

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
M. Ing

PAR
PROVENCHER, Hélène

ANALYSE DE LA RÉPONSE DIÉLECTRIQUE DU COMPLEXE PAPIER-HUILE DANS
LES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

MONTREAL, LE 16 SEPTEMBRE 2008

© Hélène Provencher, 2008

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Éric David, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Bernard Noirhomme, codirecteur de mémoire
Département d'expertise des équipements électriques à l'Institut de
recherche d'Hydro-Québec

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

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

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY

LE 4 SEPTEMBRE 2008

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier sincèrement les personnes qui ont participé à ce projet et qui ont permis la réalisation de ce mémoire. Principalement M. Éric David, professeur et directeur de mémoire à l'École de Technologie Supérieure pour sa très grande disponibilité, sa compréhension, son support financier ainsi que son expertise dans le cadre de ce projet. M. Bernard Noirhomme, chercheur et co-directeur de mémoire à l'Institut de Recherche d'Hydro-Québec pour sa grande disponibilité et son expertise sur les transformateurs ainsi que son soutien moral pour la rédaction de ce mémoire.

M. Hubert Mercure, Chef de la section Expertise Équipements électriques de l'Institut de Recherche d'Hydro-Québec qui a permis l'accès aux équipements, aux locaux ainsi qu'à une assistance technique de l'Institut malgré la cessation du projet.

Je tiens à remercier les techniciens du département de génie mécanique de L'É.T.S. qui m'ont supportée dans mes demandes incessantes spécialement MM. Patrick Sheridan, Michel Drouin, Alain Grimard, Patrick Drouin, Jean-Guy Gagnon et Radu Romanica. J'aimerais aussi remercier M. Yves Robitaille, du département de génie électrique pour sa disponibilité.

Les techniciens de l'Institut de recherche d'Hydro-Québec, malgré un emploi du temps chargé qui ont contribué à compléter cette étude particulièrement Mme Brigitte Morin, MM. Martin Dontigny, Louis Richard et Mme Patricia Cayer.

Finalement, j'aimerais remercier l'Institut de recherche d'Hydro-Québec pour le soutien financier durant de ce projet.

ANALYSE DE LA RÉPONSE DIÉLECTRIQUE DU COMPLEXE PAPIER-HUILE DANS LES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

PROVENCHER, Hélène

RÉSUMÉ

Le vieillissement de l'équipements haute tension utilisés dans les réseaux électriques est étudié afin de minimiser les risques de défaillances et afin de gérer le renouvellement des appareils. La majorité des transformateurs de puissance ont été construits dans les années 60 et 70 et atteignent leur fin de vie utile. Ils devraient être remplacés dans les prochaines années.

La durée de vie des transformateurs de puissance est reliée à la durée de vie de l'isolation solide, soit le papier des enroulements. Des méthodes de diagnostics non-intrusives de l'état de l'isolation ont été développées depuis quelques décennies dont celles des mesures diélectriques. En effet, les études ont démontrées que les mesures diélectriques sont sensibles à l'humidité, à la température et au vieillissement de l'isolation papier/huile des transformateurs de puissance.

Un programme de recherche visant à évaluer le vieillissement du papier d'isolation a démarré à l'IREQ en 2002. Cette étude s'est inscrite dans ce programme en utilisant les transformateurs maquettes développés dans le cadre du projet *Complexe papier-huile* et des échantillons d'enroulement.

L'objectif principal de cette étude était de séparer le vieillissement du papier des autres contributions à la mesure : l'humidité et le vieillissement de l'huile. Les mesures sur l'isolation papier/huile des maquettes de transformateurs ont démontré que l'humidité pouvait être séparée du vieillissement pour des taux d'humidité de l'isolation papier inférieurs à 2.25%. Les mesures sur les échantillons d'enroulement ont permis de compléter cette étude en permettant de séparer l'effet du vieillissement de l'huile de celui du papier. Ces 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.

Mots clés: cellulose, papier, vieillissement température, géométrie, humidité, transformateur, réponse diélectrique, huile.

ANALYSE DE LA RÉPONSE DIÉLECTRIQUE DU COMPLEXE PAPIER-HUILE DANS LES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

PROVENCHER, Hélène

ABSTRACT

The aging of high voltage equipments used in electrical networks is being studied in order to minimize the risk of damage and to manage replacement of outdated equipment. Power transformers have been built, for the majority, in the 60s and 70s and are at the end of their useful life. They will need to be replaced in the coming years.

Life span of high power transformers is dependent on the life span of their solid insulation, internal windings paper. Non-destructive testing methods of the insulation have been developed in recent years including the dielectric measurement method. Studies have shown that dielectric measurements are function of humidity, temperature and the degree of aging of the transformers paper/oil insulation.

A research program to evaluate the aging processes of transformer insulation paper has started at IREQ in 2002. The dielectric testing method of the insulation was included in the program using model transformers developed in the *Oil/paper Insulation* project. The study also included measurements on laboratory winding samples.

The main objective of this study is to separate the contribution of the aging of the paper from the contributions of others factors such as humidity and oil aging. The oil/paper insulation measurements of the model transformers demonstrated that humidity can be isolated from aging in the presence of low percentage of humidity in the paper. The measurements of winding samples completed the study by separating the oil aging effects from the paper aging effects. The measurements showed that there is no correlation between dielectric measurements and the degree of polymerisation, which is depending on the degree of aging of the paper. The measurement variations were due to the oil aging.

Keywords: cellulose, paper, aging, temperature, geometry, humidity, transformer, dielectric response, oil.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	20
CHAPITRE 1 ISOLATION PAPIER-HUILE.....	22
1.1 Introduction.....	22
1.2 Caractérisation des matériaux isolants.....	22
1.2.1 Rigidité diélectrique.....	22
1.2.2 Permittivité diélectrique.....	23
1.2.3 La susceptibilité électrique	24
1.2.4 Tangente delta ou facteur de dissipation.....	24
1.3 Description de l'isolation des transformateurs de puissance	25
1.3.1 Description du papier.....	26
1.3.2 Propriétés diélectriques du papier non-imprégné	29
1.3.3 L'huile minérale.....	29
1.4 Mesure du système d'isolation papier/huile	32
1.5 Conclusion	32
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	34
2.1 Introduction.....	34
2.2 Effet du vieillissement	34
2.2.1 Mesure de la tension de retour (RVM) dans le domaine du temps.....	35
2.2.2 Courants de polarisation et dépolarisation (PDC) dans le domaine du temps.....	37
2.2.3 Spectroscopie dans le domaine des fréquences	39
2.3 Effet de la température.....	42
2.3.1 Conclusion (Température)	44
2.4 Conclusion	44
CHAPITRE 3 THÉORIE.....	46
3.1 Introduction.....	46
3.2 Le phénomène de la polarisation	46
3.2.1 Polarisation et mécanisme de relaxation.....	47
3.2.2 Représentation mathématique de la polarisation	49
3.2.3 Fonction de réponse d'un diélectrique dans le domaine du temps	50
3.2.4 Fonction de réponse d'un diélectrique dans le domaine des fréquences	54
CHAPITRE 4 MESURES DIÉLECTRIQUES	59
4.1 Introduction.....	59
4.1.1 Mesure des courants de polarisation et dépolarisation (PDC).....	59
4.1.2 Mesure de la tension de retour (RVM)	60
4.1.3 Mesures dans le domaine des fréquences	62
4.1.4 Appareils de mesure commerciaux utilisés.....	63
4.2 Effet de la géométrie de l'isolation sur la réponse du diélectrique.....	67

4.3	Effet de l'humidité sur la réponse du diélectrique	70
4.3.1	Mesure du taux d'humidité dans le papier et dans l'huile	70
4.3.2	Temps de diffusion de l'humidité entre le papier et l'huile.....	72
4.3.3	Influence de l'humidité sur les mesures diélectriques	74
4.3.4	Conclusion	75
4.4	Effet de la température sur la réponse du diélectrique.....	76
4.4.1	Introduction.....	76
4.4.2	Théorie	76
CHAPITRE 5 MAQUETTES DES TRANSFORMATEURS		79
5.1	Introduction.....	79
5.2	Description des maquettes	80
5.3	Processus de vieillissement.....	82
5.4	Mesures	84
5.4.1	Caractérisation de l'huile	84
5.4.2	Mesure du degré de polymérisation du papier	85
5.4.3	Mesures diélectriques.....	85
5.5	Présentation des résultats et discussion.....	85
5.5.1	Corrélation entre le DP et la tangente delta	86
5.5.2	Corrélation avec le facteur de puissance de l'huile et la tangente delta	91
5.5.3	Conclusion	95
5.6	Modélisation	96
5.6.1	Équation de la permittivité du système papier/huile d'un transformateur	97
5.6.2	Équation de la permittivité du papier	97
5.6.3	Équation de la modélisation de l'huile.....	100
5.6.4	Modélisation de la capacité du transformateur	101
5.6.5	Résultats et discussion	103
5.6.6	Conclusion	107
5.7	Effet de la température sur la réponse du diélectrique.....	107
5.7.1	Déplacement de la courbe en température vers une courbe maîtresse.....	108
5.7.2	Graphique d'Arrhenius	115
5.7.3	Conclusion	122
5.8	Conclusion	122
CHAPITRE 6 ÉCHANTILLONS D'ENROULEMENT		124
6.1	Introduction.....	124
6.2	Description des échantillons des enroulements	125
6.3	Description du montage	126
6.4	Procédure d'expérimentation	128
6.5	Conditionnement des échantillons	131
6.6	Reproductibilité des mesures	133
6.7	Premier volet de l'expérimentation : Échantillons vieillis sans imprégnation	135
6.7.1	Mesures.....	135
6.7.2	Présentation des résultats et discussion.....	136
6.7.3	Conclusion	142

