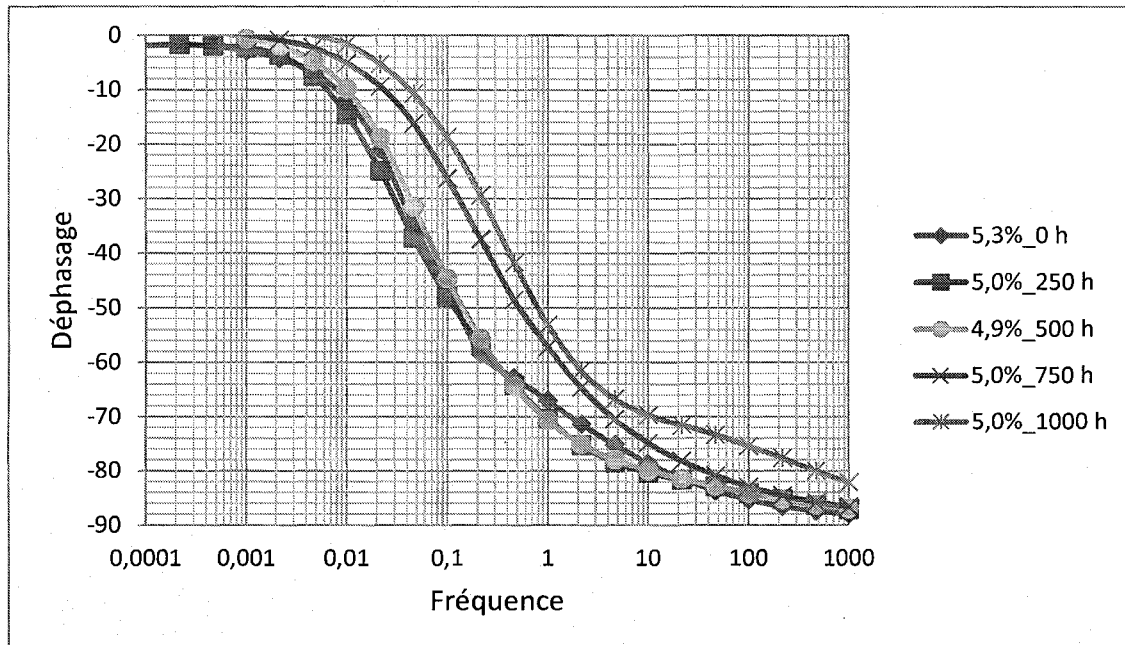


Figure 41: Évolution du déphasage en fonction du vieillissement pour une humidité de 5,0%.

Le déphasage est également influencé par le vieillissement. On constate, à l'analyse des courbes du déphasage en fonction de la fréquence, que pour des papiers neufs, l'impédance des diélectriques est globalement capacitive, alors que pour des papiers vieillis, l'effet capacitif diminue pour tendre vers un effet plus résistif.

Cette analyse de l'effet du vieillissement sur les paramètres diélectriques des papiers permet également de constater que l'impact de l'humidité sur les paramètres de la spectroscopie diélectrique fréquentielle (FDS) est plus significatif et plus dominant que celui du vieillissement. Ce qui confirme les résultats soulignés par Linhell et al [31].

4.4 Effet de la température

Dans les diélectriques (mauvais conducteurs d'électricité), les bandes de conduction et de valence sont séparées par une énergie supérieure à 5 eV. Seul un très petit nombre d'électrons reçoivent, à température ordinaire, l'énergie thermique nécessaire pour effectuer une transition dans la bande de conduction. Quand la température s'élève, la probabilité de transition augmente, et l'on observe pour la conductivité σ une dépendance du type [20] :

$$\sigma = \sigma_o \exp (-W/k_B T) \quad (57)$$

où

W représente l'énergie d'activation du processus de conduction.

k_B est la constante des gaz parfait égale à 8,314J/kmol

T est la température en degré Kelvin.

Cette augmentation se traduit par une augmentation des pertes dans le diélectrique.

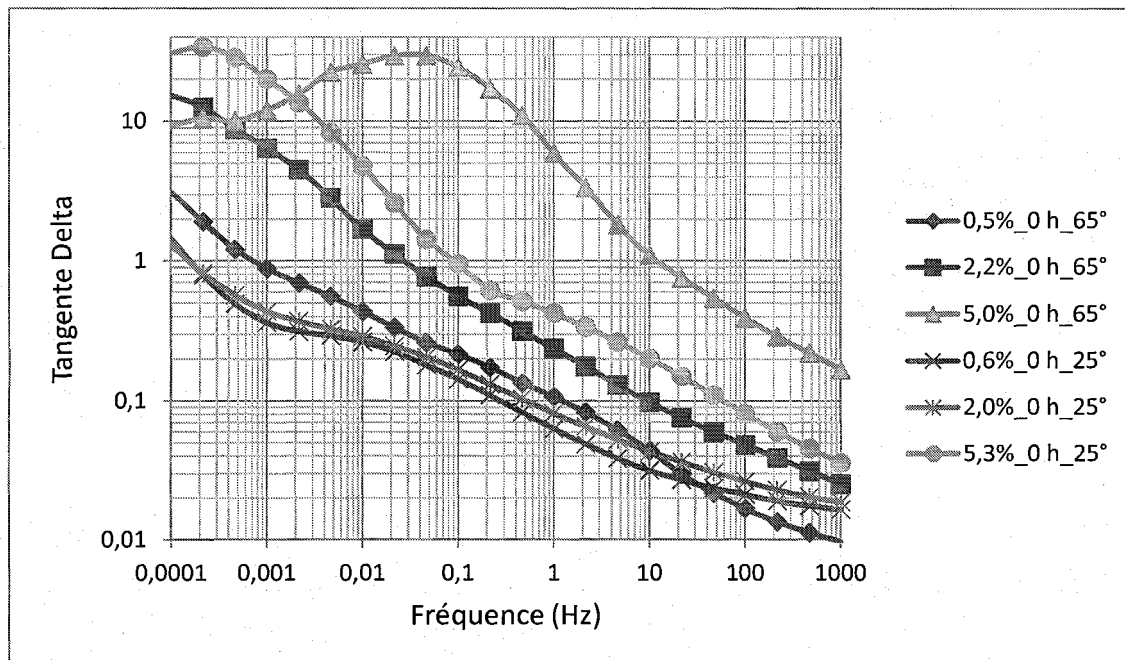


Figure 42: Évolution de la $\tan \delta$ en fonction de la température et de l'humidité.

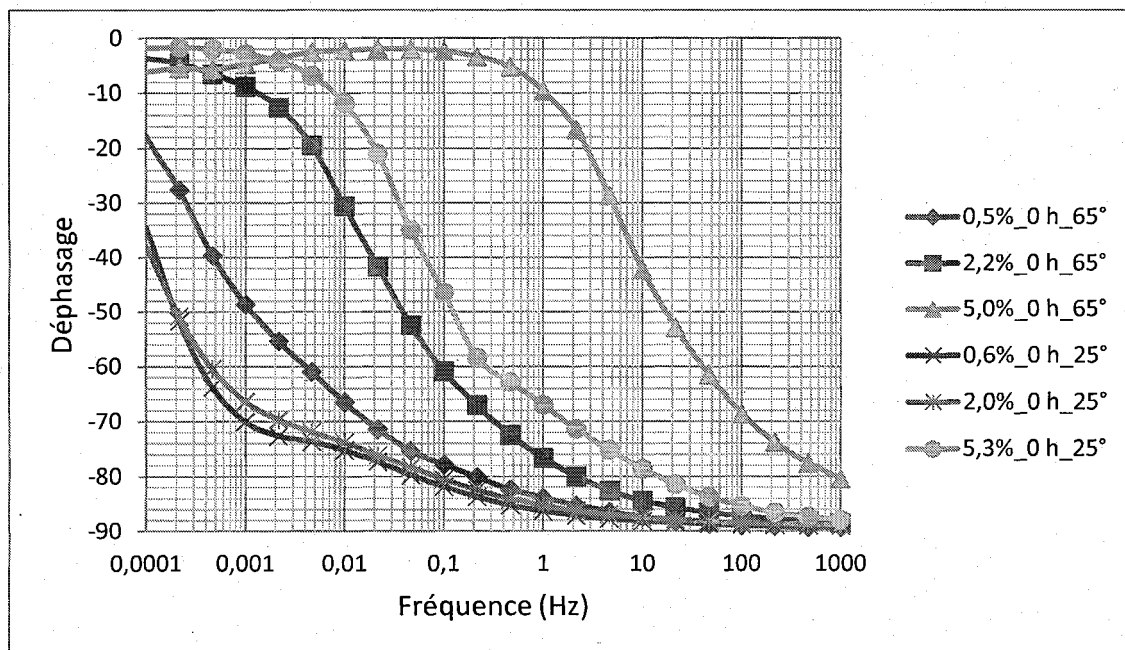


Figure 43: Évolution du déphasage en fonction de la température et de l'humidité.

L'analyse des résultats de l'évolution du facteur de dissipation ($\tan\delta$) et du déphasage en fonction de la fréquence, représentée sur les figures 42 et 43, a permis de constater que la température a une influence sur les paramètres électriques du système d'isolation papier/huile des transformateurs. En effet, en analysant l'équation (57), on déduit que toute variation de la température entraîne une variation de la conductivité. Ainsi une augmentation de la température entrainera une augmentation de la conductivité, soit une diminution de la résistance entraînant finalement une augmentation des pertes. L'analyse des courbes permet également de constater que l'effet combinée d'une humidité élevée (au delà de 2%) et d'une haute température entraîne une forte augmentation des pertes diélectriques, tandis que pour les hautes fréquences, l'impédance devient globalement résistive.

Ces différentes analyses permettent la mise en évidence de l'existence d'une corrélation entre le facteur de dissipation et les paramètres tels que l'humidité et le vieillissement et la température. Cependant, la séparation de l'effet de l'humidité et du vieillissement, à partir des mesures effectuées par la spectroscopie diélectrique, devient très difficile, voire impossible, dans la mesure où l'humidité et le vieillissement agissent de la même manière, en affectant la conductivité.

Nous allons pousser nos investigations, en commençant par l'analyse du comportement du facteur de dissipation aux différentes fréquences.

4.5 Analyse du facteur de dissipation en fonction de la fréquence

Nous allons analyser le comportement du facteur de dissipation ($\tan\delta$) en fonction du vieillissement et de l'humidité pour différentes valeurs particulières de la fréquence d'essai délivrée par le IDA 200.

Pour cette analyse, nous avons relevé les valeurs du facteur de dissipation aux fréquences suivantes: 60 Hz, 1 Hz, 0,01 Hz, et 0,1 mHz, et cela pour diverses valeurs de l'humidité (Hu). Nous allons d'abord présenter les résultats obtenus pour les fréquences de 60 Hz, 1 Hz et 0,01 Hz. Les résultats sont résumés dans les tableaux 5 à 7.

60 Hz				
	0,50%	2,00%	3,60%	5,00%
00 h	0,01857	0,021022	0,025194	0,08102
250 h	0,01857	0,029395	0,07187	0,16388
500 h	0,018977	0,023521	0,0284404	0,13392
750 h	0,019852	0,018753	0,018753	0,12274
1000 h	0,030774	0,02548	0,054345	0,25932

Tableau 5: Facteur de dissipation en fonction du vieillissement et de l'humidité à 60 Hz.

1Hz				
	0,50%	2,00%	3,60%	5,00%
00 h	0,063077	0,068454	0,24863	0,4243
250 h	0,059901	0,091763	0,07187	0,49718
500 h	0,065151	0,11986	0,13761	0,68068
750 h	0,097702	0,1252	0,16188	0,64613
1000 h	0,1085	0,21164	0,30876	0,75155

Tableau 6: Facteur de dissipation en fonction du vieillissement et de l'humidité à 1 Hz.

0,01 Hz			
	0,50%	2,00%	3,60%
00 H	0,36195	0,57662	0,92456
250H	0,34934	0,6869	1,0553
500H	0,36325	1,2135	4,368
750H	0,43142	1,0659	2,942
1000H	0,63088	1,6179	4,4709

Tableau 7: Facteur de dissipation en fonction du vieillissement et de l'humidité à 0,01 Hz.

Les figures 44 à 46 représentent la Tangente Delta en fonction de l'humidité respectivement pour les fréquences 60 Hz, 1 Hz, 0.01 Hz.

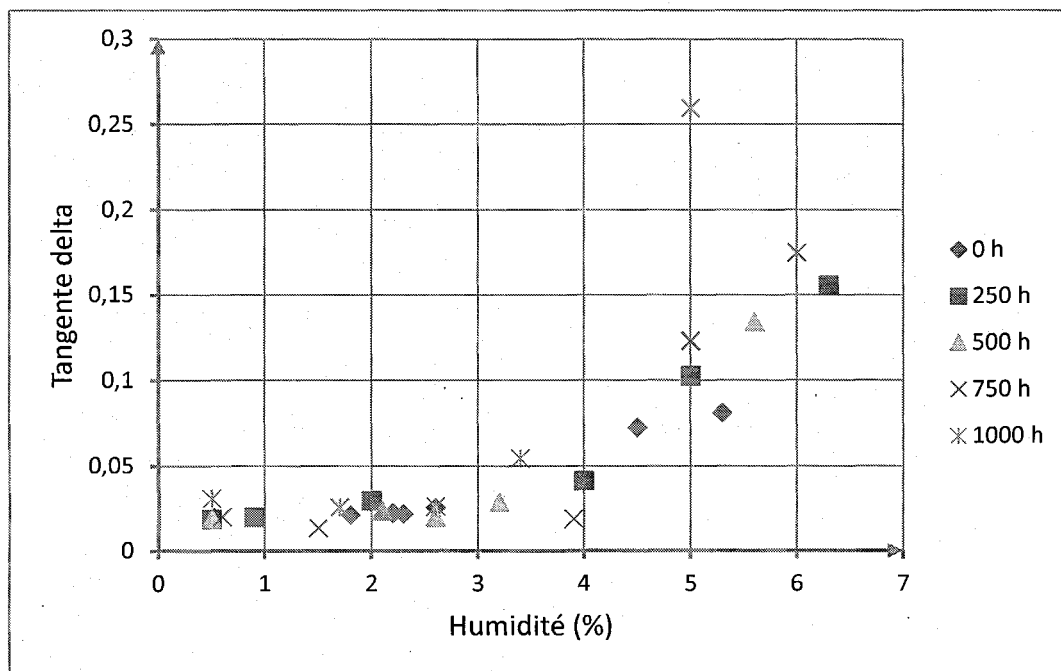


Figure 44: Tangente Delta en fonction de l'humidité à 60 Hz.

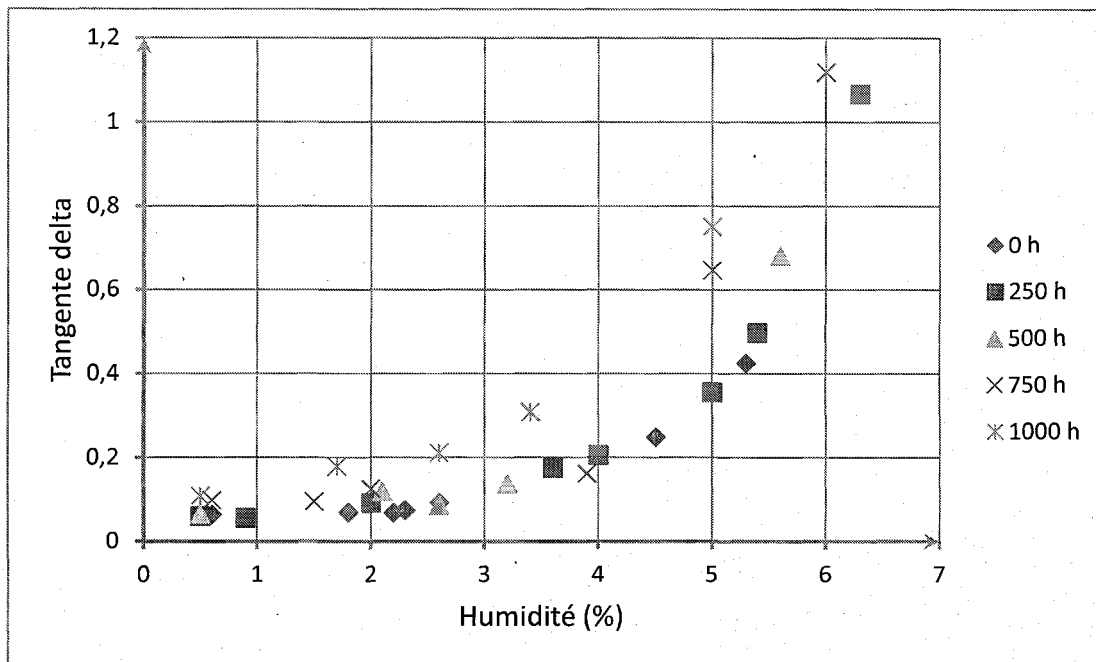


Figure 45: Tangente Delta en fonction de l'humidité à 1 Hz.