6.8	Deuxième volet de l'expérimentation : Échantillons vieillis avec imprégnation	143
6.8.1	Mesure.....	143
6.8.2	Présentation des résultats et discussion.....	145
6.9	Conclusion	147
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	149
	RECOMMANDATIONS	151
	ANNEXE I ORGANIGRAMME DE L'EXPÉRIMENTATION	154
	BIBLIOGRAPHIE.....	156

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Permittivité relative de quelques matériaux.....	23
Tableau 1.2 Propriétés diélectriques du papier	29
Tableau 1.3 Liste des gaz dissous	31
Tableau 1.4 Propriétés diélectriques de l'huile minérale.....	31
Tableau 4.1 Comparaison du temps de diffusion de l'humidité entre le carton imprégné d'huile et le carton non-imprégné. Pour un carton d'un mm d'épaisseur et une variation de 0.5% d'humidité.....	73
Tableau 5.1 Dimensions de la partie magnétique des maquettes.....	82
Tableau 5.2 Conditions initiales des cuves	83
Tableau 5.3 Caractérisation de l'huile	84
Tableau 5.4 Écarts des mesures de la tangente delta et des mesures de DP	105
Tableau 5.5 Conditions de test pour les mesures en température des groupes de cuves 1 et 3.....	108
Tableau 5.6 Déplacement en fréquence des cuves des groupes 1 et 3 Pour les mesures prises avec l'appareil IDA 200	114
Tableau 5.7 Déplacement en fréquence des cuves des groupes 1 et 3 Pour les mesures prises avec l'appareil PDC Analyser	114
Tableau 5.8 Déplacement en fréquence des cuves des groupes 1 et 3 Pour les mesures prises avec l'appareil ITERG.....	115
Tableau 5.9 Paramètres b_0 et b_1 de la droite de régression du déplacement en fréquence en fonction de $1000/\text{Température}$ pour l'ensemble des mesures ..	117
Tableau 5.10 Énergie d'activation pour l'ensemble des mesures.....	120
Tableau 6.1 Dimensions d'un échantillon de papier sur cavalier	126
Tableau 6.2 Tableau des conditions avant et après vieillissement des échantillons de papier, 1 ^{er} volet de l'expérimentation	130
Tableau 6.3 Tableau des conditions avant et après vieillissement des échantillons papier, 2 ^{ème} volet de l'expérimentation.....	131

Tableau 6.4	Tableau du calcul d'erreur de la $\tan \delta$ à 0.003Hz pour la reproductibilité des mesures	134
Tableau 6.5	Caractéristiques de la mesure en fréquence	135
Tableau 6.6	Écarts entre les valeurs de la $\tan \delta$ à 0.003Hz entre les échantillons imprégnés d'huile neuve et d'huile vieillie.....	141
Tableau 6.7	Caractéristiques de la mesure en fréquence	144
Tableau 6.8	Temps de vieillissement des échantillons	144

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 <i>Enroulement utilisé dans une maquette de transformateur.</i>	26
Figure 1.2 <i>Papier Kraft (à gauche), molécule de glucose du papier (à droite).</i>	27
Figure 1.3 <i>Dégradation du papier.</i>	28
Figure 3.1 <i>Influence des différents types de polarisation sur la permittivité réelle ϵ' (en haut) et la permittivité imaginaire ϵ'' (en bas).</i>	48
Figure 3.2 <i>Principe de la polarisation en fonction du temps.</i>	51
Figure 3.3 <i>Diagramme de Fresnel pour un condensateur contenant un diélectrique imparfait.</i>	57
Figure 4.1 <i>Principe de la mesure des courants de polarisation et dépolarisation.</i>	60
Figure 4.2 <i>Principe de la mesure de la tension de retour.</i>	61
Figure 4.3 <i>Courbe de la tension de retour.</i>	61
Figure 4.4 <i>Mesure de l'impédance d'un système d'isolation par l'appareil IDA 200.</i>	63
Figure 4.5 <i>Connexion du IDA 200 d'un transformateur à deux enroulements avec une mesure entre les enroulements haute et basse tension.</i>	64
Figure 4.6 <i>Schéma de connexion d'une mesure UST avec garde.</i>	65
Figure 4.7 <i>Principe de la mesure d'un diélectrique par l'appareil Keithley 237.</i>	66
Figure 4.8 <i>Section de l'isolation papier/huile entre les enroulements haute et basse tension.</i>	67
Figure 4.9 <i>Modèle XY de l'isolation des transformateurs.</i>	68
Figure 4.10 <i>Influence des paramètres géométriques X et Y sur la tangente delta d'un transformateur de puissance avec le rapport X/Y = 10/10, 10/50, 50/50 et 50/10.</i>	69
Figure 4.11 <i>Courbes d'Oommen de l'équilibre de l'humidité entre le papier et l'huile.</i>	71
Figure 4.12 <i>Courbes d'Oommen de l'équilibre de l'humidité entre le papier et l'air.</i>	72

Figure 4.13	<i>Courant de polarisation de l'isolation d'une maquette de transformateur à 1.2% d'humidité. (les chiffres représentent le nombre d'heures de vieillissement).</i>	74
Figure 4.14	<i>Courant de polarisation de l'isolation de maquettes de transformateur à un taux d'humidité de 3.48%.</i>	75
Figure 5.1	<i>Photo des maquettes.</i>	81
Figure 5.2	<i>Variation typique des pertes en fonction de la fréquence pour une cuve sèche durant le vieillissement.</i>	86
Figure 5.3	<i>Corrélation entre le DP et la $\tan \delta$ à 0.01 Hz pour les cuves sèches des groupes 1, 2 et 4.</i>	87
Figure 5.4	<i>Corrélation entre le DP et la $\tan \delta$ à 0.003 Hz pour les cuves sèches des groupes 1, 2 et 4.</i>	87
Figure 5.5	<i>Variation des pertes en fonction de la fréquence pour une cuve humide, à différentes étapes du vieillissement.</i>	88
Figure 5.6	<i>Variation des pertes en fonction de la fréquence pour une cuve contenant de l'huile Luminol Tri à différentes étapes du vieillissement.</i>	89
Figure 5.7	<i>Variation du courant de polarisation en fonction du temps pour une cuve sèche.</i>	90
Figure 5.8	<i>Graphique du DP en fonction du courant de polarisation pour les cuves des groupes 1 et 4</i>	90
Figure 5.9	<i>Graphique du DP en fonction du courant de polarisation pour les cuves sèches des groupes 1 et 4.</i>	91
Figure 5.10	<i>Facteur de puissance de l'huile en fonction du DP du papier.</i>	92
Figure 5.11	<i>Graphique du FP en fonction de la $\tan \delta$ pour les cuves des groupes 1, 2 et 4 à 0.1 Hz.</i>	93
Figure 5.12	<i>Graphique du FP en fonction de la $\tan \delta$ pour les cuves sèches des groupes 1, 2 et 4 à 0.1 Hz.</i>	93
Figure 5.13	<i>FP en fonction du courant de charge à 5000 secondes pour les cuves des groupes 1 et 4.</i>	94
Figure 5.14	<i>FP en fonction du courant de charge à 5000 secondes pour les cuves sèches des groupes 1 et 4.</i>	95

Figure 5.15	<i>Modélisation de la permittivité réelle ϵ' d'un échantillon papier.</i>	99
Figure 5.16	<i>Modélisation de la permittivité imaginaire ϵ'' sans l'utilisation du terme $ja_{p2}(\omega)^{n_{p2}}$.</i>	99
Figure 5.17	<i>Modélisation de la permittivité imaginaire ϵ'' avec l'ajout du terme $ja_{p2}(\omega)^{n_{p2}}$.</i>	100
Figure 5.18	<i>Tangente delta mesurée pour les cuves 1 à 12, pour un DP de 750.</i>	104
Figure 5.19	<i>Modélisation de la tangente delta du papier pour les cuves 1 à 12, avec un DP de 750.</i>	105
Figure 5.20	<i>Comparaison de la tangente delta des cuves pour des DP de 450, 750 et 1000.</i>	106
Figure 5.21	<i>Comparaison de la modélisation de la tangente delta du papier imprégné pour des DP de 450, 750 et 1000.</i>	106
Figure 5.22	<i>Déplacement horizontal par interpolation d'une courbe en température.</i>	109
Figure 5.23	<i>Déplacement en fréquence d'une courbe à 50°C vers la courbe maîtresse à 25°C.</i>	110
Figure 5.24	<i>Courbes de la tangente delta prises à différentes températures pour la cuve 9.</i>	111
Figure 5.25	<i>Normalisation à la courbe maîtresse à 25°C pour les mesures de la Figure 5.24.</i>	112
Figure 5.26	<i>Courbes des courants de polarisation convertis dans le domaine des fréquences à différentes températures pour la cuve 9.</i>	112
Figure 5.27	<i>Normalisation à la courbes maîtresse à 25°C pour les mesures de la Figure 5.26.</i>	113
Figure 5.28	<i>Normalisation sur une courbe maîtresse à 20°C pour la cuve 13.</i>	113
Figure 5.29	<i>Déplacement en fonction de 1000/Température la cuve 9, mesure prises avec l'appareil IDA 200.</i>	116
Figure 5.30	<i>Normalisation des courbes en température à 25°C à l'aide de la modélisation pour les courbes de la Figure 5.24.</i>	118

Figure 5.31	<i>Erreur absolue mesurée entre la courbe maîtresse et chaque courbe normalisée en fonction de la fréquence pour la modélisation des courbes de la Figure 5.30.</i>	119
Figure 5.32	<i>Normalisation des courbes en température à 25°C à l'aide de la modélisation pour les courbes de la Figure 5.26.</i>	119
Figure 5.33	<i>Erreur absolue mesurée entre la courbe maîtresse et chaque courbe normalisée en fonction de la fréquence pour la modélisation des courbes de la Figure 5.32.</i>	120
Figure 5.34	<i>Graphique d'Arrhenius des cuves 1, 7, 8, 15 et 26.</i>	121
Figure 6.1	<i>Échantillon sur cavalier de papier non-imprégné avec électrodes de cuivre.</i>	125
Figure 6.2	<i>Intérieur de la boîte à gants.</i>	127
Figure 6.3	<i>Système de contrôle de l'humidité de la boîte à gants.</i>	128
Figure 6.4	<i>Conditionnement des échantillons non-imprégnés.</i>	132
Figure 6.5	<i>Conditionnement d'un échantillon d'huile Luminol à 600DP après vieillissement.</i>	133
Figure 6.6	<i>Reproductibilité des mesures sur cinq échantillons imprégnés d'huile neuve à 500 DP.</i>	134
Figure 6.7	<i>Échantillons imprégnés d'huile neuve, mesures après vieillissement.</i>	136
Figure 6.8	<i>Échantillons imprégnés d'huile neuve, mesures à l'équilibre.</i>	138
Figure 6.9	<i>Échantillons imprégnés d'huile vieillie, mesures après vieillissement.</i>	139
Figure 6.10	<i>Échantillons imprégnés d'huile neuve et d'huile vieillie.</i>	140
Figure 6.11	<i>Comparaison des échantillons imprégnés d'huile neuve et vieillie.</i>	141
Figure 6.12	<i>Échantillons de papier imprégnés d'huile Nitro 10CX.</i>	145
Figure 6.13	<i>Échantillons de papier imprégnés d'huile Luminol Tri.</i>	146
Figure 6.14	<i>Comparaison entre les échantillons imprégnés d'huile Luminol et Nitro 10CX.</i>	147

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Carbone
DBPC	Di-tert-butyl-2, 6 para-crésol
DP	Degré de Polymérisation
ÉTS	École de Technologies Supérieures
FDS	Frequency Domain Spectroscopy
FP	Facteur de Puissance
GST	Grounded Specimen Test
H	Hydrogène
H ₂ O	Eau
IDA	Insulation Diagnostics Analyser
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IREQ	Institut de Recherche d'Hydro-Québec
LFD	Low Frequency Dispersion
K	Potassium
N	Azote
O	Oxygène
PDC	Polarization and Depolarization Currents
RVM	Return Voltage Measurements
UST	Ungrounded Specimen Test

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Unités de mesure

m	mètre
cm	centimètre
mm	millimètre
μm	micro mètre
g	gramme
mg	milligramme
μg	micro gramme
°	degré
C	Celsius
K	Kelvin
s	seconde
eV	électron Volt
J	joule
kVA	kilo Volt Ampère
kV	kilo Volt
V	Volt
V/m	Volt par mètre
kV/mm	kilo Volt par millimètre
kV/cm	kilo Volt par centimètre
A	Ampère
A/m	Ampère par mètre
A/m^2	Ampère par mètre carré
C/m^2	Coulomb par mètre carré
Hz	Hertz
kHz	kilo Hertz
MHz	méga Hertz
F	Farad
F/m	Farad par mètre
S/m	Siemens par mètre
$\Omega^{-1}\text{cm}$	centimètre par Ohm
dynes/cm	dynes par centimètre
ppm	partie par million
mg KOH/g	milligramme d'hydroxyde de potassium par gramme
m^2/s	mètre carré par seconde
mN/m	milli Newton par mètre

Symboles

A	constante
A	surface (m^2)
C	capacité (F)
C_0	capacité d'un condensateur à vide (F)
$C(\omega)$	capacité en fonction de la fréquence (F)
$C'(\omega)$	capacité réelle en fonction de la fréquence (F)
$C''(\omega)$	capacité imaginaire en fonction de la fréquence (F)
C_{HL}	capacité de l'isolation papier/huile entre les enroulements haute et basse tension (F)
C_H	capacité de l'isolation entre l'enroulement haute tension et la cuve (F)
C_L	capacité de l'isolation entre l'enroulement basse tension et cuve (F)
C_{xfo}	capacité de l'isolation d'un transformateur (F)
C_{60Hz}	capacité à la fréquence réseau de l'isolation d'un transformateur (F)
D	coefficient de diffusion (m^2/s)
D	induction diélectrique (C/m^2)
$D(t)$	induction diélectrique en fonction du temps (C/m^2)
E	champ électrique (V/m)
E_a	énergie d'activation (J/mol)
E_o	champ électrique de type échelon (V/m)
$E(t)$	champ électrique en fonction du temps (V/m)
$E(\omega)$	champ électrique en fonction de la fréquence
$I(t)$	courant en fonction du temps (A)
I_C	composante imaginaire du courant (A)
$I_c(t)$	courant de charge (A)
$I_d(t)$	courant de décharge (A)
$I_{dépol}(t)$	courant de dépolarisation (A)
$I_{pol}(t)$	courant de polarisation (A)
I_R	composante réel du courant (A)
$I(\omega)$	courant dans le domaine des fréquences (A)
$J(t)$	densité du courant en fonction du temps (A/m^2)
$J(\omega)$	densité du courant en fonction de la fréquence (A/m^2)
H	champ magnétique (A/m)
M	aimantation (A/m)
P	polarisation (C/m^2)
$P(t)$	polarisation en fonction du temps (C/m^2)
$P(\omega)$	polarisation en fonction de la fréquence (C/m^2)

R	constante des gaz (8.314 J/(K* mol))
S_r	pende initiale de la mesure RVM
T	période (seconde)
T	température en Kelvin
U_{max}	tension maximale de la mesure RVM
U_o	tension échelon (V)
$U(t)$	tension en fonction du temps (V)
$U(\omega)$	tension dans le domaine des fréquences (V)
X	proportion de la barrière de l'isolation d'un transformateur
Y	proportion des canaux d'espacement de l'isolation d'un transformateur
Z	impédance (Ω)
a_T	déplacement en fréquence (Hz)
a_{p1}	variable reliée à la formule de la permittivité du papier (sans dimension)
a_{p2}	variable reliée à la formule de la permittivité du papier (sans dimension)
a_h	variable reliée à la formule de la permittivité de l'huile (sans dimension)
b_o	coordonnée à l'origine de la droite de régression
b_1	pende de la droite de régression
d	déplacement (Hz)
d	épaisseur du papier (m)
d	distance inter-électrode (m)
δ	angle de pertes (rad)
$\delta(t)$	fonction delta de Dirac (sans dimension)
ϵ_o	permittivité du vide ($8,854e^{-12}$ (F/m))
ϵ	permittivité absolue (F/m)
ϵ_r	permittivité relative ou constante diélectrique (sans dimension)
ϵ_∞	permittivité relative à fréquence élevée (sans dimension)
ϵ'	partie réelle de la permittivité (sans dimension)
$\epsilon''(\omega)$	partie imaginaire de la permittivité dans le domaine de la fréquence (sans dimension)
$\epsilon''(\omega)$	partie réelle de la permittivité dans le domaine de la fréquence (sans dimension)
$\epsilon_{\text{barrière}}$	permittivité de la barrière de l'isolation d'un transformateur (sans dimension)
$\epsilon_{\text{espacement}}$	permittivité des canaux d'espacement de l'isolation d'un transformateur (sans dimension)
ϵ_{huile}	permittivité de l'huile (sans dimension)
ϵ_{papier}	permittivité du papier (sans dimension)
ϵ_{xfo}	permittivité de l'isolation d'un transformateur (sans dimension)
f	fréquence (Hz)

$f(\tau)$	fonction de réponse d'un diélectrique
$f_s(\tau)$	fonction de réponse des phénomènes lents d'un diélectrique
$f(\omega)$	transformée de Fourier de $f(t)$
n_h	exposant reliée à l'expression de la permittivité de l'huile
n_{p1}	exposant reliée à l'expression de la permittivité du papier
n_{p2}	exposant reliée à l'expression de la permittivité du papier
π	pi (3.1416 sans dimension)
%	pourcentage
σ	conductivité (S/m)
σ_h	conductivité de l'huile (S/m)
σ_p	conductivité du papier (S/m)
t	temps (s)
t_c	temps de charge (s)
t_d	temps de décharge (s)
$t_{\text{dépol}}$	temps de dépolarisation (s)
t_{pol}	temps de polarisation (s)
τ	temps nécessaire à atteindre l'équilibre en humidité (s)
τ	constante de temps du pic de relaxation
t_{pak}	constante de temps centrale de la mesure RVM (s)
θ	angle de phase (rad)
γ	exposant (sans dimension)
ω	fréquence angulaire (rad/s)
ω_p	constante de temps du pic de relaxation
χ_e	susceptibilité électrique (sans dimension)
χ_m	susceptibilité magnétique (sans dimension)
χ_∞	susceptibilité électrique relié aux phénomènes rapides (sans dimension)
$\chi(\omega)$	susceptibilité dans le domaine des fréquences (sans dimension)
$\chi'(\omega)$	partie réelle de la susceptibilité dans le domaine des fréquences (sans dimension)
$\chi''(\omega)$	partie imaginaire de la susceptibilité dans le domaine des fréquences (sans dimension)

INTRODUCTION

Les techniques d'évaluation de l'état et de la durée de vie des systèmes d'isolation des appareils haute tension des réseaux électriques font continuellement l'objet d'études scientifiques. Ceci dans le but de prévenir les risques d'endommagement irréversible de l'isolation mais aussi afin de planifier la gestion du renouvellement de l'équipement. Les réseaux électriques modernes d'Europe et d'Amérique du Nord ont été construits dans les années 60' et le début des années 70' suite à la conception d'appareils de plus grande puissance. Plusieurs arrivent à leur fin de vie comptable et c'est particulièrement le cas des transformateurs de puissance. Il est important de connaître leur durée de vie résiduelle pour permettre aux compagnies électriques de planifier les investissements futurs.

La durée de vie des transformateurs de puissance isolés au complexe papier/huile est ultimement limitée par la durée de vie de l'isolation papier des enroulements. Le vieillissement du papier peut être évalué par une mesure en laboratoire du degré de polymérisation (DP). Cette mesure nécessite le retrait des transformateurs du réseau et le transport de ceux-ci aux ateliers de réparation. Les coûts reliés à ces évaluations sont considérables. De plus, l'extraction d'échantillons de papier est une opération très délicate et peut mener à la destruction de l'isolation.