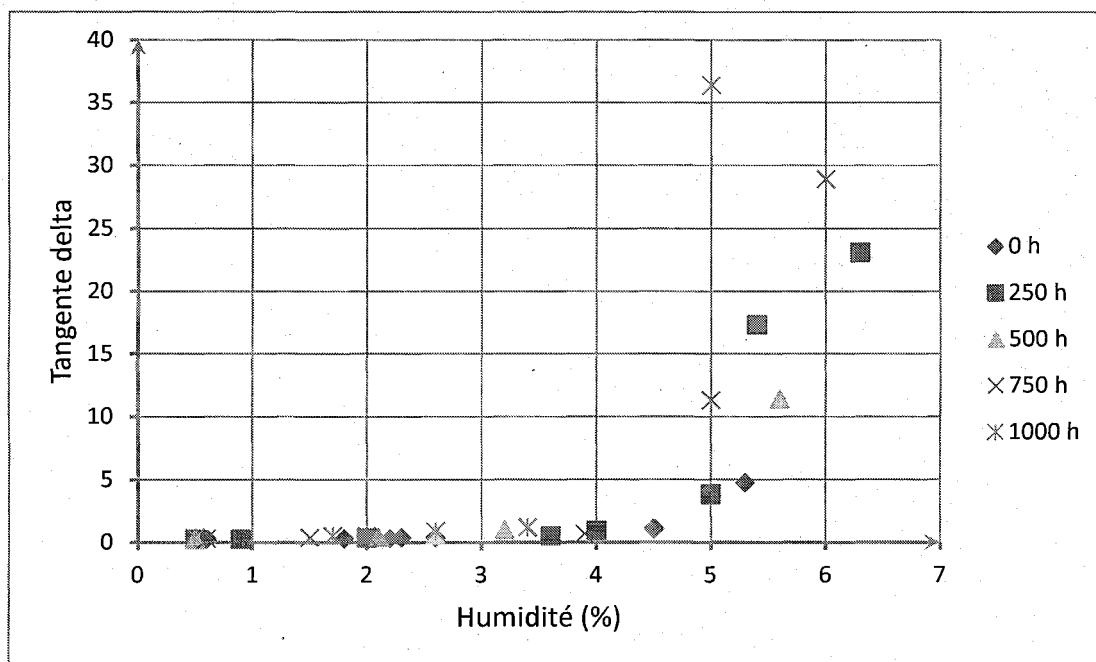


Figure 46: Tangente Delta en fonction de l'humidité à 0,01 Hz.

L'analyse de l'évolution du facteur de dissipation pour les fréquences de 60 Hz, 1 Hz, 0,01 Hz, ne permet pas d'obtenir des informations pouvant nous guider vers une séparation de l'effet du vieillissement et de l'humidité. En effet on remarque que pour les humidités inférieures à 3%, on ne constate pas une variation significative de la $\tan\delta$, surtout pour des durées de vieillissement n'excédant pas 500 heures. Mais pour des humidités supérieures à 3%, on constate une augmentation du facteur de dissipation simultanément en fonction de l'humidité et du vieillissement. On peut donc conclure que cette plage de fréquence n'est pas propice à l'analyse devant aboutir à la séparation de l'effet du vieillissement et de l'humidité.

Nous allons maintenant analyser les valeurs du facteur de dissipation en fonction de l'humidité et du vieillissement aux basses fréquences, principalement pour la fréquence de 0,1 mHz. Le tableau 8 résume les résultats de cette analyse.

0 h		250 h		500 h		750 h		1000 h	
Hu (%)	$\tan\delta$	Hu (%)	$\tan\delta$	Hu (%)	$\tan\delta$	Hu (%)	$\tan\delta$	Hu (%)	$\tan\delta$
0,6	1,4575	0,5	0,90801	0,5	0,9962	0,6	1,6407	0,5	2,6833
1,8	2,0025	0,9	2,0033	2,1	7,5081	1,5	3,0874	1,7	7,9889
2,2	2,5928	2	2,7442	2,6	9,3225	2	4,55	2,6	12,81
2,3	3,8191	3,6	11,855	3,2	19,407	3,9	29,081	3,4	35,106
2,6	9,7518	4	17,73						
4,5	18,814								

Tableau 8: Facteur de dissipation en fonction du vieillissement et de l'humidité à 0,1 mHz.

Les figures 47 à 51 représentent l'évolution des valeurs des facteurs de dissipation à la fréquence de 0,1 mHz en fonction de la fréquence tracées individuellement pour chaque niveau de vieillissement.

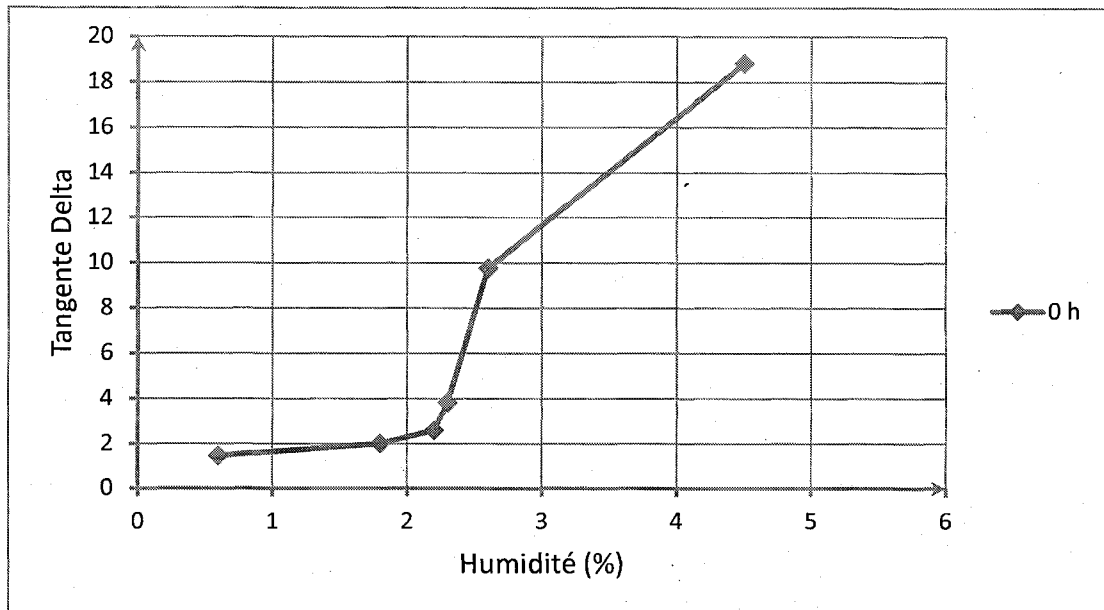


Figure 47: Tangente delta à 0,1 mHz en fonction du vieillissement et de l'humidité pour 0 h.

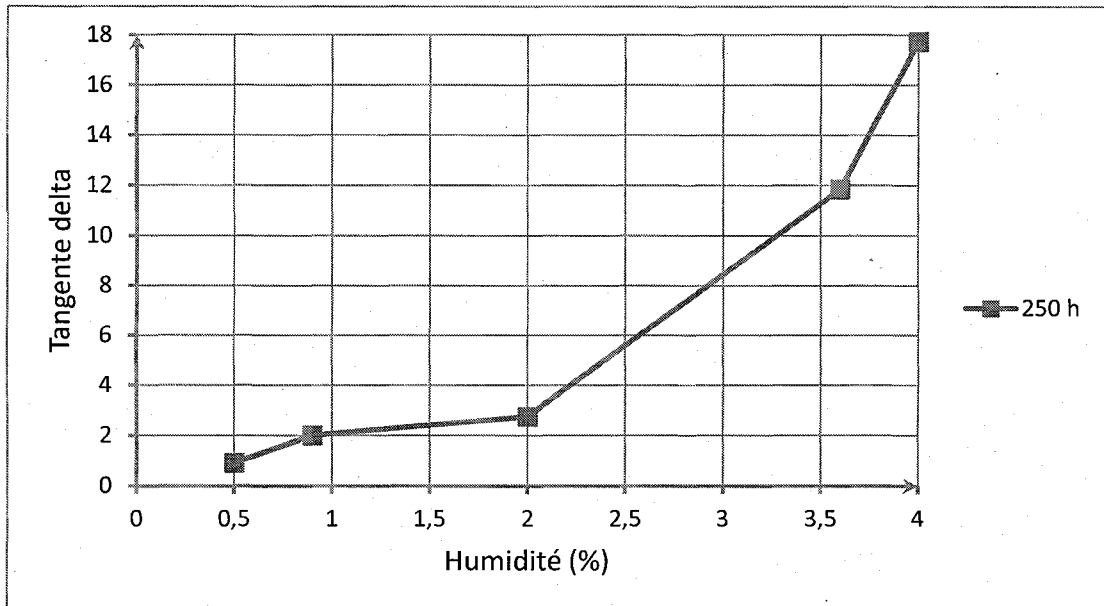


Figure 48: Tangente delta à 0,1 mHz en fonction du vieillissement et de l'humidité pour 250 h.

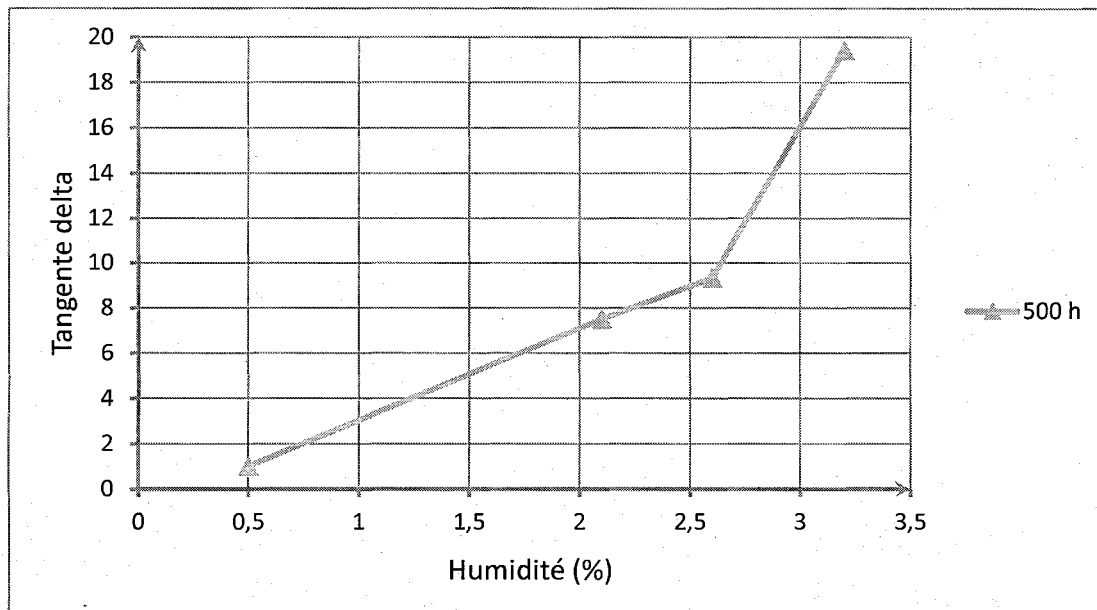


Figure 49: Tangente delta à 0,1 mHz en fonction du vieillissement et de l'humidité pour 500 h.

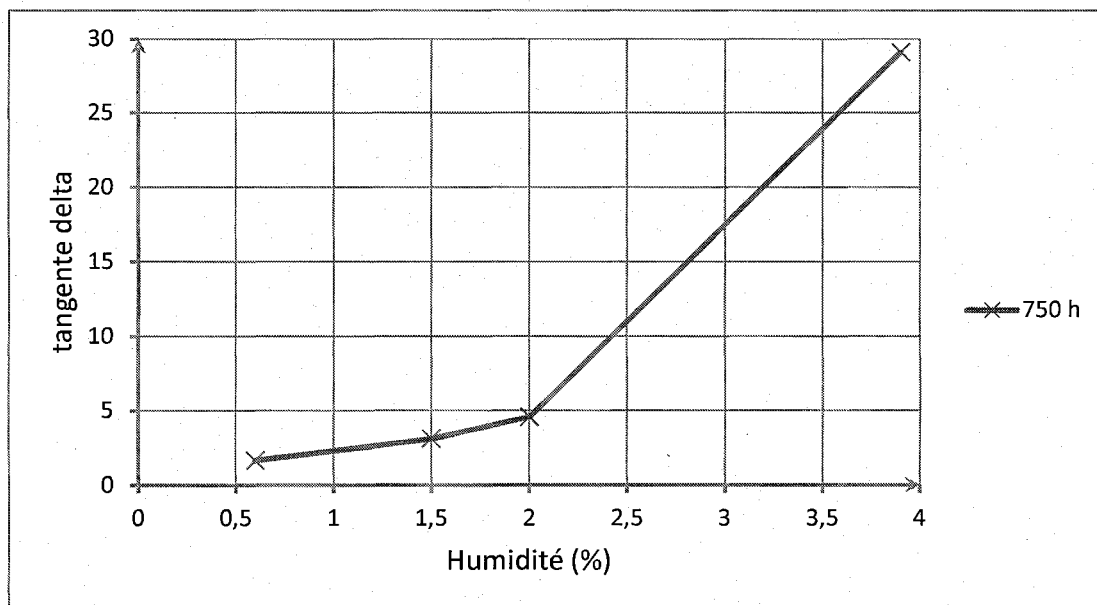


Figure 50: Tangente delta à 0,1 mHz en fonction du vieillissement et de l'humidité pour 750 h.

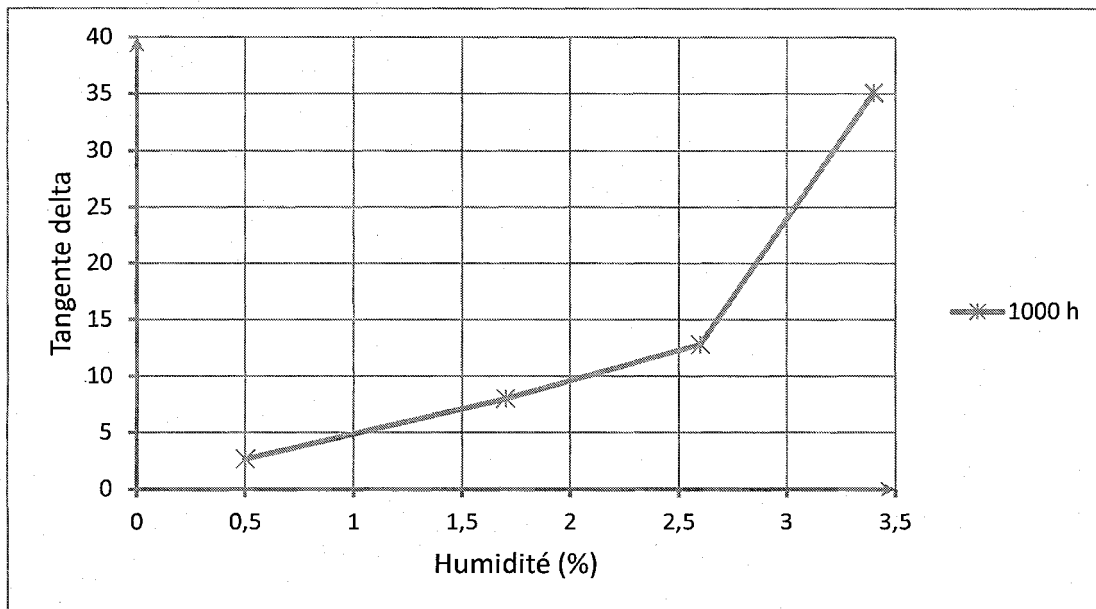


Figure 51: Tangente delta à 0,1 mHz en fonction du vieillissement et de l'humidité pour 1000 h.