Depuis quelques décennies, les techniques de mesures non-intrusives ont fait l'objet de plusieurs études. Afin de dégager le potentiel de ces techniques pour l'évaluation de la durée de vie de l'isolation, Hydro-Québec s'est investi dans un projet d'innovation intitulé *Complexe papier/huile*. Initialement, deux avenues ont été envisagées. L'étude de traceurs dans l'huile tels que les produits furaniques, les traceurs volatils et les traceurs provenant du vernis utilisé pour l'isolation et l'étude des mesures diélectriques sur l'isolation qui pourraient être faites à tous les sept ans lors de retrait temporaire de service. Le mandat de cette partie du projet *Complexe papier/huile* est de vérifier, en collaboration avec la communauté scientifique, la sensibilité des mesures diélectriques au vieillissement de l'isolation. Plus précisément d'étudier la fonction de réponse du complexe papier/huile dans

les domaines temporel ou fréquentiel dans le but de séparer les différentes contributions à la mesure : l'humidité du papier, le vieillissement du papier et le vieillissement de l'huile, puis de développer une méthode de détermination indirecte du vieillissement du papier.

Le projet a débuté en 2003 avec des mesures effectuées sur des modèles de transformateurs dont les résultats ont fait l'objet d'un mémoire rédigé par M. Hassan Gharbi. Les premières observations sur les mesures diélectriques démontraient une corrélation avec le vieillissement du papier (DP). De plus, pour un certain pourcentage d'humidité contenu dans le papier, il était possible de séparer l'effet du vieillissement de l'isolation papier/huile de celui de l'humidité. À partir de ces résultats, des mesures ont été complétées sur des modèles de transformateurs ainsi que sur des échantillons de papier en laboratoire afin de déterminer si la corrélation se retrouverait au niveau du papier. Ces mesures font l'objet de ce mémoire.

CHAPITRE 1

ISOLATION PAPIER-HUILE

1.1 Introduction

Il existe deux types d'application pour les matériaux diélectriques. Les diélectriques de plus grande permittivité sont utilisés dans les condensateurs puisqu'ils augmentent la capacité d'emmagasiner des charges. Les matériaux de plus faible permittivité sont utilisés comme isolants dans les appareils électriques. Pour les appareils électriques haute tension, différents matériaux isolants sont souvent combinés ensemble pour assurer une meilleure isolation, on parle alors de systèmes d'isolation. C'est le cas de plusieurs appareils à haute tension comme les câbles souterrains, les traversées et les transformateurs de puissance qui utilisent le papier combiné généralement à l'huile isolante minérale. L'huile remplit les pores du papier mais aussi les vacuoles d'air qui sont inévitablement présentes entre les couches de papier enroulé sur les fils de cuivre.

1.2 Caractérisation des matériaux isolants

Les matériaux isolants peuvent être caractérisés principalement par leur rigidité diélectrique, leur conductivité ainsi que leur réponse diélectrique quantifiée par différents paramètres comme la permittivité, la susceptibilité et le facteur de dissipation (tangente delta). Ces caractéristiques sont expliquées dans cette section.

1.2.1 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique représente la valeur maximale du champ électrique appliqué à un diélectrique avant la rupture de ce dernier par le biais d'un arc électrique. Cette valeur est mesurée en kV par mm d'épaisseur du diélectrique (kV/mm).

1.2.2 Permittivité diélectrique

La permittivité diélectrique caractérise les propriétés physiques au niveau macroscopique du milieu et représente le déplacement électrique en fonction du champ appliqué, $\varepsilon = \frac{\mathbf{D}}{\mathbf{E}}$.

Comme de façon générale les vecteurs déplacement électrique et champ électrique peuvent être représentés par des phaseurs qui ne sont pas nécessairement en phase, la permittivité, de façon générale, prend une valeur complexe. Un matériau diélectrique peut être représenté par sa permittivité absolue qui est dépendante de la permittivité du vide et de la permittivité relative du matériau selon la relation suivante :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (1.1)$$

Où

ε est la permittivité absolue (F/m)

ε_0 est la permittivité du vide égale à 8.854 e^{-12} F/m

ε_r est la permittivité relative ou constante diélectrique (sans dimension)

Les matériaux diélectriques sont souvent classés selon leur permittivité relative. Le Tableau 1.1 présente la permittivité de certains matériaux.

Tableau 1.1

Permittivité relative de quelques matériaux

Matériau	Permittivité relative ε_r
Vide	1
Air	1.0005
Papier	2
Téflon	2.1
Huile	2.2
Polyester	3.3
Verre	5
Titanate de baryum	1500

1.2.3 La susceptibilité électrique

La susceptibilité électrique, χ_e , est reliée à la permittivité relative par la relation suivante :

$$\chi_e = (\varepsilon - 1) \quad (1.2)$$

La susceptibilité électrique peut être comparée à la susceptibilité magnétique qui est la faculté d'un matériau de se magnétiser sous l'action d'un champ magnétique.

$$\mathbf{M} = \chi_m \cdot \mathbf{H} \quad (1.3)$$

Où

\mathbf{M} est l'aimantation (A/m)

χ_m est la susceptibilité magnétique (sans dimension)

\mathbf{H} est le champ magnétique appliqué (A/m)

La susceptibilité électrique caractérise la polarisation du diélectrique créée par l'application d'un champ électrique. Pour un diélectrique dit linéaire, la polarisation du matériau est proportionnelle au champ électrique appliqué sur celui-ci. On peut donc écrire :

$$\mathbf{P} = \chi_e \cdot \varepsilon_0 \mathbf{E} \quad (1.4)$$

Où

\mathbf{P} est la polarisation (C/m²)

\mathbf{E} est le champ électrique appliqué (V/m)

Physiquement, la susceptibilité représente le rapport suivant : $\frac{\text{densité de charges liées}}{\text{densité de charges libres}}$

1.2.4 Tangente delta ou facteur de dissipation

Le facteur de dissipation représente le rapport des pertes diélectriques représentées par la partie imaginaire de la permittivité sur la partie réelle de la permittivité selon l'équation 1.5. Il est souvent mesuré à la fréquence réseau, 50 ou 60 Hz, et fait souvent partie des spécifications données par les manufacturiers. La tangente delta à la fréquence réseau est

aussi fréquemment utilisée pour le diagnostic des pertes de l'isolation des transformateurs de puissance et de plusieurs autres équipements électriques (câbles, machines tournantes, etc ...). Pour les transformateurs de puissance, cette mesure se fait sur le terrain à 10 kV et est connue sous le nom d'essai Doble.

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (1.5)$$

Où

$\tan \delta$ est la tangente delta ou facteur de dissipation

ε'' est la partie imaginaire de la permittivité

ε' est la partie réelle de la permittivité

La mesure de la variation de la tangente delta en fonction de la fréquence est une façon de mesurer la réponse diélectrique d'un système d'isolation dans le domaine des fréquences. La plage de fréquence habituellement utilisée se situe entre 0.001 Hz et 1 kHz. Ce type de mesure fait l'objet de ce travail.

1.3 Description de l'isolation des transformateurs de puissance

L'isolation complète d'un transformateur de puissance est formée de papier, de carton et d'huile minérale. Le papier sert à l'isolation des enroulements et le carton, formé de plusieurs feuilles de papier, sert d'isolation entre les enroulements, et entre les enroulements et le noyau tel qu'illustré à la Figure 1.1.

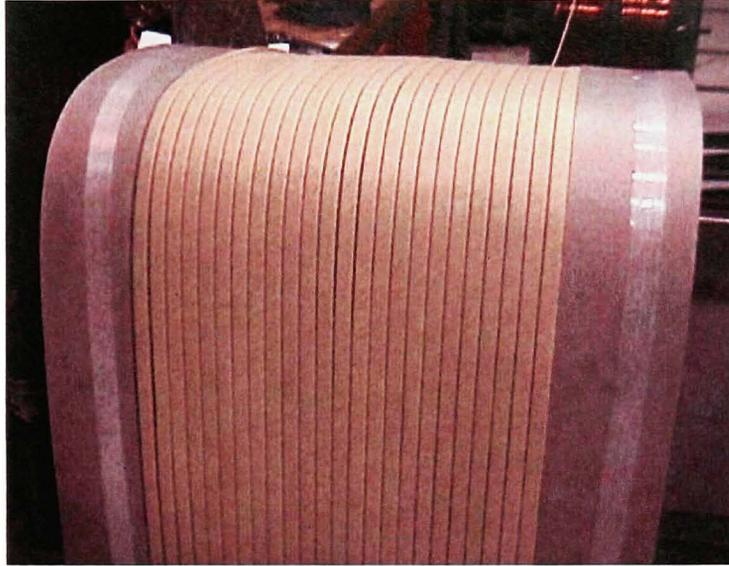


Figure 1.1 *Enroulement utilisé dans une maquette de transformateur.*

(Tirée de (Noirhomme et al., 2005))

Source : Cette photo est tirée d'une présentation Power Point de M. B. Noirhomme et al., *Projet durée de vie des transformateurs, Évaluation du complexe papier-huile*, 2005.

1.3.1 Description du papier

Le papier utilisé pour l'isolation des enroulements peut provenir de plusieurs sources naturelles comme le bois, le coton et les fibres organiques. Celui utilisé dans les transformateurs de puissance est un dérivé de la pulpe de bois de conifères ou de bois mou comme l'épinette ou le pin. La partie utile à la fabrication du papier est la fibre de cellulose dont l'unité est $C_6H_{10}O_5$. Les fibres de cellulose sont formées de monomères de glucose, liées entre elles par des liens C-O tel qu'illustré à la Figure 1.2. La longueur de ces fibres varie de 1 à 20 mm et leur diamètre de 15 à 30 μm . La longueur moyenne d'une chaîne de cellulose peut être évaluée par la mesure du degré de polymérisation (DP).

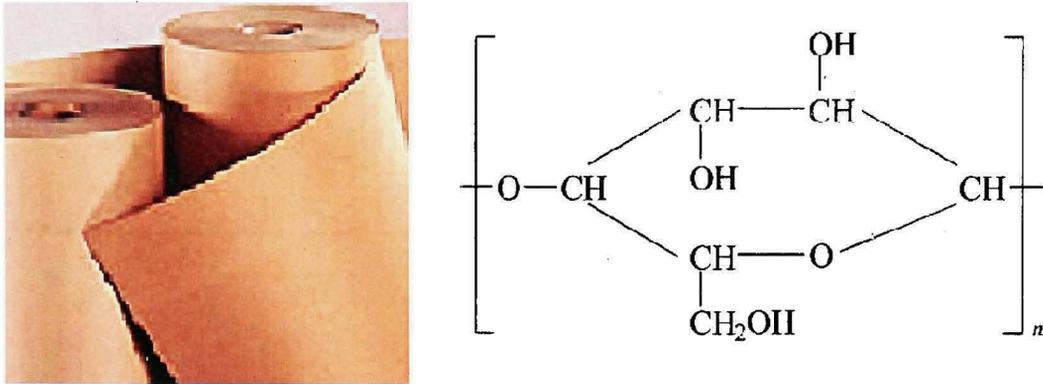


Figure 1.2 Papier Kraft (à gauche), molécule de glucose du papier (à droite).

(Tirée de (Noirhomme et al., 2005))

Source : Cette photo est tirée d'une présentation Power Point de M. B. Noirhomme et al., *Projet durée de vie des transformateurs, Évaluation du complexe papier-huile*, 2005.

Le carton possède les mêmes propriétés que le papier puisqu'il est formé à partir de celui-ci. C'est la compression mécanique de plusieurs couches de papier qui forme le carton. Le papier possède une épaisseur entre 0.05 à 0.08 mm tandis que le carton peut être d'une épaisseur de quelques millimètres.

1.3.1.1 Dégradation du papier

La résistance du papier à la rupture mécanique est directement reliée à la longueur des chaînes de cellulose qui forment le papier. Le vieillissement du papier a comme effet de briser les chaînes de cellulose ce qui contribue à diminuer sa résistance à la rupture. Ce phénomène est illustré à la Figure 1.3. Tel que mentionné précédemment, le degré de polymérisation (DP) exprime la quantité moyenne d'unités de cellulose par chaîne. La valeur du DP du papier lorsqu'il est neuf est d'environ 1200 alors que lorsque cette valeur atteint 200, le papier est considéré comme ayant atteint la fin de sa vie utile pour les transformateurs de puissance.

La dégradation du papier implique les mécanismes suivants:

- Hydrolyse (effet de l'eau et des acides);
- Oxydation (effet de l'oxygène);
- Pyrolyse (dépolymérisation du papier sous l'effet de la température).

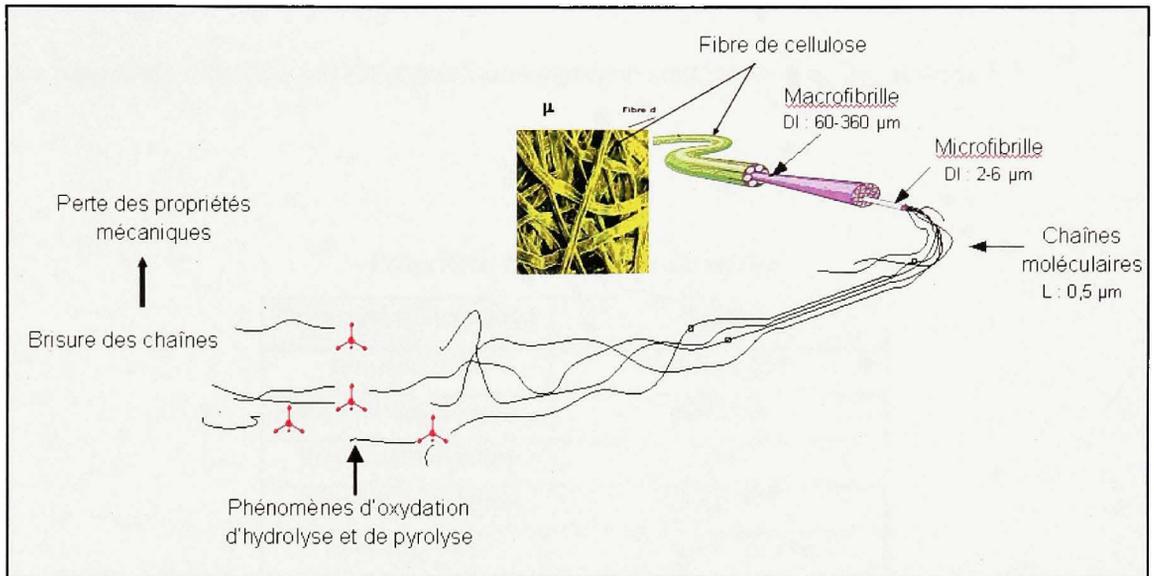


Figure 1.3 Dégradation du papier.

(Tirée de (Noirhomme et al., 2005))

Source : Cette photo est tirée d'une présentation Power Point de M. B. Noirhomme et al., *Projet durée de vie des transformateur, Évaluation du complexe papier-huile*, 2005.

1.3.1.2 Mesure de la dégradation du papier

Le degré de polymérisation du papier peut être mesuré en laboratoire par test de viscosité selon la norme ASTM D4243. Cependant, l'extraction d'un échantillon papier est une opération très coûteuse et peut être dommageable à l'isolation. C'est pourquoi cette méthode n'est presque jamais employée. Ce sont plutôt les produits de dégradation du papier dans l'huile qui sont mesurés à partir d'échantillonnages d'huile et qui servent à l'estimation du DP. En effet, la dégradation du papier génère des produits de vieillissement dans l'huile tels le CO, le CO₂, l'eau et les dérivés furaniques qui servent d'indicateur de vieillissement du

papier sans toutefois donner d'indications précises sur la valeur du DP. Jusqu'à maintenant, ce sont les produits de vieillissement du papier relâchés dans l'huile qui ont permis, de façon approximative, de déterminer le DP du papier.

1.3.2 Propriétés diélectriques du papier non-imprégné

Les propriétés diélectriques du papier non-imprégné sont présentées au Tableau 1.2.

Tableau 1.2

Propriétés diélectriques du papier

Propriété diélectrique	Valeur
Tangente delta	0.003 à 0.004
Rigidité diélectrique	90kV/cm
Permittivité relative	5 à 6*
Permittivité relative	1.5 à 3.5 **
Conductivité	10^{-15} à $10^{-17} \Omega^{-1}\text{cm}$

*Mesure à 20°C à humidité ambiante

**Mesure de papier sec

1.3.3 L'huile minérale

L'huile minérale est utilisée dans les transformateurs de puissance pour sa grande rigidité diélectrique et ses propriétés de dissipation de chaleur. Les enroulements et le noyau sont immergés dans l'huile qui est contenue dans la cuve. À l'inverse du papier, l'huile peut être traitée dans le cas de présence de contaminants ou de gaz dissous. Elle peut aussi être tout simplement changée. Les caractéristiques physico-chimiques et électriques de l'huile sont mesurées selon les normes ASTM. La norme ASTM D3487 fournit un tableau des limites acceptables d'une huile avant la mise en service.

1.3.3.1 Propriétés physico-chimique de l'huile

L'état de l'huile peut être évalué selon ses caractéristiques physico-chimiques. Les principales mesures effectuées sur les échantillons d'huile de cette étude sont les suivantes :

- **L'acidité** est mesurée par la quantité d'hydroxyde de potassium en mg nécessaire pour neutraliser l'acidité dans un gramme d'huile (valeur limite : 0.03mg KOH/g). L'acidité de l'huile accélère la dégradation du papier, la corrosion du métal et augmente la conductivité électrique de l'huile.
- **La tension interfaciale** est une mesure de la force d'attraction moléculaire entre l'eau et l'huile. Plus il y a de contaminants, plus la tension interfaciale diminue. Elle est mesurée en mN/m ou en dynes/cm selon la norme ASTM, (valeur limite : 40 dynes/cm).
- **La couleur** de l'huile est un indicateur de la dégradation de l'huile. Plus la couleur est foncée et plus l'huile se dégrade. La norme ASTM représente les différentes couleurs de l'huile par des nombres (valeur limite : 0.5 unité ASTM).
- **Le DBPC** est un antioxydant ajouté à l'huile et qui doit être renouvelé afin d'éviter l'oxydation. Il est mesuré en ppm. Lorsque que la quantité de DBPC atteint 200 ppm, l'huile est régénérée (chiffre d'Hydro-Québec).
- **L'eau** contenue dans l'huile puissance et diminue ses propriétés diélectriques. L'unité de mesure de l'eau dans l'huile est le ppm (valeur limite : 35 ppm).

1.3.3.2 Les gaz dissous

Les gaz dissous dans l'huile sont formés à la suite de défaillances électriques et thermiques qui affectent la composition chimique de l'huile. Ils sont mesurés par la quantité de gaz dissous en ppm dans l'huile et sont analysés par chromatographie en phase gazeuse et diagnostiqués selon la norme IEC 60599 ou IEEE C57-104-1991. Le type de gaz dissous est un indicateur du type de défaillance survenue. Les gaz dissous mesurés dans cette étude sont présentés au Tableau 1.3.