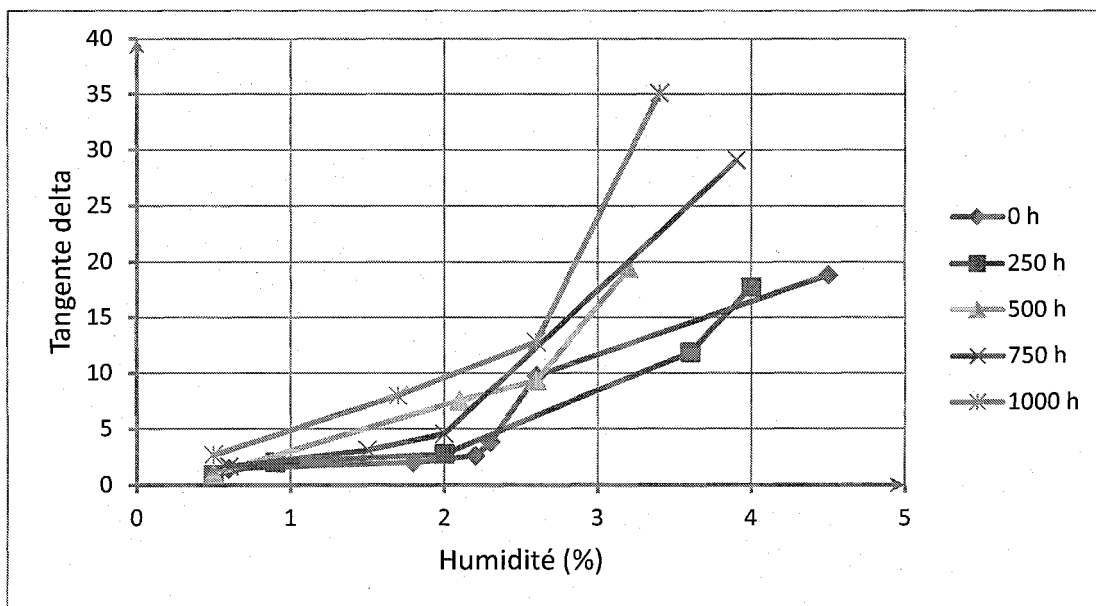


Figure 52: Tangente delta à 0,1 mHz en fonction du vieillissement et de l'humidité.

L'analyse des résultats représentant le comportement du facteur de dissipation, en fonction de l'humidité et du vieillissement à la fréquence de 0,1 MHz a permis de mettre en évidence certains aspects :

- concernant les papiers neufs et légèrement vieillis (0 heure et 250 heures), pour les humidités de 0,5% et 2,5%, on ne note pas une variation significative du facteur de dissipation ($\tan\delta$), comme illustrés par le tableau 8 et les figures (47 à 52).

- Par contre pour les mêmes valeurs d'humidité, mais pour des papiers vieillis à 500 heures, 750 heures et 1000 heures, on constate une augmentation du facteur de dissipation ($\tan\delta$) (tableau 8 et figures 47 à 52).

En tenant compte des analyses effectuées précédemment, nous pouvons ainsi supposer que cette augmentation du facteur de dissipation ($\tan\delta$) ne peut-être due qu'à l'influence de l'effet du vieillissement: il y a donc une possibilité de la séparation de l'effet du vieillissement et de l'humidité.

On constate également que pour des valeurs d'humidité comprises entre 2,5% et 5%, il y a une augmentation du facteur de dissipation pour tous les niveaux de vieillissement y compris le papier neuf (0 heure). Il faut néanmoins noter que la pente des courbes concernant les papiers vieillis de 500 à 1000 heures est plus importante que pour les papiers neufs (0 heure) et les papiers vieillis à 250 heures, c'est-à-dire que le papier se

dégrade plus rapidement. Dans ce cas de figure, une comparaison des différentes pentes pourra se révéler être une piste pour le diagnostique.

4.6 Effet de l'humidité et du vieillissement sur le rapport entre facteur de puissance et le facteur de dissipation

Nous allons dans cette partie poursuivre nos investigations, en prenant en compte les travaux déjà effectués par d'autres chercheurs. Ainsi en prenant en compte les conclusions des travaux effectués par Omar et al [30] qui ont constaté que les deux courbes étaient parfaitement confondues aux hautes fréquences (50 – 1000 Hz) et fréquences intermédiaires (1-50 Hz), mais se séparaient pour les basses fréquences (inférieures à 1 Hz). La séparation de ces deux courbes n'apparaissant pas pour du papier neuf ainsi que pour une variation d'humidité, ils ont conclu qu'aux basses fréquences, le vieillissement et l'humidité peuvent être séparés [30].

Nous nous proposons donc de poursuivre nos investigations en empruntant cette voie, en représentant sur une même figure les courbes de la variation du facteur de dissipation et du facteur de puissance en fonction de la fréquence et cela, pour différents degrés d'humidité et différents niveaux de vieillissement.

Les figures 53 et 54 représentent la variation du facteur de dissipation et du facteur de puissance en fonction de la fréquence pour différentes humidités. Les courbes ont été obtenues pour les valeurs d'humidité de 0,6% et 5,4% pour le cas du papier neuf (figure 53) et de 0,5% et 3,4% concernant le papier vieilli à 1000 heures (figure 54).

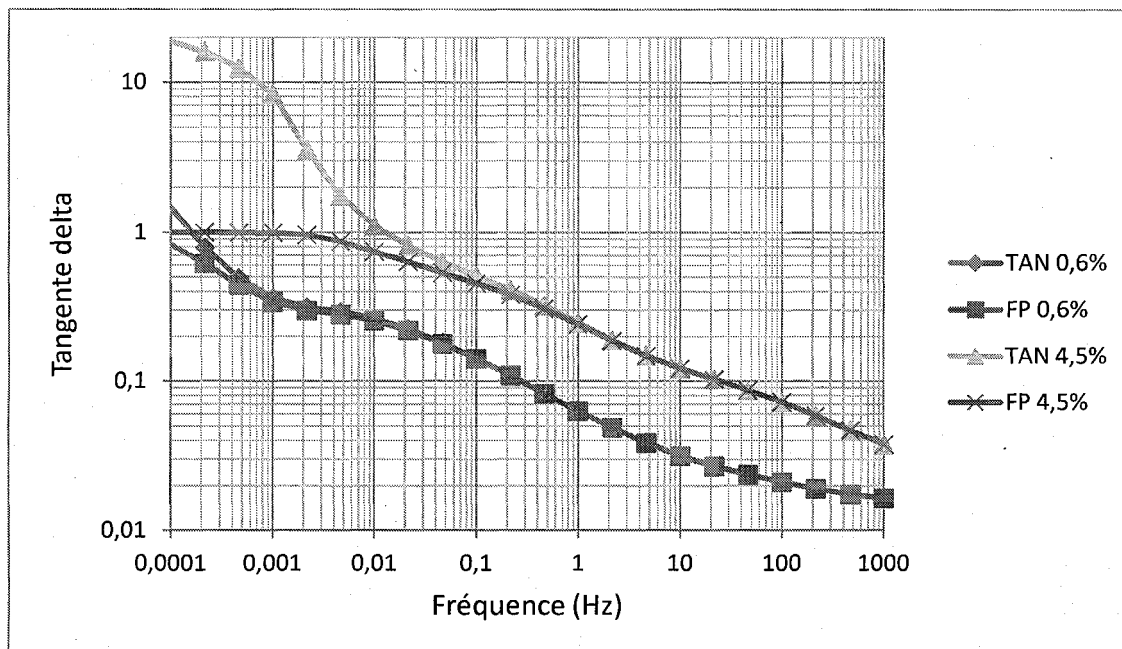


Figure 53: Tangente delta et facteur de puissance en fonction du vieillissement et de l'humidité pour un papier neuf.

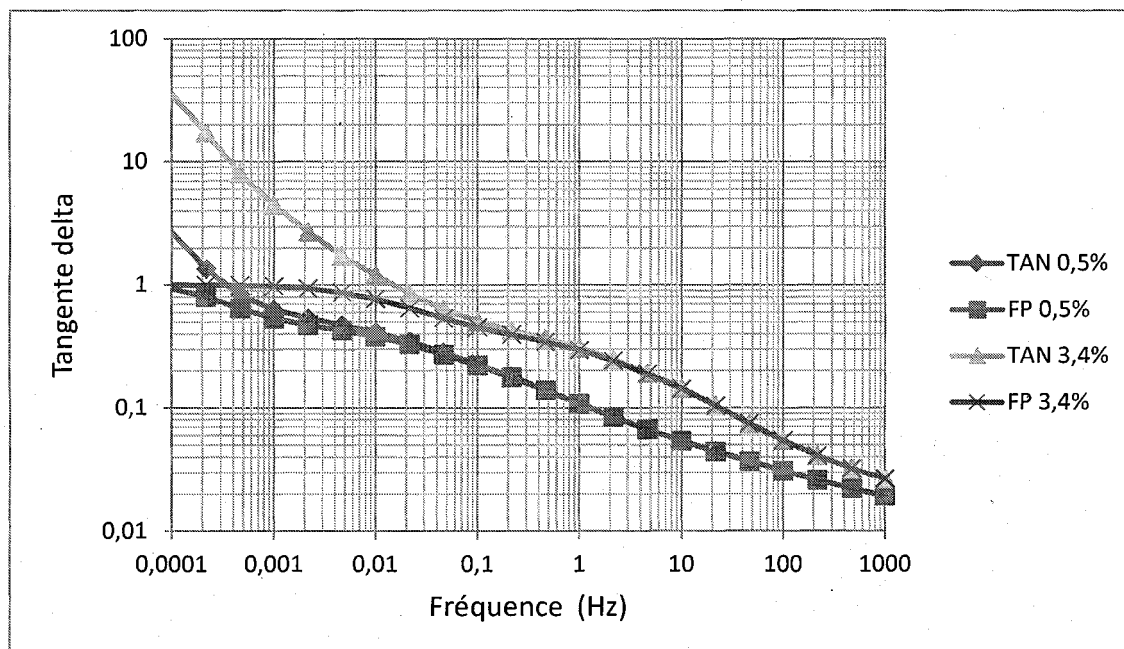


Figure 54: Tangente delta et facteur de puissance en fonction du vieillissement et de l'humidité pour un papier vieilli à 1000 heures.

Nous avons constaté une séparation des deux courbes quelque soit la durée du vieillissement, mais également pour les différents degrés d'humidité. D'autre part, nous avons constaté que l'aire comprise entre ces deux courbes augmentait en fonction du niveau de vieillissement et du degré d'humidité.

Dans ce contexte, et afin de pousser nos investigations, nous avons calculé le rapport (Facteur de puissance / Facteur de dissipation), en fonction de la fréquence pour différents degré de vieillissement et d'humidité afin d'explorer l'effet de ce rapport.

Les figures 55 à 58 représentent les résultats des courbes du rapport $FP / \tan \delta$ en fonction de l'humidité et du vieillissement.

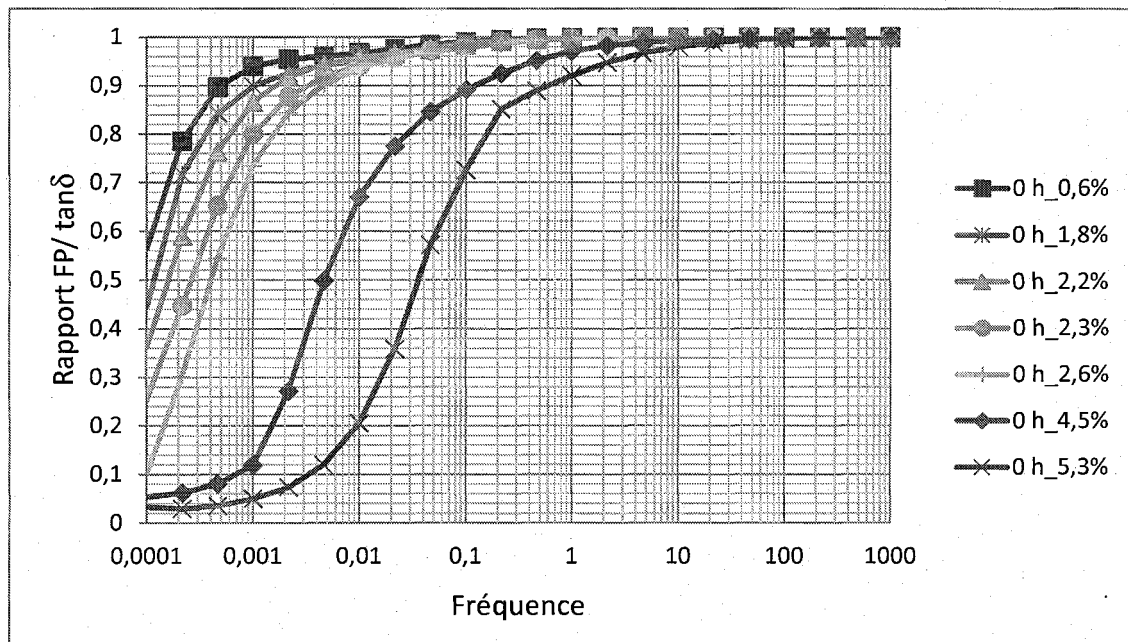


Figure 55: Rapport $FP / \tan \delta$ en fonction de l'humidité pour un papier neuf.

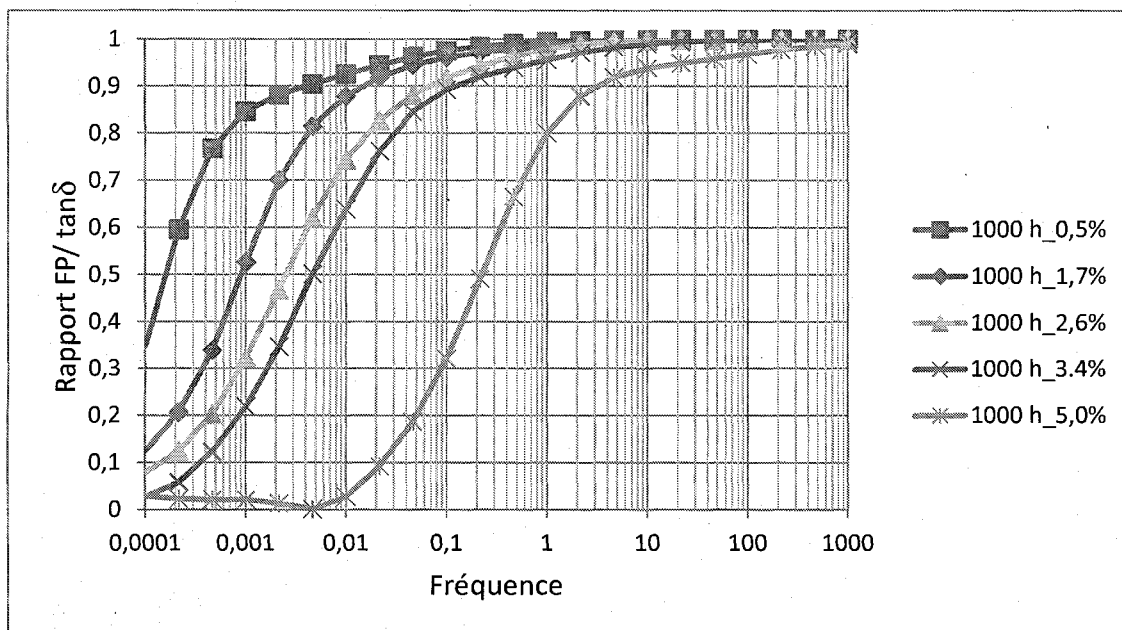


Figure 56: Rapport $FP/\tan\delta$ en fonction de l'humidité pour un papier de 1000 heures.

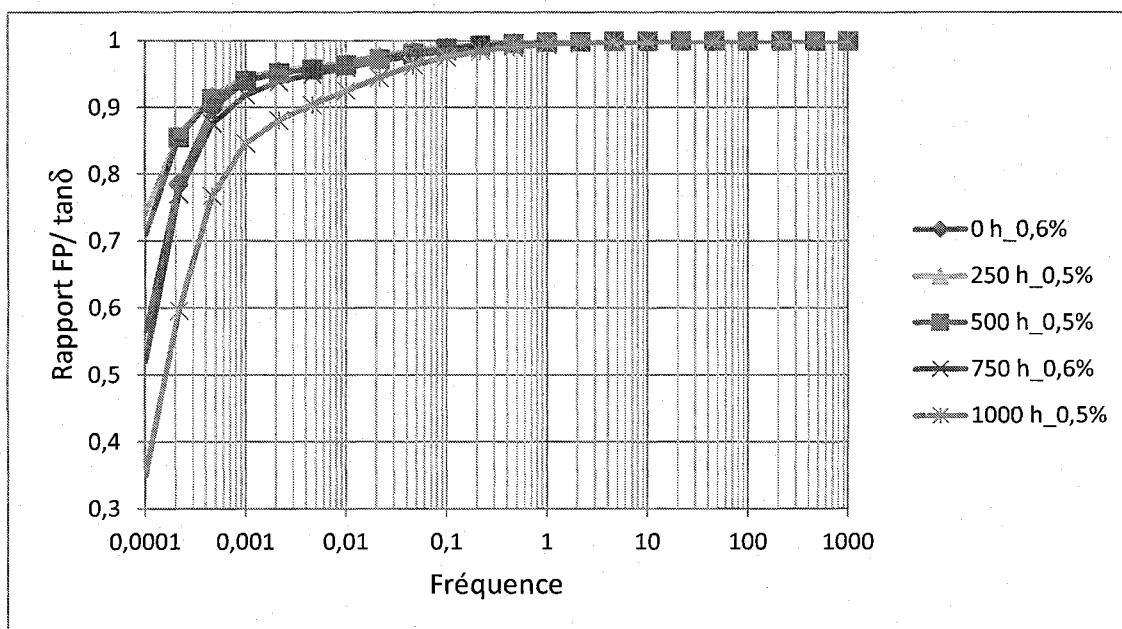


Figure 57: Rapport $FP/\tan\delta$ en fonction du vieillissement pour un papier sec.