Tableau 1.3

Liste des gaz dissous

Gaz dissous	Symbole chimique
Hydrogène	H ₂
Oxygène	O ₂
Azote	N ₂
Dioxyde de carbone	CO ₂
Acétylène	C ₂ H ₂
Éthylène	C ₂ H ₄
Éthane	C ₂ H ₆
Méthane	CH ₄

1.3.3.3 Propriétés diélectriques de l'huile

Les propriétés diélectriques de l'huile sont présentées au tableau suivant :

Tableau 1.4

Propriétés diélectriques de l'huile minérale

Propriété diélectrique	Valeur
Facteur de puissance à 100°C*	0.3 %**
Rigidité diélectrique	30 kV/mm**
Permittivité relative	2.2
Conductivité	10 ⁻¹³ à 10 ⁻¹⁸ Ω ⁻¹ cm

*Le facteur de puissance est plus souvent utilisé que la tangente delta pour représenter les pertes diélectriques de l'huile. Il est habituellement mesuré à 100°C pour les normes ASTM. Pour des valeurs faibles du facteur de puissance, ce dernier est pratiquement égal à la tangente delta

** Valeur limite ASTM (D3487)

1.4 Mesure du système d'isolation papier/huile

En plus de l'analyse des produits de dégradation du papier dans l'huile et la caractérisation de celle-ci dans le but d'évaluer l'état général du système d'isolation papier/huile, les mesures diélectriques dans les domaines du temps et des fréquences peuvent être utilisées. Les mesures diélectriques permettent de mesurer la variation de la permittivité et des pertes diélectriques qui caractérisent l'isolation sous l'influence de plusieurs paramètres tels l'humidité, la température et le vieillissement. Les études portant sur l'effet de l'humidité et de la température sont largement discutées dans la littérature et ont menées à la création d'applications utilisées par certaines compagnies. Jusqu'à présent, ces applications permettent de mesurer principalement le contenu en eau du papier et de déterminer la conductivité de l'huile.

Trois techniques de mesures diélectriques sont utilisées, deux dans le domaine du temps et une dans le domaine des fréquences. La théorie sur laquelle sont basées les mesures est expliquée en détail à la section 3.2 et les trois techniques de mesures sont expliquées à la section 3.3.

1.5 Conclusion

La combinaison papier/huile formant l'isolation des transformateurs de puissance possède des qualités isolantes plus élevées que les deux matériaux qui la composent. Le vieillissement du système d'isolation est influencé par les conditions d'utilisation et les conditions environnementales du transformateur. La température, l'humidité et l'oxydation de l'huile sont les facteurs qui détériorent le plus l'isolation. C'est cependant le vieillissement du papier qui est déterminant pour la durée de vie du transformateur. La mesure des produits de dégradation du papier dans l'huile est une méthode traditionnelle d'évaluation du DP. Mais cette méthode est approximative et d'une fiabilité limitée.

Les mesures diélectriques sont des méthodes d'évaluation non-intrusives de l'isolation du complexe papier/huile. Trois méthodes de mesure des propriétés diélectriques peuvent être utilisées : la mesure de la tension de retour (RVM), la mesure des courants de polarisation et dépolarisation (PDC) et la mesure de la tangente delta dans le domaine des fréquences. Ces trois méthodes sont reliées à la réponse diélectrique du système d'isolation. Elles font l'objet de ce travail dans le but de déterminer s'il est possible d'obtenir une valeur exacte du DP par une mesure diélectrique, et si c'est le cas, de développer une application.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Les mesures effectuées sur des matériaux diélectriques existent depuis le début du siècle dernier. Ce n'est cependant que depuis quelques décades qu'elles sont utilisées pour étudier les propriétés des matériaux isolants dans le but d'évaluer l'état de ces derniers dans les appareils haute tension. La température, l'humidité, le vieillissement et la géométrie de l'isolation sont des facteurs qui influencent la réponse du diélectrique et qui font toujours l'objet d'études.

La dépendance des mesures diélectriques à la température est aussi connue et l'on sait qu'elle suit une loi d'Arrhenius. Une partie de cette étude a tout de même été consacrée à évaluer cette dépendance dans le but de la modéliser. Finalement, c'est l'influence du vieillissement de l'isolation papier qui est la moins bien connue et qui fait l'objet de discussion. À savoir, dans un premier temps, s'il est possible de distinguer l'effet du vieillissement de celui de l'humidité et si les observations faites jusqu'à ce jour dépendent du vieillissement de l'huile ou de celui du papier.

La revue de la littérature comprend donc une compilation des études effectuées sur l'influence du vieillissement du complexe papier/huile sur les mesures RVM, PDC et FDS ainsi que les études effectuées sur l'influence de la température sur ces mêmes types de mesures. Il est suggéré au lecteur de lire les sections 4.1.1, 4.1.2 et 4.1.3 pour une meilleure compréhension des mesures diélectriques.

2.2 Effet du vieillissement

Étudier l'influence du vieillissement du papier sur les mesures diélectriques est un exercice complexe où, au fil des années de recherche les questions se sont multipliées. Afin de

comprendre le cheminement des expérimentations effectuées à ce jour, voici quelques notions liées au comportement du papier et de l'huile au vieillissement.

Lorsque des mesures sont effectuées sur un système d'isolation d'un transformateur de puissance, on étudie le complexe papier/huile. L'huile et le papier génèrent des produits polaires en vieillissant. L'influence de ces produits sur les mesures diélectriques est peu connue. Il est convenu de penser que lorsqu'on mesure le vieillissement du complexe papier/huile, ce sont les produits polaires que l'on mesure et non la longueur des chaînes de la fibre de papier (DP).

Le papier, étant un matériau plus polaire que l'huile, réagit différemment à la polarisation. De plus, les produits polaires résultant de la dégradation du papier et de l'huile se retrouvent en plus grande quantité dans celui-ci. Ceci implique que l'influence de l'huile et du papier sont visibles à des fréquences et des temps différents. Les auteurs s'entendent pour dire que l'influence du papier apparaît en basse fréquence soit près de 0.0001 Hz ou à 1000 secondes et plus (pour les mesures diélectriques ($t = \frac{0.1}{f}$)). Mais même à cette fréquence et au temps correspondant, l'influence de l'huile n'est pas bien comprise. De plus, il n'est pas clairement déterminé que les produits polaires contenus dans le papier proviennent de la dégradation de l'huile ou de celle du papier.

2.2.1 Mesure de la tension de retour (RVM) dans le domaine du temps

(Darveniza et al., 1992) étudient la corrélation entre les propriétés chimiques et électriques de l'isolation papier/huile des transformateurs de puissance. Ils utilisent la méthode RVM pour les mesures électriques selon les paramètres de la constante de temps centrale (t_{peak}), la pente initiale (S_r), et la tension de retour maximale (U_{rmax}). Ils observent que la constante de temps diminue avec le vieillissement du papier imprégné alors que la pente initiale augmente. La tension de retour maximale ne montre pas de corrélation avec le vieillissement. *Ces mesures ont été prises au début des années 90'. L'influence de l'humidité versus celui du vieillissement n'était pas encore un sujet de discussion. C'est probablement pour cette*

raison qu'aucune mesure du taux d'humidité n'a été effectuée. Cette mesure est indispensable dans le cas de l'étude du vieillissement.

(Saha et al., 1998) mesurent en laboratoire la tension de retour (U_{rmax}) sur des échantillons imprégnés d'huile. Ils observent que la pente S_r et la constante de temps centrale (t_{peak}) dépendent du vieillissement. La constante de temps diminue avec le vieillissement des échantillons alors que la pente augmente. Ils observent aussi que la tension maximale (U_{rmax}) augmente jusqu'à un certain point de vieillissement puis diminue au vieillissement maximal. *L'étude comprenait deux groupes d'échantillons, l'un vieilli à l'air et l'autre à l'azote (sans oxygène). Ceux vieillis à l'azote ne présentent aucune variation des paramètres de la mesure RVM. Puisque le vieillissement est représenté en nombres d'heures et non en fonction du degré de polymérisation (DP) du papier, il est difficile de comparer les résultats.*

(Hassan et al., 2003) étudient l'influence de la température, de l'humidité et du vieillissement sur les mesures RVM d'échantillons de papier imprégnés. Ils observent les mêmes variations des paramètres que les études précédentes en ajoutant toutefois que l'humidité et la température ont un effet semblable à celui du vieillissement sur la constante de temps centrale (t_{peak}), soit la diminution de celle-ci avec l'augmentation du taux d'humidité et de la température. Puisque l'augmentation de la température diminue la constante de temps centrale, les variations causées par le vieillissement diminuent fortement à 44°C comparativement aux mesures prises à 24°C. D'où l'importance d'effectuer des mesures RVM à des températures inférieures à 30°C.

Plusieurs études sur des mesures RVM effectuées sur des échantillons papiers, des transformateurs de puissance et des traversées isolés au papier/huile ont démontré que la constante de temps centrale (t_{peak}) ainsi que la pente initiale (S_r) varient avec le vieillissement de l'isolation. Cependant, il a été observé que l'humidité produit le même effet sur la constante de temps centrale. Il devient alors difficile de séparer l'effet des deux (Yao et Saha, 2002). De plus, la géométrie de l'isolation aurait un effet sur la pente initiale et la tension de retour maximale (Saha, Darveniza et Yao, 1999).

En résumé, il a été observé que les spectres RVM sont dépendants de la température, de l'humidité, du vieillissement et de la géométrie de l'isolation. Les paramètres des spectres RVM influencés par les quatre facteurs mentionnés précédemment sont la tension maximale de retour U_{rmax} , la constante de temps centrale (t_{peak}) et la pente initiale (S_r). Le vieillissement de l'isolation papier/huile influence particulièrement la constante de temps centrale (t_{peak}) et la pente initiale (S_r).

Cependant, jusqu'à ce jour, les études ont démontré que les mesures RVM représentent l'état du système d'isolation papier/huile et qu'il n'est pas possible à l'aide de cette méthode de différencier l'état de l'huile de celui du papier. Aussi, dans le cas où des mesures sont effectuées, elles doivent être faites à des températures près de 24°C en raison de l'effet masquant des paramètres à plus hautes températures.

2.2.2 Courants de polarisation et dépolarisation (PDC) dans le domaine du temps

Les études effectuées sur la corrélation entre le vieillissement du complexe papier/huile et les mesures PDC sont beaucoup moins nombreuses que celles sur les mesures RVM. Ceci s'explique par le fait que cette méthode de mesure est relativement récente et les études effectuées jusqu'à présent ont été axées sur l'interprétation des mesures plutôt que sur l'effet du vieillissement. Toutefois, à travers ces études, plusieurs auteurs ont remarqué une certaine influence du vieillissement de l'isolation. De plus, certains auteurs s'intéressent plus aux mesures dans le domaine des fréquences puisqu'elles sont moins sensibles au bruit

(Shayegani Akmal et al., 2004), étudient l'influence du vieillissement et de l'humidité sur des échantillons papier imprégnés d'huile sur le courant de dépolarisation. Afin de distinguer l'effet du vieillissement de celui de l'humidité, ils utilisent le circuit équivalent de l'isolation et comparent les constantes de temps. Ils remarquent que la constante de temps principale est affectée par le vieillissement et que la deuxième est affectée par l'humidité.

(Yao et Saha, 2002) tentent de séparer l'effet de l'humidité de celui du vieillissement sur les mesures PDC. Sans démontrer que c'était possible, dû à des erreurs d'expérimentation, ils ont remarqué une forte augmentation du courant de polarisation entre le papier neuf et la première phase de vieillissement. Cependant, la variation du courant est beaucoup plus faible entre les étapes de vieillissement plus avancées. *Cette étude ne présente pas de mesure du DP pour la comparaison des mesures.*

L'article écrit par (Noirhomme et al., 2005), dont le projet fait l'objet de ce mémoire, présentent les premiers résultats sur les mesures PDC et FDS sur les maquettes de transformateurs. Les mesures ont été effectuées sur huit maquettes à différents taux d'humidité et à différentes étapes du vieillissement. Les résultats ont clairement démontré 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 petit que 2 %. *Ces mesures ont été effectuées sur le système d'isolation papier/huile. L'effet de l'huile et celui du papier ne sont pas séparés pour l'instant.*

(Saha et Purkait, 2005) montrent sur des échantillons de papier imprégnés que l'augmentation du vieillissement a un impact sur l'augmentation du courant de charge mais que l'influence de l'huile est prédominante sur la mesure PDC.

(Kuchler et al., 2006) étudient l'influence du vieillissement de l'isolation papier/huile de traversées de transformateurs sur des mesures PDC et sur la tangente delta. Les résultats montrent qu'un vieillissement sévère du système d'isolation influence fortement les mesures PDC par une augmentation de l'amplitude des courants de polarisation et dépolarisation. Il remarque cependant à partir de mesures effectuées sur des échantillons papier que l'influence du vieillissement de l'huile est dominante sur les mesures de papier imprégné d'huile. *Les auteurs remarquent aussi que l'humidité et le vieillissement influencent la mesure PDC de la même façon. Or, le vieillissement avancé de l'isolation a pour effet d'augmenter la quantité d'humidité dans le papier. Il se pourrait que l'humidité, produite par le vieillissement*

avancé du papier, contribue à l'augmentation de la mesure. Les auteurs ne différencient pas ces deux composants.

Tout comme les mesures RVM, les mesures PDC sont influencées par le vieillissement du système d'isolation papier/huile et se traduisent par une augmentation des courants de polarisation et dépolarisation. L'humidité influence les mesures PDC de la même façon que le vieillissement et ces deux paramètres n'ont pas encore été dissociés.

2.2.3 Spectroscopie dans le domaine des fréquences

Les mesures dans le domaine des fréquences sont souvent exprimées selon la permittivité complexe. Cependant, cette mesure nécessite la connaissance de la capacité géométrique de l'isolation, c'est pourquoi les pertes diélectriques sont souvent exprimées par le facteur de dissipation (tangente delta).

(Hassan et al., 2004) étudient l'influence du vieillissement sur des échantillons papier imprégnés d'huile. Afin de simuler un vieillissement réel, ils ajoutent du métal tel que l'aluminium, le cuivre, le zinc et le fer. Ils étudient la fréquence à laquelle les courbes de la tangente delta et du facteur de puissance se séparent. Ils remarquent que la fréquence de séparation des courbes est proportionnelle au vieillissement. Cette séparation des courbes du facteur de dissipation et du facteur de puissance n'apparaît pas pour une variation de l'humidité. Selon ces résultats, cette méthode serait efficace afin de séparer l'effet du vieillissement de celui de l'humidité.

(Linhjell, Gafvert et Lundgaard, 2004) effectuent une étude importante sur des échantillons de papier imprégnés, vieillis à différents degrés et à différents taux d'humidité afin de séparer l'effet du vieillissement de celui de l'humidité. Ils remarquent que l'effet du vieillissement est beaucoup plus petit que celui de l'humidité. De plus, l'effet du vieillissement augmente avec l'augmentation du taux d'humidité. C'est-à-dire que la différence des pertes

diélectriques entre deux échantillons de DP différents est plus grande si le taux d'humidité est plus élevé.

Dans cette étude, les auteurs ont voulu déterminer si c'est la diminution de la longueur des chaînes des fibres du papier qui entraîne l'augmentation des pertes diélectriques ou bien si ce sont les produits de dégradation, principalement les acides. Pour ce faire, ils ont comparé les pertes diélectriques sur des échantillons vieillis avec les pertes diélectriques sur des échantillons de papier neuf auxquels on a ajouté de l'acide. D'où la conclusion que les pertes diélectriques associées au vieillissement sont l'effet de produits de dégradation du système papier-huile plutôt que la variation du DP.

Ils reprennent l'étude en 2005 (Linhjell, Lundgaard et Gafvert, 2005), afin de valider les résultats obtenus en 2004, et obtiennent les mêmes résultats, à savoir que les produits de dégradation tel que l'acidité et l'humidité augmentent les pertes diélectriques plutôt que le DP lui-même.

Les expériences sur les maquettes du présent projet, ont fait l'objet d'un article (Noirhomme et al., 2005). Les résultats des mesures de la tangente delta correspondent aux résultats obtenus avec les mesures PDC. C'est-à-dire qu'il y a une corrélation entre le facteur de dissipation (pertes diélectriques) et le DP du papier pour les maquettes ayant un taux d'humidité inférieur à 2 %. Cependant, les mesures ont été effectuées sur le système d'isolation papier/huile. L'expérimentation confirmant la corrélation avec le vieillissement du papier reste à faire.

(Gielniak et al., 2005) étudient l'influence de l'humidité et du vieillissement sur les mesures dans le domaine des fréquences, sur des échantillons de papier imprégnés d'huile. Ils utilisent des taux d'humidité variant de 0.6 à 4% sur des échantillons neufs et vieillis à 800 heures. Ils constatent que les variations des pertes diélectriques dues à l'humidité sont plus importantes que celles dues au vieillissement. Pour cette comparaison, ils utilisent les

mesures sur des échantillons ayant un taux d'humidité de 4%, ce qui est très élevé pour un transformateur.

ABB a effectué une étude sur l'effet du vieillissement de l'isolation papier/huile sur les mesures diélectriques à partir d'échantillons de papier imprégnés. Ils étudient l'influence de l'huile sur les mesures diélectriques en comparant des échantillons de papier vieilli imprégnés d'huile neuve et d'huile vieillie ainsi que des échantillons de papier neuf imprégnés des mêmes huiles. Ils obtiennent une augmentation des pertes diélectriques sur toute la plage de fréquences pour les échantillons papier imprégnés d'huile vieillie comparativement à ceux imprégnés d'huile neuve. Cependant, les échantillons de papier vieilli imprégnés d'huile neuve ou non présentent un pic de relaxation plus prononcé que pour le papier neuf imprégné d'huile vieillie, ce qui implique que les produits de dégradation du papier sont polaires et que la dégradation du papier est visible, selon lui, sur les mesures diélectriques.

(Poovamma et al., 2007) étudient la dépendance à la température, à l'humidité et au vieillissement des mesures diélectriques dans le domaine des fréquences. Cette étude est effectuée sur des modèles de transformateur. Les auteurs remarquent une augmentation des pertes diélectriques sur toute la plage de fréquence avec l'augmentation du vieillissement. Cependant ils notent aussi une forte augmentation de l'humidité.

(Linhjell, Lundgaard et Gafvert, 2007) reprennent les études effectuées en 2004 et 2005. L'expérimentation s'effectue sur des échantillons de papier imprégnés où ils évaluent l'impact de l'humidité, de la température, de produits de dégradation (acides) et du vieillissement sur les mesures diélectriques dans le domaine des fréquences. Dans cette étude, ils confirment l'influence de l'acidité à faible poids moléculaire sur les mesures. Cependant ils notent que l'influence d'une acidité équivalente à 2 mgKOH/g de ce type d'acide produit par la dégradation du papier correspond à 1% d'humidité sur les pertes diélectriques. Or, pour les échantillons de papier imprégnés d'huile, cette quantité d'acide a été générée seulement pour un DP de 300, la fin de vie utile étant de 200. *La quantité*

d'acide utilisée pour cette expérience n'est pas représentative de ce qu'on retrouve en réalité dans les transformateurs de puissance. En effet, à 0.08 mg KOH/g d'acide, l'huile est régénérée.

Jusqu'à présent, aucune étude n'a démontré de corrélation entre le DP du papier et les mesures dans le domaine des fréquences. De plus, les mesures des pertes diélectriques sur le complexe papier/huile sont similaires aux résultats obtenus dans le domaine du temps, à savoir que le vieillissement a pour effet de les augmenter tout comme l'humidité et c'est pourquoi il est difficile de différencier l'effet des deux. Cependant, l'influence de l'humidité semble être plus importante mais qu'à un taux d'humidité très bas, inférieur à 2%, le vieillissement du complexe papier/huile est visible.