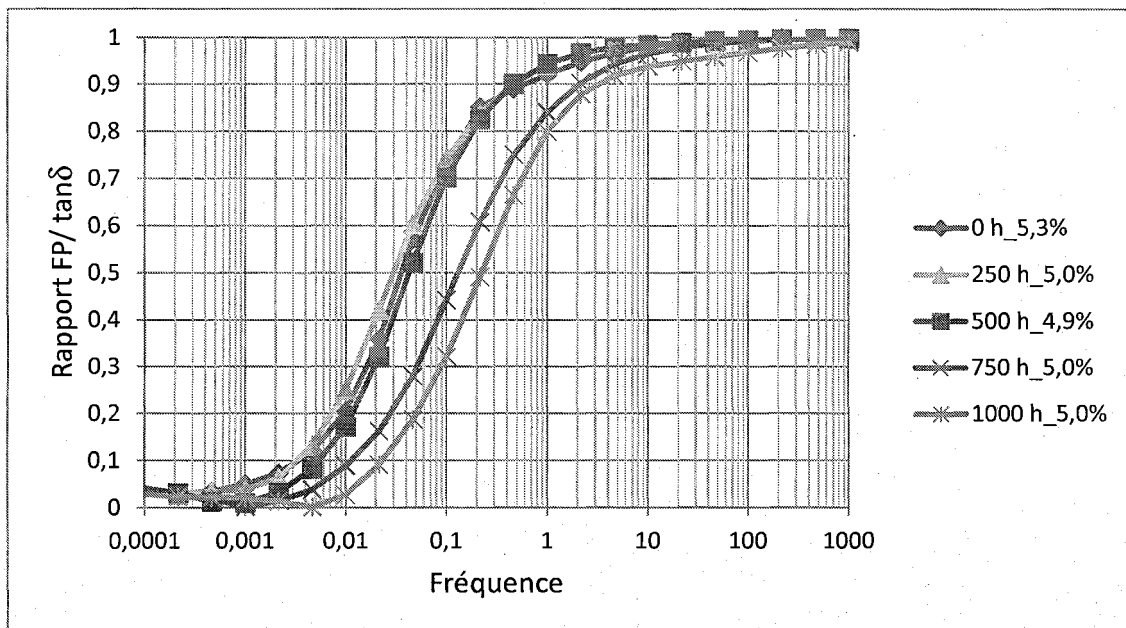


Figure 58: Rapport FP/ $\tan\delta$ en fonction du vieillissement pour un papier humide.

L'analyse des figures 55 à 58, montrent que les courbes obtenues à partir du rapport du facteur de puissance sur le facteur de dissipation, tout comme celles obtenues à partir de la variation du facteur de dissipation de la figure 30 à la figure 32 et de la figure 36 à la figure 38, sont également sensibles à l'effet simultané du vieillissement et de l'humidité. Dans cette analyse, nous constatons également que l'effet de l'humidité est prépondérant sur l'effet du vieillissement. Le papier paraît donc plus sensible à l'effet de l'humidité que du vieillissement.

4.7 Effet de l'humidité et du vieillissement sur l'aire comprise entre la tangente delta et facteur de puissance

Puisse que l'analyse des résultats représentant l'évolution du rapport du facteur de puissance sur le facteur de dissipation en fonction de la fréquence, n'a donnée aucune piste à suivre, nous avons redirigé nos investigations en analysant l'évolution de l'aire comprise entre les deux courbes par rapport au vieillissement et à l'humidité. À cet effet, nous avons évalué l'aire comprise entre la courbe du facteur de dissipation et la courbe du facteur de puissance et construire la courbe de l'aire en fonction du vieillissement et de l'humidité (figure 59).

$$\text{Aire} = \prod_{f=[10^{-4}\text{Hz}-10^3\text{Hz}]} (\text{Tan}\delta(f))^{\frac{1}{N}} \quad (58)$$

$$\text{Aire} = \prod_{f=[10^{-4}\text{Hz}-10^3\text{Hz}]} (\text{FP}(f))^{\frac{1}{N}} \quad (59)$$

$$\text{Aire comprise entre les courbes} = \frac{\prod_{f=[10^{-4}\text{Hz}-10^3\text{Hz}]} (\text{Tan}\delta(f))^{\frac{1}{N}}}{\prod_{f=[10^{-4}\text{Hz}-10^3\text{Hz}]} (\text{FP}(f))^{\frac{1}{N}}} \quad (60)$$

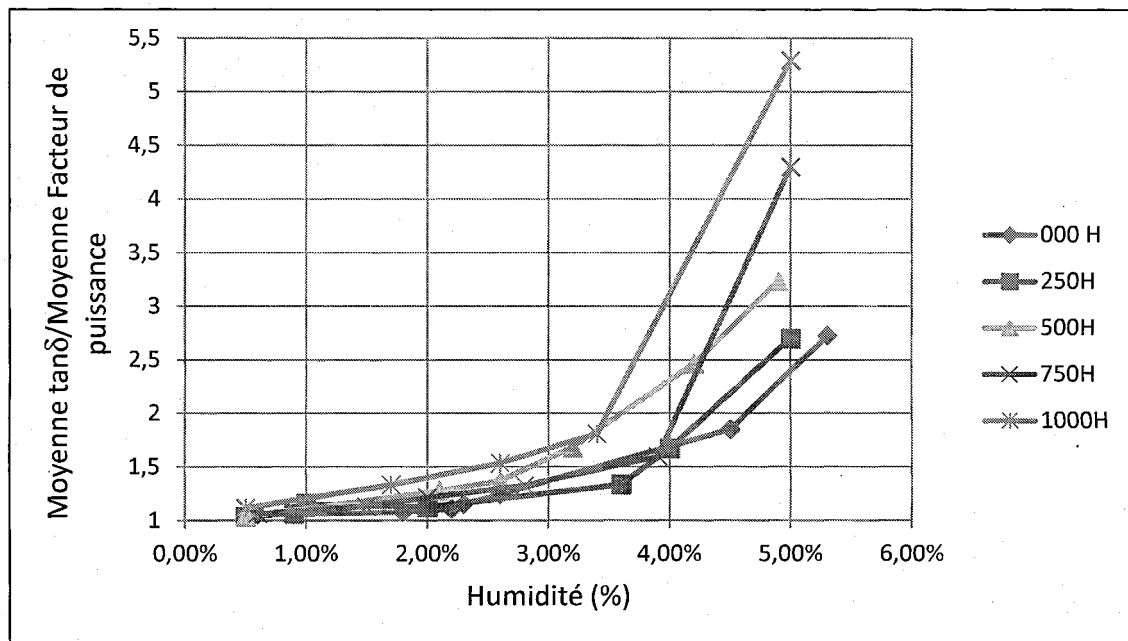


Figure 59: Aire entre $\tan\delta$ et FP en fonction de l'humidité et du vieillissement.

Tout comme la courbe obtenue à la figure 52, nous constatons que pour les degrés d'humidité au plus égales à 2% et pour des papiers neufs et vieillis à 250 heures, on ne constate pas de variation. Cependant, dans ce même intervalle d'humidité, nous constatons une augmentation de l'aire entre les deux courbes. Nous pouvons supposer que dans cet intervalle, l'augmentation de l'aire pourrait être dû à l'effet du vieillissement. Il est également à noter que lorsque l'humidité est supérieure à 2%, les courbes deviennent sensibles à l'effet du vieillissement et de l'humidité.

4.8 Effet de l'humidité et du vieillissement sur le rapport entre facteur de dissipation et le facteur de puissance

4.8.1 Analyse des valeurs du rapport du facteur de dissipation ($\tan\delta$) et du facteur de puissance en fonction de la fréquence à 0,1 mHz.

Il a été démontré que le rapport entre le facteur de dissipation ($\tan\delta$) et le facteur de puissance (PF) augmente vers les basses fréquences. Cette augmentation est plus significative si l'isolation est dégradée par le vieillissement ou l'humidité. Le tableau 9 et la figure 60 résument le comportement du rapport de ces deux facteurs ($\tan\delta$ /PF) en fonction du vieillissement et de l'humidité à la fréquence de 0,1 mHz.

0 heure		250 heures		500 heures		750 heures		1000 heures	
Hu (%)	$\tan\delta$	Hu (%)	$\tan\delta$	Hu (%)	$\tan\delta$	Hu (%)	$\tan\delta$	Hu (%)	$\tan\delta$
0,60%	1,768	0,50%	1,351	0,50%	1,412	0,60%	1,921	0,50%	2,864
1,80%	2,238	0,90%	2,239	2,10%	7,574	1,50%	3,245	1,70%	8,051
2,20%	2,779	2,00%	2,921	2,60%	9,376	2,00%	4,659	2,60%	12,849
2,30%	3,948	3,60%	11,897	3,20%	19,433	2,80%	13,225	3,40%	35,120
2,60%	9,803	4,00%	17,758			3,90%			
4,50%	18,840								

Tableau 9: Valeurs du rapport du facteur de dissipation ($\tan\delta$) et du facteur de puissance en fonction de l'humidité et du vieillissement.

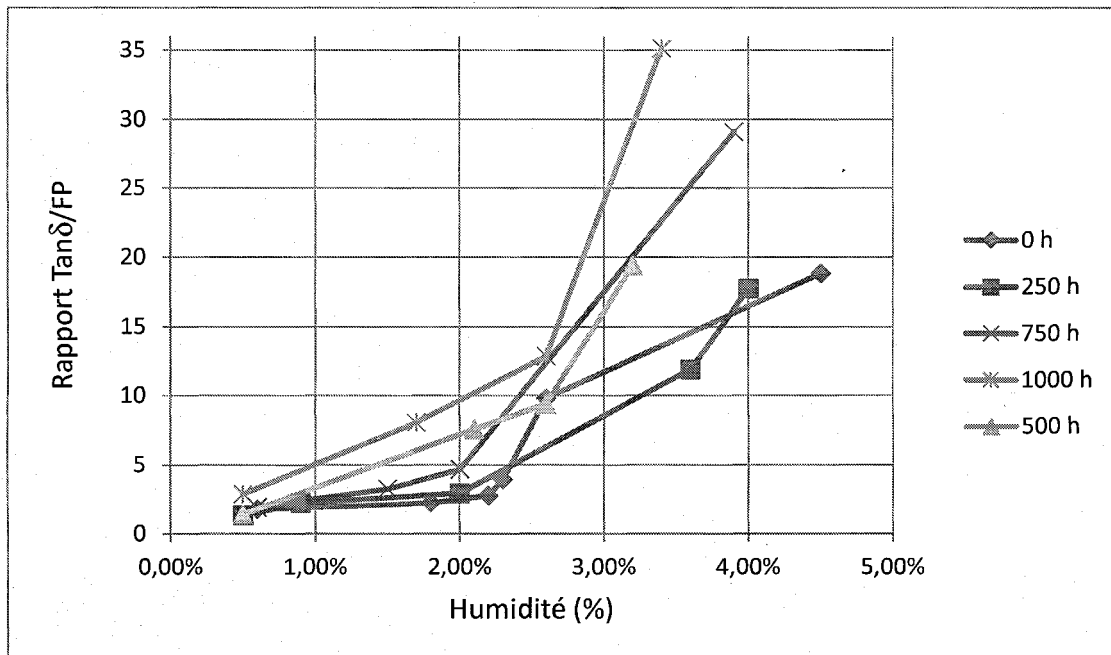


Figure 60: Courbes du rapport du facteur de dissipation ($\tan\delta$) et du facteur de puissance en fonction de l'humidité et du vieillissement.

D'après les résultats obtenus, on remarque clairement l'existence d'une forte corrélation entre le rapport $\tan\delta$ /PF et les deux paramètres de dégradation de l'isolation à savoir l'humidité et le vieillissement à l'exception de quelques points de tests (comme le montre la figures 60) dû probablement à la difficulté du contrôle parfait de l'humidité au laboratoire.

4.9 Conclusion

L'objectif visé par cette étude était de séparer l'influence du vieillissement du papier de l'influence de l'humidité à partir des mesures diélectriques. Une telle possibilité permettrait de prédire la durée de vie restante de l'isolation papier des transformateurs.

A la suite de l'analyse et de l'interprétation des résultats, nous avons constaté qu'il existe bien une corrélation entre le degré de polymérisation (qui permet d'évaluer l'état du papier en indiquant son degré de vieillissement) et les mesures diélectriques effectuées dans le domaine fréquentiel.

De prime abord, les mesures diélectriques (facteur de dissipation, le déphasage, ..) sont influencées par le vieillissement et l'humidité. Cependant, en poussant un peu plus nos investigations, en analysant l'évolution du facteur de dissipation ($\tan\delta$) dans l'intervalle de fréquence de 1 à 0,1 mHz, nous avons constaté que pour les taux d'humidité inférieurs à 2%, il est serait possible de séparer l'effet de l'humidité de celui du vieillissement. Cela permettrait de connaître l'état de l'isolation solide (papier et carton) des transformateurs, et de facto, de prédire leur durée de vie restante.

Pour les degrés d'humidité supérieurs à 3%, il est pratiquement impossible de séparer les effets du vieillissement et de l'humidité dans la mesure où les résultats des mesures diélectriques sont simultanément influencés par ces deux paramètres.

CHAPITRE 5

PRÉDICTION PAR RÉSEAUX DE NEURONES

5.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons établi, en analysant les valeurs du facteur de dissipation ($\tan\delta$) aux basses fréquences (1 mHz et 0,1 mHz), que l'effet du vieillissement et de l'humidité pouvait être séparé lorsque le degré de l'humidité était inférieur à une valeur de 2,5%. L'analyse des courbes représentant variation de l'aire comprise entre la tangente delta et facteur de puissance en fonction du vieillissement et de l'humidité ainsi que celle des valeurs du rapport du facteur de dissipation ($\tan\delta$) et du facteur de puissance à la fréquence 1 mHz, ont permis d'aboutir à la même conclusion.

Vu la difficulté d'établir une relation analytique entre les différents paramètres de la spectroscopie diélectrique fréquentielle (FDS) mesurée et entre l'humidité et le vieillissement, l'utilisation des réseaux de neurones artificiels semble être un bon outil pour établir cette relation. L'utilisation des réseaux de neurones consiste à aider à la prédiction de l'état de l'isolation. Pour ce faire, les mesures FDS réalisées dans cette étude

vont être utilisées comme base de données dans le but de faire l'entraînement et la validation du modèle de réseaux de neurones.

5.2 Vue d'ensemble des réseaux de neurones.

Un réseau de neurones est un système composé de plusieurs unités de calcul simples fonctionnant en parallèle. Ces unités de calculs appelées neurones (Figure 61) sont liées entre elles par des connexions connues sous le nom de poids synaptiques en raison de l'inspiration biologique des réseaux de neurones servant à stocker la connaissance. Cette connaissance est acquise par le réseau au travers d'un processus d'apprentissage. Les possibilités d'arrangements entre les neurones sont multiples. La configuration la plus classique est appelée perceptron multicouche. Dans cette architecture, les neurones sont organisés en couches comme le montre la Figure 62. Le principe de fonctionnement d'un réseau de neurones est donc de disposer d'une base de connaissances constituée de couples (entrées, sorties) et d'utiliser cette base pour déterminer les poids synaptiques [45].

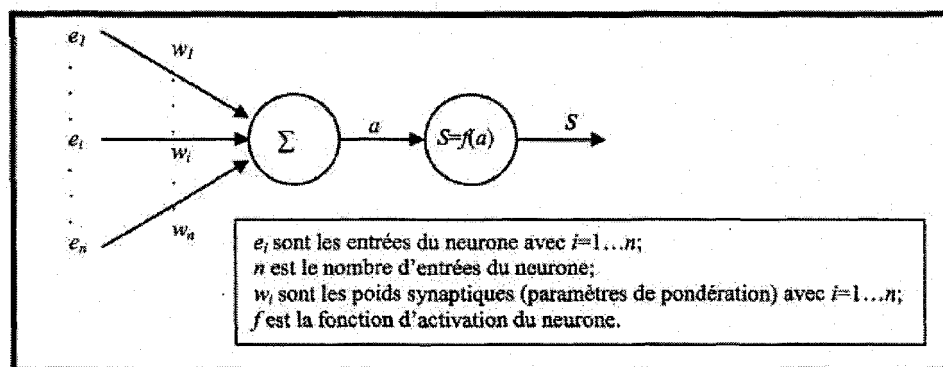


Figure 61: Architecture d'un neurone.

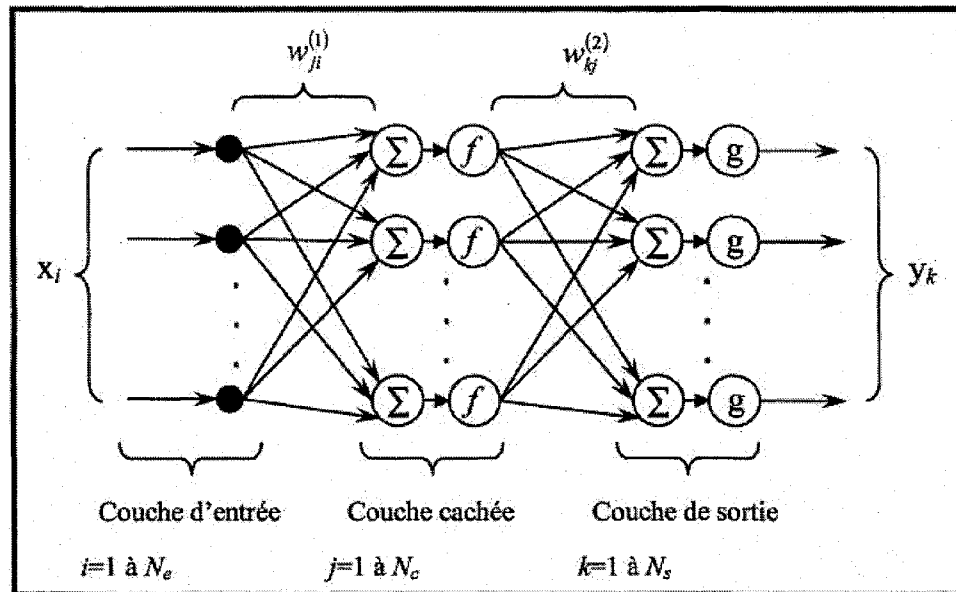


Figure 62: Architecture d'un réseau de neurones à 3 couches.

La Figure 62 illustre l'architecture d'un réseau de neurones à trois couches : la couche d'entrée, une couche cachée et la couche de sortie.

Dans chaque unité de la couche cachée, les variables sont combinées de façon linéaire. Le réseau de neurones applique une transformation non-linéaire à chacune de ces combinaisons. Finalement, les valeurs résultantes des unités cachées sont combinées de façon linéaire pour obtenir la valeur prédite [46].

Le modèle neuronal utilisé pour la prédiction de l'état du papier est constitué de 17 entrées pour l'entraînement et de 42 entrées pour la validation. Les entrées sont constituées par les tests effectués par le IDA 200, chaque test est constitué de 22 colonnes représentant les paramètres diélectriques mesurés et de 22 lignes représentant les

fréquences des points de mesures. Le nombre de sorties du réseau est de 2 correspondant à l'humidité et au vieillissement.

Pour chaque test, on connaît la valeur de l'humidité de l'échantillon testé et le degré de vieillissement, étant entendu qu'à chaque degré de vieillissement correspond le nombre d'heures de vieillissement ou la valeur du degré de polymérisation (DP): Ces deux valeurs vont constituer la cible servant à l'ajustement de la valeur de sortie lors de la phase d'apprentissage.

5.3 Présentation de la base de données.

Le succès de la prédiction de l'état du papier par l'utilisation des réseaux de neurone repose sur la mise en place d'une base de données assez fiable. Afin de pouvoir mettre en évidence l'effet du vieillissement, les échantillons de papiers ont subi un vieillissement accéléré de 250 heures, 500 heures, 750 heures et 1000 heures dans un four à une température de 115°C, après avoir été préalablement imprégnés d'huile. L'influence de l'effet de l'humidité a été obtenue par le contrôle du degré de l'humidité (humidification ou séchage) des différents échantillons dont la mesure de l'humidité a été réalisée à l'aide du titreur coulométrique Karl-Fisher. Le tableau suivant indique l'ensemble des différents tests réalisés dans cette étude, soit un total 59 tests.

Test	Humidité	Vieillessement (heure)	Test	Humidité	Vieillessement (heure)
1	0,6	00	1	0,5	250
2	0,8		2	0,6	
3	1,2		3	0,9	
4	1,3		4	2,0	
5	1,5		5	2,5	
6	1,9		6	3,6	
7	2,2		7	3,8	
8	2,9		8	4,0	
9	3,3		9	5,0	
10	4,1		10	5,4	
11	4,5		11	6,1	
12	5,3		12	6,3	
13	6,4		13		

Test	Humidité	Vieillessement (heure)	Test	Humidité	Vieillessement (heure)
1	0,5	500	1	0,5	1000
2	0,6		2	1,0	
3	0,9		3	1,4	
4	1,2		4	1,7	
5	2,1		5	2,1	
6	2,3		6	2,3	
7	2,6		7	2,6	
8	2,8		8	2,9	
9	3,2		9	3,4	
10	4,5		10	3,6	
11	4,9		11	4,7	
12	5,6		12	5,0	
			13	5,4	

Test	Humidité	Vieillessement (heure)
1	0,6	750
2	0,8	
3	1,5	
4	2,0	
5	2,2	
6	3,9	
7	5,0	
8	5,1	
9	6,0	

Tableau 10: Différents tests utilisés dans cette étude.

Pour chaque mesure, les paramètres suivants ont été relevés :

- L'indice de pertes e'' ,

- La permittivité relative ϵ'
- L'accroissement de la permittivité relative ($\Delta\epsilon'$)
- Le facteur de dissipation ($\tan\delta$)
- Le facteur de puissance
- La conductivité σ
- La résistivité ρ
- La capacité équivalente au modèle parallèle C_p
- La résistance équivalente au modèle parallèle R_p
- La capacité équivalente au modèle série C_s
- La résistance équivalente au modèle série R_s
- C' : capacité réelle en fonction de la fréquence (F)
- L'accroissement de la capacité réelle ($\Delta C'$)
- C'' : capacité imaginaire en fonction de la fréquence (F)
- Le module de l'impédance ($Abs(Z)$) de l'isolant
- Le déphasage ($Arg(Z)$) de l'isolant
- La partie réelle ($Re(Z)$)
- La partie imaginaire ($Im(Z)$)
- La capacité C de l'isolant
- Les fréquences de mesure.

Pour chaque niveau de vieillissement, les paramètres ci-dessus ont été mesurés en faisant varier l'humidité de 0,5% à environ 5%, étant donné que l'appareil de mesure (IDA 200) effectue la mesure de chaque paramètre sur toute la plage de fréquence de 1000 Hz à 1 mHz, en 22 points de mesures. Chaque test peut être assimilé à une matrice 22 x 22. On constate aisément que l'utilisation des réseaux de neurones devient indispensable pour une bonne interprétation des résultats, mais également pour obtenir un gain de temps appréciable.

5.4 Mise en œuvre du réseau

La mise en œuvre d'un réseau de neurone comprend trois (3) phases à savoir, le prétraitement, l'apprentissage et la validation.

5.4.1 Le prétraitement

Le prétraitement consiste à définir les éléments qui constituent la base de données, c'est-à-dire la définition des paires d'entrées/sorties dont le nombre des entrées et des sorties du réseau de neurone dépend des éléments à prendre en compte. Nous allons prendre comme entrées, le facteur de dissipation diélectrique ($\tan\delta$), le facteur de puissance (F_p), le déphasage ($\arg Z$), le rapport $F_p/\tan\delta$ et l'ensemble ($\arg Z-F_p$) et cela pour toutes les valeurs de fréquences délivrées par IDA 200.

5.4.2 L'apprentissage

L'apprentissage permet de déterminer et d'ajuster les valeurs des poids permettant à la sortie du réseau d'être aussi proche que possible de la cible fixée, c'est-à-dire d'obtenir une erreur la plus faible possible. Pour ce faire, on présente au réseau de neurones une partie de la base de données globale qui sera destinée à son apprentissage. Cette partie de la base de données est présentée sous forme de paires entrées/sortie, les entrées comprennent l'ensemble des valeurs des variables explicatives et les sorties comprennent les valeurs observées du processus (la cible). Les valeurs explicatives seront constituées des mesures diélectriques réalisées dans le domaine fréquentiel par le IDA

200 à savoir: le facteur de dissipation diélectrique ($\tan\delta$), le facteur de puissance, le déphasage ou l'ensemble ($\arg z-F_p$) résultant de 17 tests (voir tableau 11). La cible sera constituée par l'humidité et le vieillissement, étant entendu que pour chaque test, on connaît l'humidité et le niveau de vieillissement.

On distingue 3 types d'apprentissage :

5.4.2.1 Apprentissage supervisé

Il s'agit d'un mode d'apprentissage qui est guidé. Pour chaque entrée. On fournit au réseau une sortie désirée, qui permet de mesurer l'erreur commise en sortie, afin de modifier le comportement du réseau pour diminuer cette erreur. L'algorithme d'apprentissage supervisé le plus courant est la rétro-propagation du gradient de l'erreur pour les perceptrons multicouches

5.4.2.2 Apprentissage non-supervisé

Ce mode d'apprentissage laisse le modèle s'adapter aux données. On considère que toute l'information nécessaire se trouve dans les données d'entrée.

5.4.2.3 Apprentissage par renforcement

A mi-chemin entre le mode supervisé et le mode non-supervisé, on trouve l'apprentissage par renforcement. Dans ce mode d'apprentissage, on ne donne pas

explicitement les sorties désirées, mais on constate seulement la réussite ou l'échec de la tâche.

Test	Heures de vieillissement	Humidité
1	0	2,2
2	0	4,5
3	250	0,5
4	250	2
5	250	3,6
6	250	4
7	250	5,4
8	500	0,5
9	500	2,1
10	500	3,2
11	500	5,6
12	750	1,5
13	750	3,9
14	750	5,1
15	1000	0,5
16	1000	1,7
17	1000	2,9

Tableau 11: Base de données utilisée pour l'apprentissage.

5.4.3 La validation

Afin de s'assurer que le réseau de neurones s'en tient aux relations fondamentales de dépendance, on utilise, en plus de l'ensemble d'entraînement, un second ensemble appelé ensemble de validation. À la fin de chaque époque d'entraînement, on mesure non seulement l'erreur d'entraînement mais aussi l'erreur de validation, c'est-à-dire l'erreur totale commise sur tous les exemples de l'ensemble de validation. Cette erreur de validation est calculée une fois que la phase d'optimisation des paramètres est terminée. L'ensemble de validation sera constitué des mesures diélectriques réalisées dans le domaine fréquentiel par le IDA 200 à savoir: le facteur de dissipation diélectrique ($\tan\delta$), le facteur de puissance et le déphasage résultant de 42 tests comme le montre le tableau 12.

Test	Heures de vieillissement mesurées	Humidité mesurées
1	0	0,60
2	0	0,90
6	0	1,20
4	0	1,30
5	0	1,50
6	0	1,90
7	0	2,90
8	0	3,30
9	0	4,10
10	0	5,30
11	0	6,40
12	250	0,60
13	250	0,90
14	250	2,50
15	250	3,80
16	250	5,00
17	250	6,10
18	250	6,30
19	500	0,60
20	500	0,90
21	500	1,20
22	500	2,30
23	500	2,60
24	500	2,80
25	500	4,50
26	500	4,90
27	750	0,60
28	750	0,80
29	750	2,00
30	750	2,20
31	750	5,00
32	750	6,00
33	1000	1,00
34	1000	1,40
35	1000	2,10
36	1000	2,30
37	1000	2,60
38	1000	3,40
39	1000	3,60
40	1000	4,70
41	1000	5,00
42	1000	5,40

Tableau 12: Base de données utilisée pour la validation.

5.5 Constitution du réseau de neurone utilisé

La couches d'entrée du réseau de neurones utilisé sera constituée de 22 entrées dans le cas d'utilisation du facteur de dissipation diélectrique ($\tan\delta$), du facteur de puissance (Fp), le déphasage ($\arg Z$) ou du rapport $Fp/\tan\delta$ et de 44 entrées dans le cas de l'ensemble ($\arg Z$ -Fp) tandis que la couche de sortie sera constituée d'une sortie représentant la valeur de l'humidité estimée. La couche cachée sera constituée de 16 neurones. Cette valeur a été déterminée expérimentalement en faisant varier le nombre de neurones de la couche cachée et en calculant l'erreur entre la sortie du réseau et la cible fixée.

5.6 Présentation des résultats

Une fois la phase d'apprentissage du réseau de neurones terminée, nous avons présenté au réseau, l'ensemble de validation composé de 42 tests afin de vérifier si le réseau serait en mesure d'estimer les valeurs de l'humidité correspondants aux paramètres suivants : le facteur de dissipation ($\tan\delta$), le facteur de puissance (PF), le déphasage de l'impédance de l'isolant ($\arg Z$) ainsi que le rapport $FP/\tan\delta$ et la combinaison du déphasage et du facteur de puissance($\arg Z$ et FP). Les résultats de la validation sont résumés dans le tableau 13 ci-après:

HEURES MESURÉES	HUMIDITÉS MESURÉES	HUMIDITÉSESTIMÉES				
		argZ	FP/tanδ	tanδ	FP	argZ et FP
0	0,60	0,75	0,94	0,83	1,27	0,90
0	0,90	0,65	0,67	0,68	0,96	0,69
0	1,20	0,92	1,23	1,93	1,74	0,99
0	1,30	0,64	0,60	0,65	1,10	0,59
0	1,50	0,67	0,88	0,74	1,15	0,82
0	1,90	0,56	0,70	1,16	1,11	0,75
0	2,90	1,89	2,02	0,46	1,58	2,32
0	3,30	2,95	2,38	2,46	2,48	2,51
0	4,10	3,06	2,63	2,80	3,59	4,27
0	5,30	5,07	4,51	4,74	3,91	4,81
0	6,40	5,52	4,99	5,23	5,10	5,20
250	0,60	1,39	1,05	1,17	1,09	0,96
250	0,90	0,94	1,12	1,01	1,55	1,00
250	2,50	2,58	2,24	2,15	2,01	2,63
250	3,80	3,24	3,04	3,92	3,61	3,94
250	5,00	5,23	5,07	4,90	4,81	4,67
250	6,10	5,24	5,24	5,86	5,51	5,33
250	6,30	5,13	5,99	5,31	5,64	6,00
500	0,60	0,97	0,91	1,35	0,90	0,69
500	0,90	0,57	0,54	0,85	0,60	0,52
500	1,20	1,04	1,00	1,51	0,49	0,91
500	2,30	2,12	2,32	1,53	1,45	2,87
500	2,60	2,63	1,71	1,61	2,56	1,93
500	2,80	2,87	2,76	2,41	2,61	3,47
500	4,50	3,48	2,79	3,22	3,82	3,61
500	4,90	5,28	5,23	4,87	5,02	4,93
750	0,60	0,73	0,65	0,58	1,16	0,45
750	0,80	0,60	0,68	0,80	0,86	0,72
750	2,00	0,17	1,11	0,72	1,22	0,56
750	2,20	2,23	2,42	2,11	2,31	2,65
750	5,00	5,61	6,02	5,91	5,90	5,40
750	6,00	6,34	6,23	6,25	5,15	5,92
1000	1,00	1,07	1,59	1,62	1,13	1,55
1000	1,40	1,19	1,10	1,45	0,65	1,05
1000	2,10	1,37	1,99	2,19	1,97	2,39
1000	2,30	1,72	2,47	2,32	2,20	3,63
1000	2,60	2,74	2,74	2,02	3,12	3,31
1000	3,40	4,14	2,38	4,16	3,51	4,44
1000	3,60	5,51	4,27	4,72	2,85	3,68
1000	4,70	4,78	5,13	4,32	4,24	5,25
1000	5,00	6,36	2,73	5,60	4,53	5,60
1000	5,40	5,16	5,49	4,80	5,63	5,29
R2:Coefficient de détermination		0,8713	0,8586	0,8507	0,9059	0,8968

Tableau 13: Résultats du test de validation.

Afin de mieux constater l'importance des résultats obtenus du tableau 13, nous avons présenté ces résultats sous forme graphique. Les figures 63 à 67 représentent

respectivement les valeurs de l'humidité mesurées comparées aux valeurs de l'humidité estimées par le réseau de neurones à partir du déphasage, du rapport $FP/\tan\delta$, de la $\tan\delta$, du facteur de puissance (FP) et de la combinaison facteur de puissance et déphasage [ArgZ et FP]. D'après ces résultats, on remarque que l'estimation de l'humidité, en utilisant le FP ou l'ensemble [ArgZ et FP], donne des meilleures estimations vu que leur coefficient de détermination, qui mesure la similitude entre les valeurs estimées et mesurées, est le plus élevé.

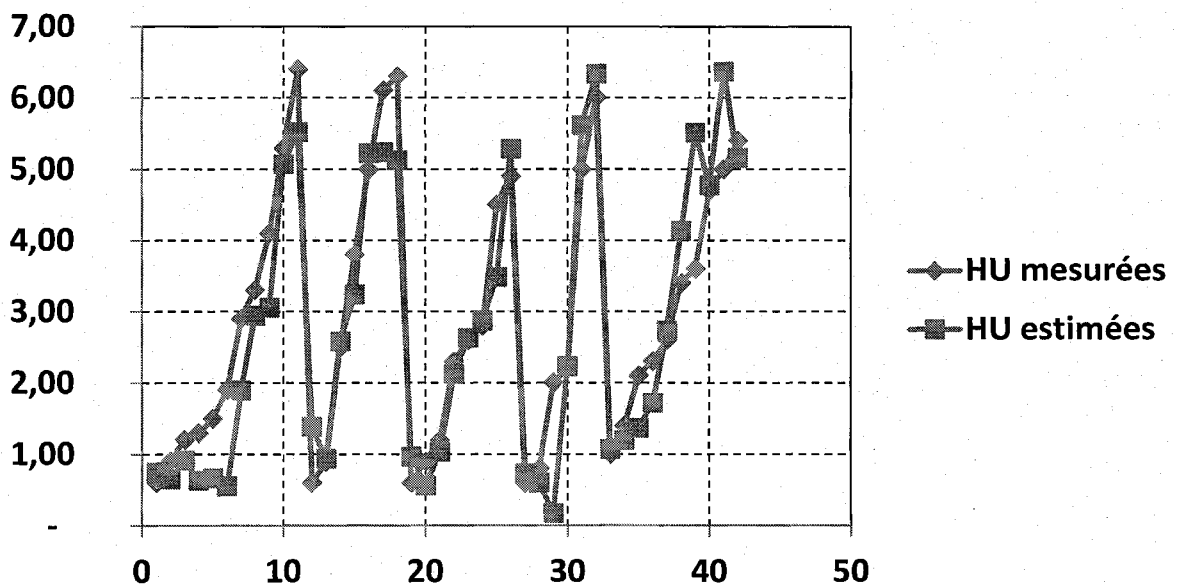


Figure 63: Comparaison entre l'humidité mesurée et l'humidité estimée du déphasage.

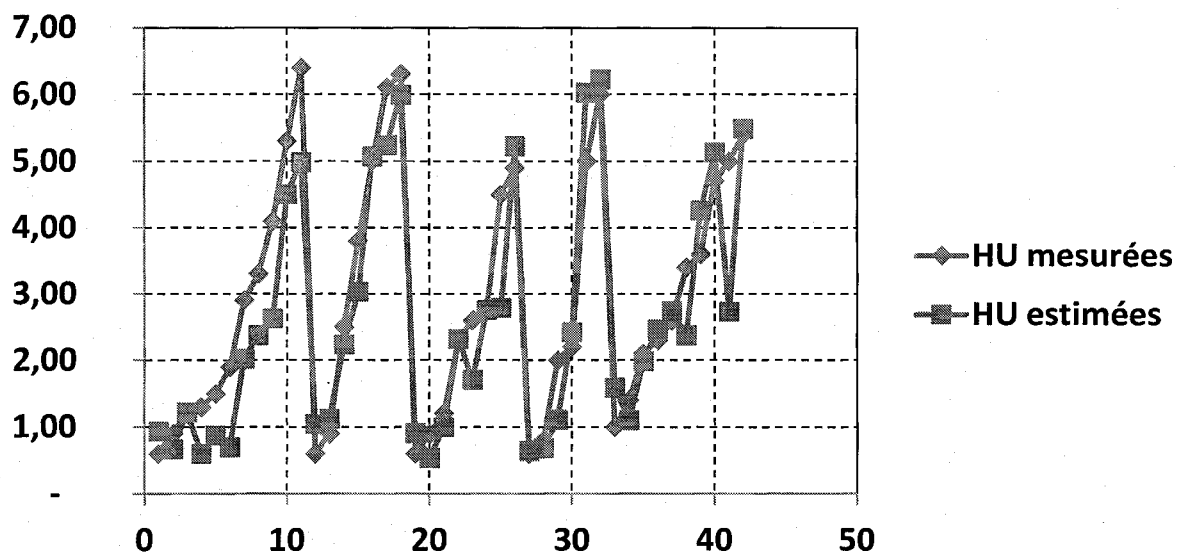


Figure 64: Comparaison entre l'humidité mesurée et l'humidité estimée du rapport $FP/\tan\delta$.

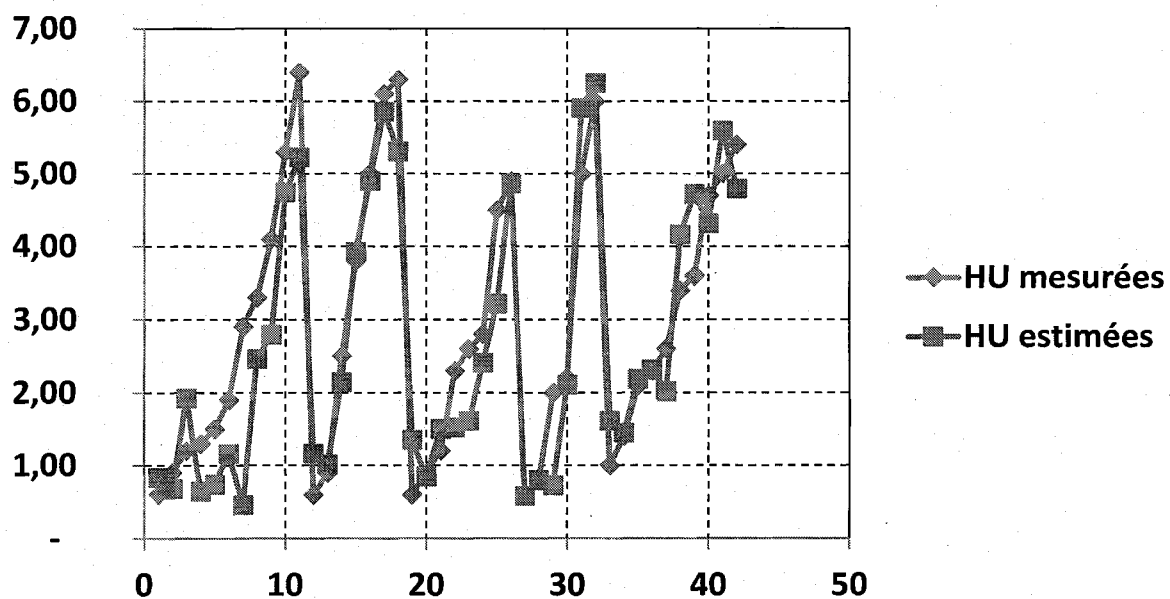


Figure 65: Comparaison entre l'humidité mesurée et l'humidité estimée de la $\tan\delta$.

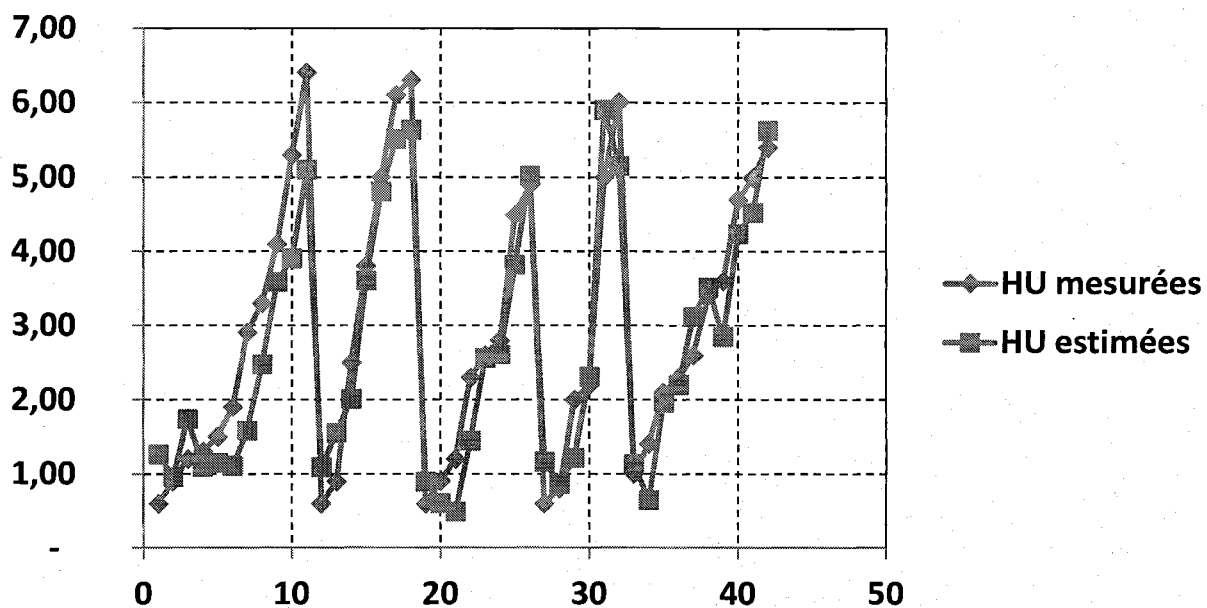


Figure 66: Comparaison entre l'humidité mesurée et l'humidité estimée du facteur de puissance.

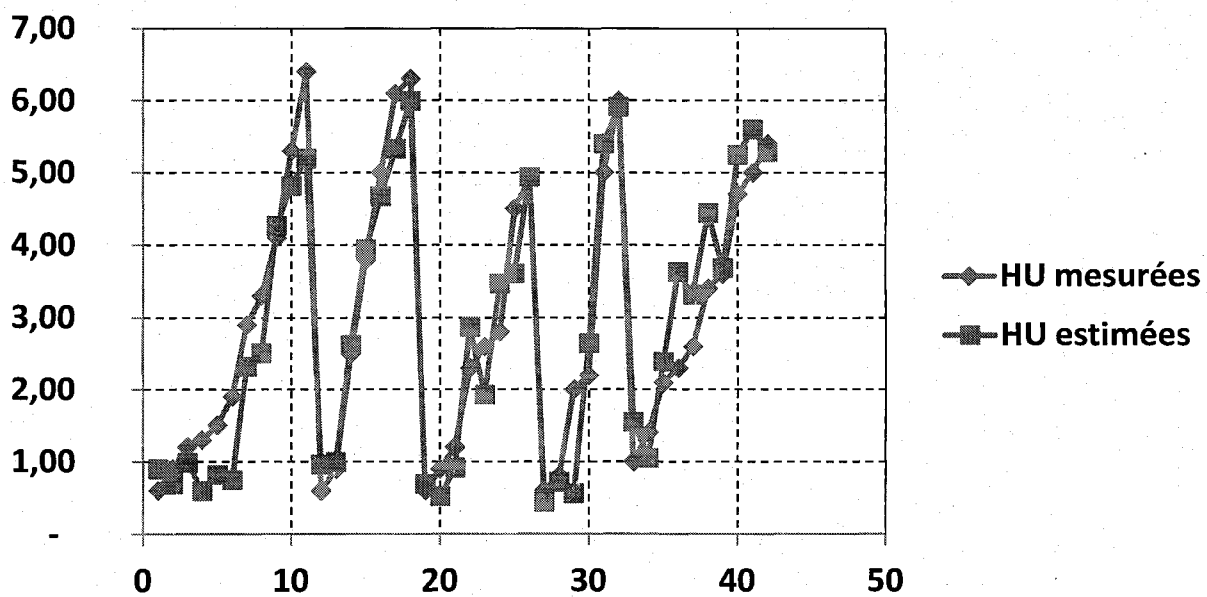


Figure 67: Comparaison entre l'humidité mesurée et l'humidité estimée de la combinaison facteur de puissance et déphasage.

5.7 Analyse des résultats et conclusion

L'analyse des résultats des tableaux indique clairement que le réseau est capable d'estimer, donc de fournir des renseignements concernant l'état de l'humidité d'une isolation à partir des mesures réalisées dans le domaine des fréquences par le IDA 200. En effet nous constatons que le réseau arrive à estimer avec une certaine précision, les valeurs d'humidités correspondant aux différents tests, les humidités ayant été auparavant mesurées avec le titreur coulométrique Karl-Fisher. Afin de déterminer lesquels des paramètres utilisés pour l'analyse permettent d'obtenir un meilleur résultat, nous avons calculé le coefficient de détermination dont les valeurs sont reportées dans le tableau ci-dessous.

Paramètres utilisé pour l'apprentissage	R2: Coefficient de détermination
Facteur de puissance	0,9059
Argz/Fp	0,8968
Déphasage	0,8713
Fp/tan δ	0,8586
Tan δ	0,8507

Tableau 14: Coefficient de détermination des différents paramètres.

Ces valeurs font ressortir le facteur de puissance comme étant le paramètre qui permet d'obtenir des résultats avec une bonne appréciation.

CHAPITRE 6

CONVERSION DES MESURES EFFECTUÉES DANS LE DOMAINE TEMPOREL AU DOMAINE FRÉQUENTIEL

6.1 Introduction

Il existe deux techniques de mesures de la réponse diélectrique, utilisées pour le diagnostic des transformateurs, à savoir les mesures effectuées dans le domaine temporel et celles effectuées dans le domaine fréquentiel. Chacune de ces deux mesures présente quelques avantages et inconvénients:

La présentation de la réponse diélectrique dans le domaine fréquentiel possède bien des avantages, à savoir: Les parties réelle et imaginaire de la capacitance des diélectriques peuvent être séparées, permet également de définir le facteur de pertes dans le domaine fréquentiel. La mesure des paramètres des diélectriques dans le domaine fréquentiel présente de meilleures performances aux bruits. Mais ces mesures dans le domaine fréquentiel nécessitent un temps d'application extrêmement long, environ 15 heures,

alors que les mesures effectuées dans le domaine temporel, présentent un temps très réduit.

La transformation temps-fréquence des données présente alors bien des avantages, en aidant à mieux interpréter les données pour un meilleur diagnostic.

En se basant sur la théorie des diélectriques, il n'est pas nécessaire d'effectuer les mesures directement dans le domaine fréquentiel, les mesures peuvent être effectuées dans le domaine temporel par une mesure des courants de polarisation et de dépolarisation; le courant mesuré pouvant être alors transféré dans le domaine fréquentiel en utilisant la transformée de Fourier.

6.2 Modélisation du papier imprégné des transformateurs par le modèle étendu de Debye.

Nous présentons dans ce chapitre le modèle étendu de Debye qui peut être défini comme étant le circuit équivalent utilisé pour la modélisation des systèmes d'isolation papier/huile des transformateurs (figure 68). Ce circuit équivalent proposé par Debye permet de mieux comprendre la fonction de la réponse diélectrique des isolants. Selon ce modèle le processus de la polarisation peut-être modélisé par une mise en parallèle de plusieurs branches et chaque branche étant constituée par un circuit R-C série [36, 37, 47].

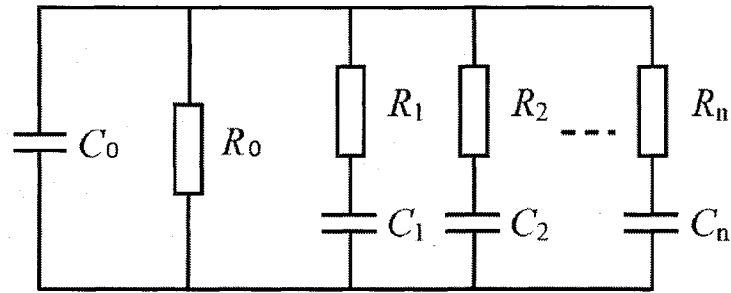


Figure 68: Modèle de Debye pour les diélectriques linéaires [37].

R_0 étant la résistance d'isolement et est le responsable de la l'existence du courant de conduction

C_0 représente la capacité géométrique du système d'isolation.

En se référant à la figure 68, les courants de polarisation et de dépolarisation sont composés des courants de relaxation des différentes branches. Dans ce cas, le courant de polarisation peut être considéré comme étant la somme de fonctions exponentielles représentant les courants des différentes branches comme l'exprime l'équation suivante [36, 37, 47] :

$$I_{pol}(t) = \sum_{i=0}^n a_i e^{-t/\tau_i} \quad (61)$$

où $\tau_i = \text{constante de temps} = R_i C_i$

$t = \text{temps de polarisation}$

a_i = coefficient lié à la tension de charge, la durée de charge et les paramètres relatifs à chaque branche :

$$a_i = \frac{U(t)}{R_i} (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (62)$$

n = nombre de branches du modèle du diélectrique

6.3 Principe

La méthode de conversion consiste à la décomposition des mesures du courant de polarisation, issues de la technique PDC (Polarization Depolarization Current), en une somme de fonctions exponentielles dans le but de présenter les mesures du courant de polarisation par une fonction analytique. Cette transformation permettra de déterminer sa transformée de Laplace et par la suite déterminer la réponse fréquentielle de l'impédance du diélectrique.

La Figure 69 présente le schéma de principe de la mesure du courant de polarisation couplé au circuit équivalent du diélectrique selon le modèle de Debye.

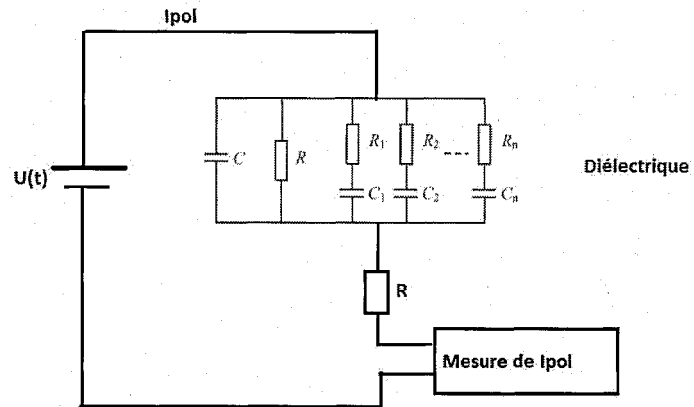


Figure 69: Schéma de mesure du courant de polarisation.

La figure suivante représente l'évolution du courant de polarisation du diélectrique tracé en fonction du temps dans une échelle log-log.

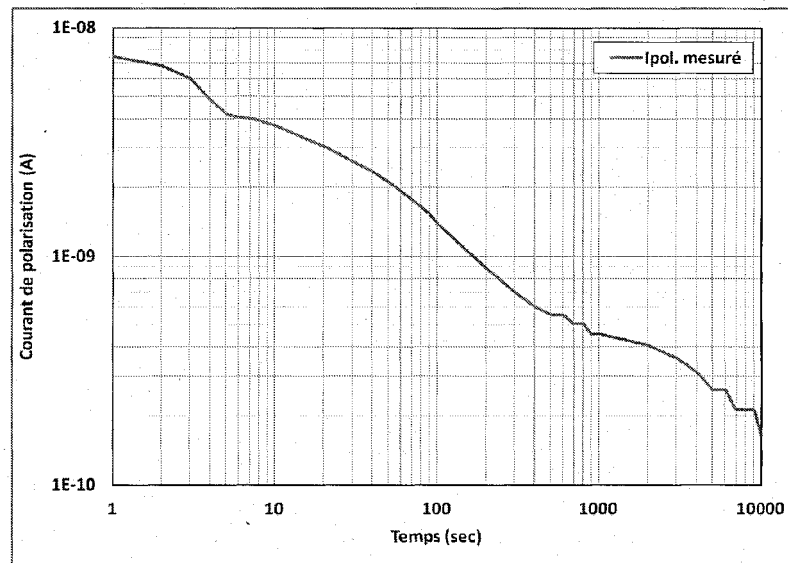


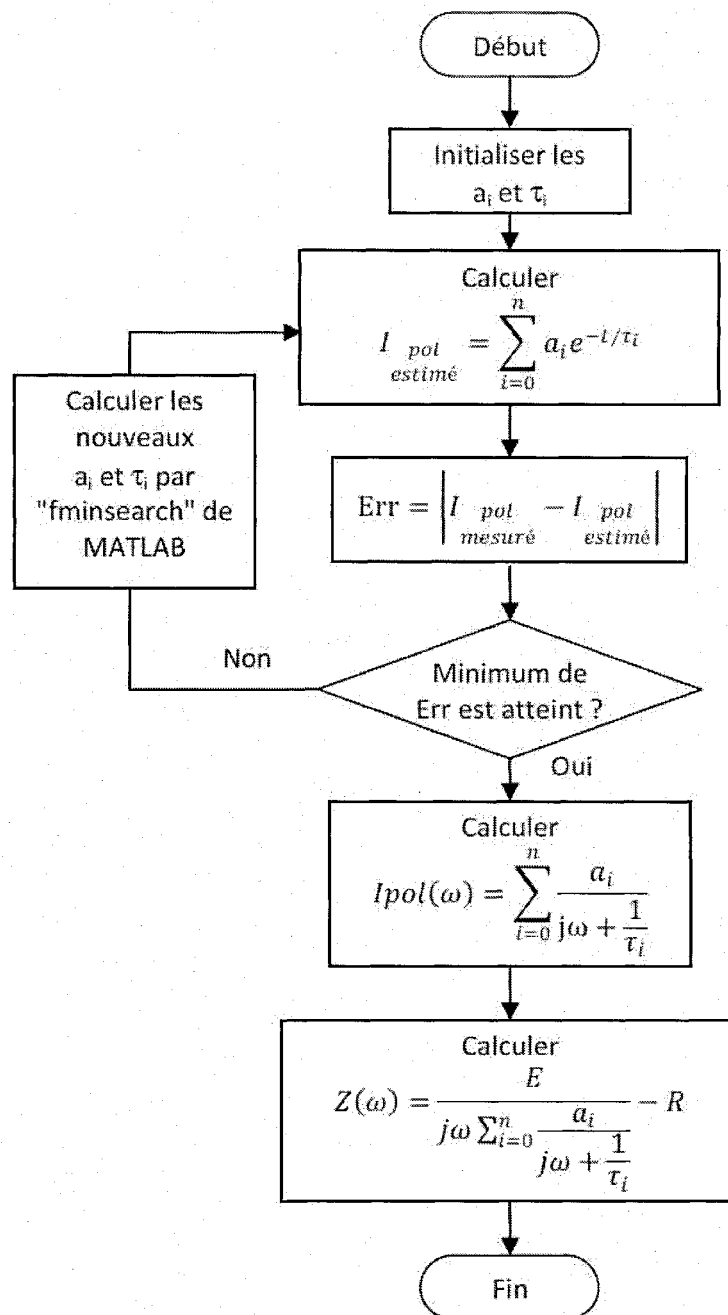
Figure 70: Courant de polarisation mesuré dans le domaine temporel [48].

6.4 Estimation du courant de polarisation mesuré

Afin de bien simuler le courant de polarisation mesuré par la somme de fonctions exponentielles, un algorithme d'optimisation a été conçu sous le logiciel Matlab. Cet algorithme consiste à calculer les coefficients a_i et τ_i de chaque exponentielle en minimisant l'erreur entre le courant de polarisation mesuré et celui calculé par la somme de fonctions exponentielles.

L'algorithme d'optimisation utilisé dans notre travail pour déterminer les coefficients a_i et τ_i , est basé sur la méthode d'optimisation multivariable du simplex [49]. Cet algorithme est illustré dans le logiciel MATLAB par la fonction "fminsearch".

La conversion du domaine temporelle au domaine fréquentiel, qui consiste à calculer les coefficients a_i et τ_i selon la méthode d'optimisation de la fonction "fminsearch" de MATLAB, est réalisée selon l'organigramme ci-dessous.



La figure suivante représente le courant de polarisation estimé ainsi que les différentes exponentielles qui le constituent après avoir minimisé l'erreur par l'algorithme d'optimisation.

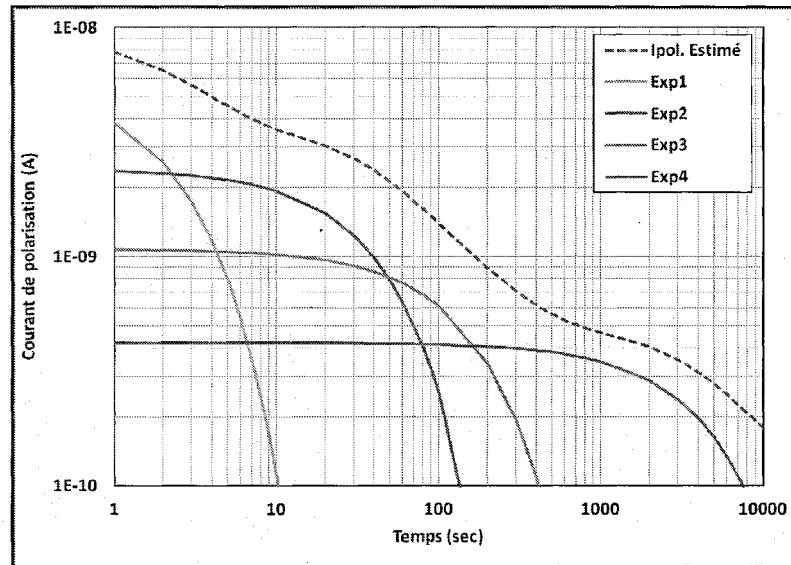


Figure 71: courant de polarisation estimé dans le domaine temporel.

Le courant de polarisation mesuré et celui estimé sont illustrés à la figure suivante.

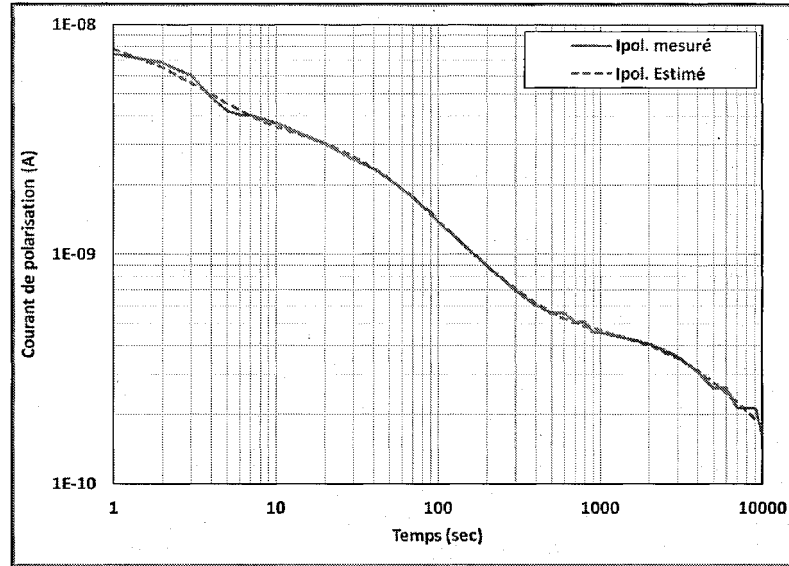


Figure 72: courant de polarisation estimé et mesuré dans le domaine temporel.

6.5 Détermination de l'expression de l'impédance du diélectrique.

D'après le circuit de polarisation de la figure 69, la transformée de Laplace du courant de polarisation est donné par la relation suivante:

$$I_{pol}(t) \xrightarrow{\text{Transformée de Laplace}} I_{pol}(s) = \frac{U(s)}{Z(s) + R} \quad (63)$$

De cette expression, nous pouvons tirer l'expression de l'impédance, soit:

$$Z(s) = \frac{U(s)}{I_{pol}(s)} - R \quad (64)$$

Dans le domaine de Laplace, l'expression du courant de polarisation, de l'impédance et de la tension de charge deviennent:

$$I_{pol}(t) = \sum_{i=0}^n a_i e^{-t/\tau_i} \xrightarrow{\text{Transformée de Laplace}} I_{pol}(s) = \sum_{i=0}^n \frac{a_i}{s + \frac{1}{\tau_i}} \quad (65)$$

$$U(t) = E\mu(t) \xrightarrow{\text{Transformée de Laplace}} U(s) = \frac{E}{s} \quad (66)$$

Dans ce cas l'impédance $Z(s)$ du diélectrique est exprimée par :

$$Z(s) = \frac{E}{s \sum_{i=0}^n \frac{a_i}{s + \frac{1}{\tau_i}}} - R \quad (67)$$

Dans le domaine fréquentiel, l'expression de l'impédance $Z(\omega)$ du diélectrique devient alors:

$$Z(\omega) = \frac{E}{j\omega \sum_{i=0}^n \frac{a_i}{j\omega + \frac{1}{\tau_i}}} - R \quad (68)$$

Les figures 73 et 74 représentent respectivement les amplitudes et les déphasages de l'impédance Z mesurée et celle estimée par la transformation temps/fréquence.

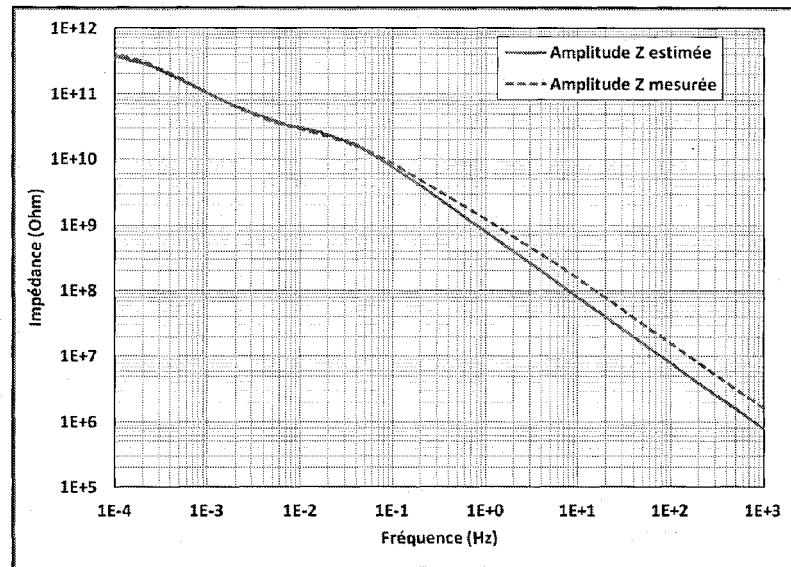


Figure 73: Impédance Z mesurée et estimée dans le domaine fréquentiel.

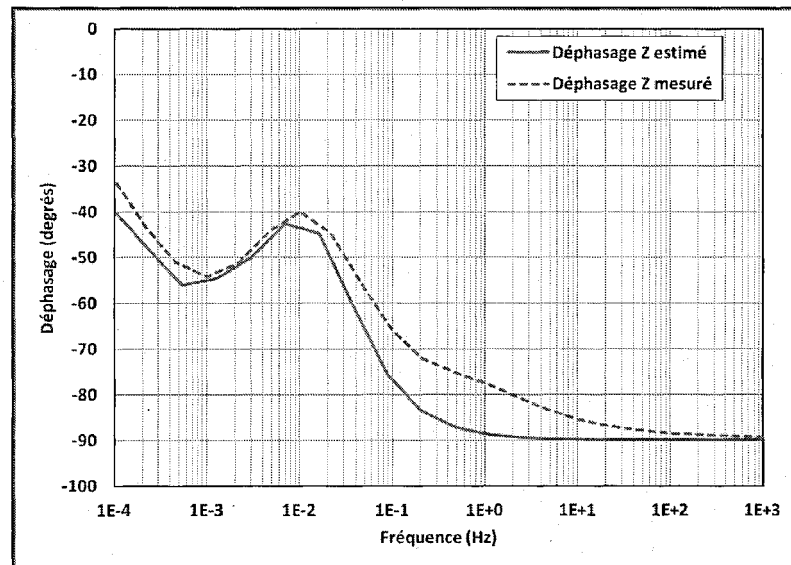


Figure 74: Déphasage mesuré et estimé dans le domaine fréquentiel.

6.6 Conclusion et analyse des résultats

La méthode de la décomposition de la polarisation en une somme de fonctions exponentielles, permet à partir d'une mesure du courant de polarisation effectuée par la

technique PDC en un temps d'environ 3 heures, d'obtenir les informations concernant le facteur de dissipation, la capacitance, la permittivité et la conductivité des matériaux diélectriques.

Dans notre étude, nous avons tracé la courbe indiquant la simulation de la variation de l'impédance Z et du déphasage en fonction de la fréquence. Nous l'avons comparé aux courbes obtenues par une mesure fréquentielle avec l'appareil IDA 200 et avons nous fait les observations suivantes:

- aux basses fréquences ($0,0001 \text{ Hz} \leq f \leq 0,1 \text{ Hz}$) les courbes expérimentales et simulées sont parfaitement superposées indiquant une erreur d'approximation très faible.
- Par contre aux fréquences supérieures à $0,1 \text{ Hz}$, l'amplitude de la courbe simulée est inférieure à celle de la courbe mesurée, indiquant une certaine erreur.

Concernant le déphasage, l'amplitude de la courbe simulée est inférieure à celle de la courbe mesurée, nous constatons néanmoins une erreur faible pour les fréquences comprises entre $0,0001$ et $0,01 \text{ Hz}$.

CHAPITRE 7

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS

7.1 Conclusions générales

La dégradation du système d'isolation papier/huile des transformateurs de puissance et principalement la dégradation du papier est un problème crucial dans la mesure où elle entraîne la diminution de leur durée de vie. Étant donné que la durée de vie d'un transformateur est directement liée à la durée de vie de son isolation papier, il devient nécessaire, pour les compagnies de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique de disposer d'outils de diagnostic et de technologie fiables, capables de prédire l'état du papier isolant et de mettre à la disposition des services de maintenance des outils d'aide à la décision avancés. C'est dans ce contexte que ce projet de recherche a été initié.

L'objectif principal visé par cette étude était, pour ce faire, défini comme suite: « Amélioration l'interprétation de la spectroscopie diélectrique pratiquée sur les transformateurs de puissance pour en faire un outil de diagnostic capable de donner des

informations fiables et précises sur l'état de la dégradation de l'isolation solide». Cet objectif principal a été scindé en deux objectifs spécifiques, à savoir:

1. Séparation de l'effet du vieillissement et de l'humidité sur les mesures diélectriques de l'isolation solide des transformateurs de puissance (papier et carton).

2. La conversion des mesures effectuées dans le domaine temporel au domaine fréquentiel.

Pour l'atteinte du premier objectif spécifique, après l'imprégnation d'huile de plusieurs échantillons de papiers, puis leur vieillissement dans un four à 115°C pendant des durées de 250 heures, 500 heures, 750 heures et 1000 heures, nous avons, à l'aide du IDA 200, effectué les mesures des différents paramètres diélectriques dans le domaine fréquentiel pour différents degrés d'humidité. Les résultats obtenus par l'analyse de l'ensemble des mesures diélectriques y compris l'utilisation des réseaux de neurones ont permis de tirer les conclusions suivantes:

- Les mesures diélectriques effectuées dans le domaine fréquentiel sont moins sensibles au vieillissement du papier qu'à l'humidité. En effet, pour une humidité fixée, on ne constate pas une très nette augmentation des pertes diélectriques. Par contre, pour un vieillissement donné, on constate une augmentation très nette des pertes diélectriques.

- Les mesures diélectriques effectuées dans le domaine fréquentiel sont simultanément sensibles aux variations de l'humidité et du vieillissement, même si elles sont moins sensibles aux variations du vieillissement. Cette propriété rend difficile voir impossible, la séparation de l'effet du vieillissement et de l'humidité. Cette remarque a entraîné la redirection des éléments de l'analyse.
- Nous avons analysé l'impact de l'effet du vieillissement et de l'humidité aux différentes fréquences, à savoir 1 Hz, 60 Hz, 0,1 Hz, 0,01 Hz, 0,001 Hz et 1 mHz. Lors de cette nouvelle analyse, nous avons constaté en traçant les courbes représentant l'évolution du facteur de dissipation en fonction de l'humidité et du vieillissement, que pour les basses fréquences, plus précisément, les fréquences comprises entre 0,1 Hz et 0,1 mHz, les effets séparés du vieillissement et de l'humidité peuvent être mis en évidence pour des valeurs d'humidité n'excédant pas 2,5%. Cette analyse laisse entrevoir une lueur d'espoir concernant la séparation de l'effet du vieillissement et de l'humidité sur les mesures diélectriques effectuées dans le domaine fréquentiel et permettra ainsi de prédire l'état de l'isolation solide (papier et carton) des transformateurs de façon non destructive.

Après cette analyse, nous avons utilisé les réseaux de neurones pour non seulement faciliter l'analyse des résultats des mesures, mais également pour aider à la prise de décision en rendant automatique les opérations de l'analyse. Après la phase

d'apprentissage, le réseau a été capable d'estimer avec une bonne précision, les valeurs de l'humidité des mesures diélectriques de l'ensemble de validation. En analysant les valeurs des humidités estimées, il est ressorti que le facteur de puissance permettrait d'obtenir des résultats avec une bonne précision

Concernant le deuxième objectif spécifique, nous avons utilisé la technique de la décomposition du courant de dépolarisation PDC en une somme de fonctions exponentielles. Nous avons utilisé le courant de polarisation à la place du courant de dépolarisation. Ainsi après l'implantation d'un algorithme d'optimisation sous le logiciel Matlab, pour le calcul des coefficients a_i et τ_i de chaque exponentielle (en minimisant l'erreur entre le courant de polarisation mesuré et celui calculé par la somme de fonctions exponentielles), nous avons pu avec satisfaction convertir les mesures PDC effectuées dans le domaine du temps vers le domaine fréquentiel. Nous avons noté une parfaite superposition des deux courbes aux basses fréquences, tandis qu'aux hautes fréquences on constatait une certaine déviation.

Cette étude présente un intérêt capital pour les compagnies de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique voir les entreprises industrielles. Son aboutissement permettra une bonne maîtrise de la maintenance des transformateurs de puissance. Cela permettra de prolonger la durée de vie des équipements, réduisant par la même occasion les frais d'entretien, de réparation ou de remplacement prématuré des transformateurs. L'aboutissement de cette étude permettra de mettre finalement de

garantir la fourniture d'électricité aux utilisateurs, à travers des réseaux fiables et sécurisés.

Pour l'aboutissement final de ce projet de recherche, nous préconisons les recommandations suivantes.

7.2 Recommandations pour les travaux futurs

Bien que cette étude semble nous mettre sur une piste, il reste certains points à éclaircir et à vérifier. C'est à ce titre que les recommandations suivantes permettront sans doute d'atteindre l'objectif ultime.

7.2.1 Impact du vieillissement sur les mesures diélectriques

Il faudra accentuer le degré de vieillissement du papier afin de mettre en évidence son influence sur les résultats des mesures diélectriques. Pour ce faire, nous préconisons que les vieillissements soient repris, mais cette fois, jusqu'à environ 2500 heures afin d'atteindre un DP d'environ 200 (qui correspond à un papier très fragile mécaniquement). Cet état de dégradation avancée devra permettre d'influencer significativement les résultats des mesures diélectriques.

7.2.2 Influence de l'imprégnation sur la dégradation du papier

Cette recommandation permettra de déterminer si les résultats des mesures diélectriques des papiers imprégnés sont influencés par la dégradation de l'huile ou du

papier. Pour y parvenir, nous suggérons de vieillir l'huile, le papier et l'ensemble huile-papier imprégné séparément, puis de réaliser des tests diélectriques à l'aide de l'IDA 200 sur chaque élément.

7.2.3 Reconnaissance du vieillissement pas les réseaux de neurones

L'utilisation des réseaux de neurones a permis d'estimer la valeur de l'humidité de l'isolation solide à partir des mesures diélectriques effectuées dans le domaine fréquentiel. Il faudra donc à la suite des recommandations précédentes, entraîner le réseau de neurones pour qu'il puisse estimer les valeurs des vieillissements des mesures diélectriques. Une fois cet apprentissage terminé, et que le réseau arrive à estimer l'humidité et le vieillissement, on pourra le configurer pour qu'il puisse effectuer le classement en fonction de l'humidité ou du vieillissement, permettant ainsi d'estimer le degré de vieillissement, donc l'état du papier.

La prise en compte de ces recommandations et du travail déjà effectué permettront une avancée significative dans cette tentative de séparation de l'effet de l'humidité et du vieillissement, qui préoccupe autant les chercheurs que les industriels.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] W. H. B. P.E., "Analysis of Transformer Failures," presented at the International Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference – Stockholm, 2003, Stockholm, 2003.
- [2] W. H. B. P.E. (15-03-2012). *Failure analysis of transformers*. Available: www.imia.com/downloads/.../EP09_2003.pdf
- [3] W. H. Bartley. (12/05/2011). *Maintenance des transformateurs*. Available: <http://www.euros.net/produits-services-haute-tension/maintenance-transformateur>
- [4] ASTM, "Annual Book of ASTM Standards," in *Electrical insulation and electronics*, ed, 2005, p. 577.
- [5] C. PERRIER, "Etude des huiles et des mélanges à base d'huile minérale pour transformateur de puissance: Recherche d'un mélange optimal," Doctorat, Ecole Central de Lyon, 2005.
- [6] N. BERGER. Liquides isolants en électrotechnique. *Techniques de l'ingénieur_D2470*. 20 pages.
- [7] C. MENGUY. Mesures des caractéristiques des matériaux isolants solides_D 2 310. *Les Techniques de l'ingénieur*. 31 pages.
- [8] W. Bassi, H. A. P. Silva, C. A. Galdeano, and J. H. C. Hossri. (12/05 2011). *Moisture assessment for power transformers using PDC and drying-out processes evaluation*. Available: http://www.treotech.com.br/conteudo/na_midia/Artigo_RVP2008_MOISTURE_ASSESSMENT_POWER_TRANSFORMERS_USING_PDC_DRYING-OUT_PROCESSES_EVALUATION.pdf
- [9] L. O. SERAPHIN. (11/03/2012). *Bien-fondé des analyses d'huiles pour le diagnostic d'état des transformateurs immergés*. Available: www.laboratoireoksman.com/Analyse_transformateur.pdf
- [10] I. Fofana, "Insulating Oil - Another Vital Part of Transformer Body," presented at the IEEE seminar, 2010.
- [11] S. D. Myers, "presentation Transformer Oil Testing," june 2008.

- [12] T. O. Rouse. (1998, Mineral Insulating Oil in Transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine Volume 14*, 6-16.
- [13] A. K  chler, T. Leibfried, B. Breitenbach, J. J. Alff, V. D. Houhanessian, and W. S. Zaengl, "Transformer Insulation Diagnosis by Polarization and Depolarization Current Analysis," 48. *Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Technische Universität Ilmenau*, 22.-25. September 2003 2003.
- [14] P. Hélène, "analyse de la réponse diélectrique du complexe papier-huile dans les transformateurs de puissance," Master, ETS de montréal., 2008.
- [15] R. Fournié, *Les isolants en   lectrotechnique : Essais, Mécanismes de dégradation, Applications Industrielles*. Paris: Eyrolles, 1990.
- [16] OMICRON. (12/05/2011). *Dielectrics Response Analysis with DIRANA*. Available: <http://www.omicron.at/en/support/literature-videos/video/vcat/213/noc/1/>
- [17] I. Fofana, Y. Zi  , and M. Farzaneh, "Dielectric Response methods for diagnostics of Power equipment," in *Recent Advances in Dielectric Materials*, ed: Ai Huang,    Nova Science Publishers.
- [18] Y. Du, M. Zahn, B. C. Lesieutre, A. V. Mamishev, and S. R. Lindgren, "Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 15, pp. 11-20, 1999.
- [19] T. C. Services. (30/04/2012). *Evaluation of Transformer Solid Insulation*. Available: http://www.satcs.co.za/Furan_Presentationj.pdf
- [20] R. Gallay. (28/juin/2011). *Matériaux de l'  lectrotechnique (Chapitre 4 : propriétés diélectriques de la matière)*. Available: <http://www.garmanage.com/atelier/index.cgi?path=public&B&Teaching&B&EPFL&B&>
- [21] E. David. (14/avril/2011). *IGEE-4453: Matériaux de l'  lectrotechnique: Chapitre 4.2 Diélectriques*. Available: http://wcours.gel.ulaval.ca/2006/a/21948/default/5notes/IGEE-403%20chap4_2%20EDavid.pdf
- [22] R.Fournié. (février 2000) Diélectriques:bases théoriques. *les techniques de l'ingénieur : D2300*. 18 pages.
- [23] R. Fournié, *Les isolants en   lectrotechnique : Concepts et théories «Collection de la Direction des études et Recherches d'électricité de France»*. Paris: Eyrolles, 1986.
- [24] S. M. Gubanski, J. Blennow, B. Holmgren, M. Koch, A. Kuechler, R. Kutzner, J. Lapworth, D. Linhjell, S. Tenbohlen, and P. Werelius. (2010). *Dielectric Response Diagnoses For Transformer Windings*.

- [25] A. K  chler, T. Leibfried, B. Breitenbach, J. J. Alff, V. D. Houhanessian, and W. S. Zaengl, "Transformer Insulation Diagnosis by Polarization and Depolarization Current Analysis," presented at the 48. internationales wissenschaftliches kolloquium technische universität Ilmenau, Germany, 2003.
- [26] T. K. Saha, P. Purkait, and Z. T. Yao. (01 juin 2011). *Condition monitoring of transformer insulation by polarisation and depolarisation current measurements*. Available: <http://itee.uq.edu.au/~aupec/aupec02/Final-Papers/TK-Saha1.pdf>
- [27] Z. T. YAO and T. K. SAHA, "Separation of ageing and moisture impacts on transformer insulation degradation by polarisation measurements," presented at the CIGR  , Paris, France, 2002.
- [28] B. Noirhomme, E. David, H. Garbi, M. C. Lessard, and R. Boissonneault, "Application of dielectric response techniques for the condition assessment of power transformers," in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005. CEIDP '05. 2005 Annual Report Conference on*, 2005, pp. 273-276.
- [29] A. A. Shayegani, H. Mohseni, H. Borsi, and E. Gockenbach, "Diagnostics of Power Transformers with Dielectric Response Measurements," presented at the 20th International Power System Conference, IRAN, 2005.
- [30] O. Hassan, A. A. Shyegani, H. Borsi, E. Gockenbach, E. M. Abu-Elzahab, and M. I. Gilany, "Detection of oil-pressboard insulation aging with dielectric spectroscopy in time and frequency domain measurements," in *Solid Dielectrics, 2004. ICSD 2004. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on*, 2004, pp. 665-668 Vol.2.
- [31] D.Linhjell, U.Gafvert, and L. E.Lundgaard, "Dielectric response of oil-impregnated paper insulation: variation with humidity and ageing level " in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2004, pp. 262-266.
- [32] D. Linhjell, L. Lundgaard, and U. G  fvert, "Dielectric Response of Mineral Oil Impregnated Cellulose and the Impact of Aging," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 14 pp. 156 - 169, 2007.
- [33] H. GHARBI, "UTILISATION DE LA RÉPONSE DIÉLECTRIQUE POUR LE DIAGNOSTIC DES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE," Master, ETS de Montréal., Montréal, 2006.
- [34] H. Provencher, B. Noirhomme, and E. David, "Effect of aging on the dielectric properties of insulation paper of power transformers," in *Electrical Insulation Conference, 2009. EIC 2009. IEEE*, 2009, pp. 473-477.
- [35] B. V. HAMON, "An approximate method for deducing dielectric loss factor from diirect-current measurements," *The Proceedings of THE INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS* vol. 99, pp. 151-155, 1952.

- [36] A.A.Shayegani, H.Borsi, E.Gockenbach, and H.Mohseni, "Transformation of time domain spectroscopy data to frequency domain data for impregnated pressboard " in *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP 2004*, pp. 162-165.
- [37] A. A. Shayegani, E. Gockenbach, H. Borsi, and H. Mohseni, "Investigation on the transformation of time domain spectroscopy data to frequency domain data for impregnated pressboard to reduce measurement time," *Electrical Engineering*, vol. 94, 2005.
- [38] K. C. Kao, *Dielectric phenomena in solids*: Elsevier academic press, 2004.
- [39] T.K.Saha, P.Purkait, and F.Muller, "An Attempt to Correlate Time & Frequency Domain Polarisation Measurements for the Insulation Diagnosis of Power Transformer," presented at the Power Engineering Society General Meeting 2004 IEEE, Denver Colorado, 2004.
- [40] ASTM, "D 1533 – 00 Standard Test Method for Water in Insulating Liquids by Coulometric Karl Fischer Titration," in *Electrical insulation and electronics*, ed, 2004.
- [41] Metrohm. (08/07/2012). *Titreurs Karl Fischer*. Available: <http://produits.metrohm.com/titrage/cat-titreur-karl-fischer.aspx?ctgyName=pgTitration-Karl-Fischer>
- [42] ASTM, "D 150 – 98 Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation," in *Electrical insulation and electronics*, ed, 2004.
- [43] ASTM, "D4243-99 Standard Test Method for Measurement of Average Vescometric Degree of Polymerization of New and Aged Electrical Papers and Boards " in *Electrical insulation and electronics*, ed, 2004.
- [44] A. TILMATINE. (03-06-2012). *Materiaux dielectriques 1*. . Available: www.univ-sba.dz/fsi/downloads/ETL437-Chapitre_7.pdf
- [45] F. Meghnefi, "Étude temporelle et fréquentielle du courant de fuite des isolateurs de poste recouverts de glace en vue du développement d'un système de surveillance et de prédiction en temps réel du contournement électrique," PhD, DSA, UQAC, 2007.
- [46] A. T. Inc. (2002, 08/08/2012). *Introduction aux réseaux de neurones: considérations actuarielles*. Available: <http://www.apstat.com/documents/nnet.pdf>

- [47] T.K.Saha, P. Purkait, and F. Muller, "An Attempt to Correlate Time and Frequency Domain Polarisation Measurements for the Insulation Diagnosis of Power Transformer," presented at the Power Engineering Society General Meeting 2004.
- [48] I. Fofana, H. Hemmatjou, F. Meghnefi, M. Farzaneh, A. Setayeshmehr, H. Borsi, and E. Gockenbach, "On the Frequency Domain Dielectric Response of Oil-paper Insulation at Low Temperatures," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, pp. 805-813, June 2010 2010.
- [49] Lagarias, J.C., J. A. Reeds, M. H. Wright, and P. E. Wright, "Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions," *SIAM Journal of Optimization*, vol. 9 Number 1, pp. 112-147, 1998.