2.3 Effet de la température

En 1993, (Sheiretov et Zahn, 1993) effectuent des essais dans le domaine des fréquences sur des échantillons de papier imprégnés pour des températures variant de 30 à 70°C. Les mesures ont été prises sur du papier neuf. Les auteurs observent un déplacement de la courbe des pertes diélectriques vers les hautes fréquences avec l'augmentation de la température et normalisent sur une courbe maîtresse par un déplacement horizontal pour du papier à 1% d'humidité. Ils observent également l'apparition d'un deuxième mécanisme de relaxation, pour les échantillons de papier contenant 3% d'humidité, qui s'amplifie avec la température et empêche le déplacement horizontal vers une courbe maîtresse.

En 1995, (Sheiretov et Zahn, 1995) utilisent les mesures dans le domaine des fréquences pour observer l'effet de la température sur la réponse diélectrique. Les courbes mesurées sur des échantillons de papier neufs à différentes températures, ont été normalisées vers une courbe maîtresse en effectuant un déplacement horizontal dans le domaine fréquentiel. Les résultats montrent que l'humidité a le même effet et peut être normalisée par un déplacement horizontal de la même manière. Les auteurs calculent ainsi une énergie d'activation de 0.69 eV selon la loi d'Arrhenius. En 2002, (Du et al., 2002) ont modélisé une équation pour

représenter la normalisation des mesures prises à différentes températures sur une courbe maîtresse pour des températures et des taux d'humidité différents. Les mesures sont effectuées sur du papier carton non-imprégné d'huile. La modélisation ne peut être appliquée sur l'isolation des transformateurs, mais il est intéressant de montrer qu'ils observent un déplacement horizontal aussi bien pour la température que pour l'humidité.

En 2006, (Yew, Saha et Thomas, 2006), utilisent la mesure dans le domaine des fréquences (FDS) et dans le domaine du temps (PDC) sur un modèle de transformateur en laboratoire. Ils observent que le facteur de dissipation, en basse fréquence, augmente avec la température. Les auteurs évaluent une autre donnée qu'ils nomment le 'cross-over frequency', c'est-à-dire la fréquence à laquelle les composantes réelle et imaginaire de la capacité se croisent. Cette fréquence de croisement augmente avec la température et est représentée par une fonction exponentielle. Pour les mesures dans le domaine temporel, ils observent que le courant de charge augmente sur toute la plage temporelle avec l'augmentation de la température ainsi que le courant de décharge pour les temps courts. Aucune modélisation n'a été faite pour cette expérience, ni normalisation des mesures.

En 2007, (Giselbrecht et Leibfried, 2007) ont effectué des mesures séparées de l'huile et du carton imprégné et observent un déplacement en fréquence pour les deux. Pour l'huile, le déplacement est le même pour l'huile neuve et vieillie. La partie imaginaire de la permittivité de l'huile est fortement dépendante de la température, dépendance qui s'exprime par une augmentation de la conductivité en fonction de la température. Tandis que la partie réelle de la permittivité est moins dépendante de la température. Pour le carton imprégné, l'effet de la température suit aussi la loi d'Arrhenius. Les auteurs ne donnent toutefois pas de données précises. Ils comparent plutôt le changement de la conductivité avec la température. Ils privilégient la loi d'Arrhenius pour représenter la dépendance à la température et montrent que c'est entre 10°C et 85°C, pour l'huile, qu'elle est la plus efficace.

La méthode RVM a aussi été utilisée récemment pour évaluer l'effet de la température sur la réponse diélectrique. Il a été observé que la constante de temps de la courbe de relaxation

diminue et que la tension maximale augmente avec l'augmentation de la température. (Kozlovskis et Rozenkrons, 1998), sur des transformateurs de courant, (Densley et Gupta, 2001), sur des traversées avec isolation papier/huile, (Hassan et al., 2003), sur du carton imprégné, observent ces résultats. (Densley et Gupta, 2001) et (Hassan et al., 2003) ont comparé des mesures faites sur des systèmes d'isolation neufs et vieillis et ont remarqué une plus grande différence dans les résultats à température ambiante.

(Kozlovskis et Rozenkrons, 1998) soulignent la différence entre l'huile et le papier qui sont représentés par deux mécanismes de relaxation distincts. L'un au temps court (0.1 à 10 secondes) représentant l'huile et l'autre au temps plus long (10 à 1000 secondes) représentant le papier. Ces deux mécanismes de relaxation réagissent différemment avec la température. Les auteurs considèrent que les processus de polarisation du papier sont plus influencés par la température que ceux de l'huile.

2.3.1 Conclusion (Température)

Le papier imprégné d'huile suit une loi d'Arrhenius. Toutefois cette loi est valable dans une certaine plage de température. À des températures élevées, l'isolation subit une modification de sa structure. À des températures inférieures à 10°C, aucune étude sur le papier imprégné d'huile n'a été effectuée. Sur l'huile, (Giselbrecht et Leibfried, 2007), souligne que la loi d'Arrhenius est plus efficace sur les mesures effectuées à 10°C et plus.

2.4 Conclusion

En ce qui concerne les études effectuées sur le vieillissement, tout ce qui a été effectué jusqu'à maintenant, que ce soit en laboratoire sur des échantillons imprégnés ou sur des appareils haute tension sur le terrain, a porté sur le système complet de l'isolation papier/huile. Ce qui implique que l'huile a subi un vieillissement tout autant que le papier. La quantité de produits polaires provenant de la dégradation du papier comparativement à

ceux de l'huile n'est pas connue. Hors le but est de vérifier s'il existe une corrélation avec le papier.

Aussi, il a été observé à plusieurs reprises que le vieillissement du complexe papier/huile influence les mesures diélectriques de la même façon que l'humidité, soit par augmentation des courants de polarisation et dépolarisation ou par l'augmentation des pertes diélectriques pour les mesures FDS. Cependant, l'ensemble des études effectuées sur le vieillissement ont démontré une augmentation du taux d'humidité avec le vieillissement du papier. À ce moment l'influence du vieillissement devient plus difficile à discerner.

En ce qui concerne les études sur la dépendance à la température des mesures diélectriques, il a été démontré à plusieurs reprises qu'elle suit une loi d'Arrhenius. Cependant la plage de températures observée est restreinte en basse température à 10°C. Le climat hivernal du Québec oblige pour l'instant, dans le cas où l'on voudrait effectuer des mesures diélectriques, à limiter les mesures à la période estivale.

CHAPITRE 3

THÉORIE

3.1 Introduction

Les matériaux diélectriques sont des matériaux dont les charges ne peuvent se déplacer au niveau macroscopique, c'est-à-dire que pour un diélectrique parfait, il n'y a pas de phénomène de conduction de courant. Cependant, au niveau microscopique, il se produit un phénomène de polarisation des charges qui consiste au déplacement ou à l'orientation des dipôles lors de l'application d'un champ électrique. Ce phénomène de polarisation est mesuré par les mesures diélectriques dans les domaines temporel et fréquentiel. Ce chapitre présente la théorie de base du phénomène de la polarisation ainsi qu'une explication des différents types de mesures utilisées, soit les mesures RVM, PDC et FDS. De plus, les effets de l'humidité, de la géométrie et de la température sur les mesures diélectriques, sont expliqués brièvement dans ce chapitre.

3.2 Le phénomène de la polarisation

Autre que la permittivité, on peut classer les matériaux selon leur niveau de conduction électrique, les matériaux conducteurs, les semi-conducteurs et les isolants. Les isolants sont formés par un matériau diélectrique. Ceux-ci, à l'opposé des matériaux conducteurs, ne possèdent pas, en théorie, de charges libres qui permettent la conduction du courant.

Lorsqu'un champ électrique est appliqué à un conducteur, les charges se distribuent à la surface de celui-ci et le champ électrique à l'intérieur du conducteur est nul. Dans le cas d'un diélectrique, les charges ne se déplacent pas à la surface, elles sont liées entre elles. Le champ électrique à l'intérieur du diélectrique n'est pas nul et produit un changement moléculaire au niveau microscopique par la formation de dipôles. C'est le phénomène de polarisation. La polarisation représente le moment dipolaire par unité de volume. Jonscher (1983, p.72), différencie le phénomène de polarisation et de conduction de la manière

suivante : «La polarisation provient d'un déplacement fini des charges dans un champ électrique constant et la conduction provient d'une vitesse moyenne finie du mouvement des charges dans un champ électrique constant».

3.2.1 Polarisation et mécanisme de relaxation

Il existe quatre types de polarisation : la polarisation optique, interfaciale, atomique et d'orientation. Voici une brève description de chacune.

Polarisation optique: La polarisation optique ou électronique s'explique par un déplacement du nuage d'électrons par rapport au noyau. L'ensemble du nuage forme un dipôle.

La polarisation atomique et d'orientation sont dites moléculaires: La polarisation moléculaire est le produit de l'interaction de deux atomes différents dans une même molécule. Cette interaction entraîne une redistribution des électrons qui génère un ensemble de dipôles. Plus spécifiquement, la **polarisation atomique** modifie la distance entre les atomes suite à l'application d'un champ électrique. La **polarisation d'orientation** se produit lorsque la molécule tourne autour de son axe de symétrie et s'aligne avec le champ électrique.

Polarisation interfaciale: La polarisation interfaciale est celle qu'on observe lorsque le matériau diélectrique est formé d'impuretés. Les charges s'accumulent autour de ces impuretés et forme un groupement. Ce phénomène survient aussi dans le cas d'un isolant formé de deux substances. Il y a accumulation de charges à l'interface des deux substances, ce qui produit la polarisation interfaciale.

Les différents types de polarisation ne se produisent pas tous à la même fréquence. La Figure 3.1 montre le comportement de la permittivité réelle et imaginaire en fonction de la fréquence sous l'influence de la polarisation. Les mesures diélectriques peuvent se faire de

0.0001 Hz à 1MHz. Ce qui implique que seuls les types de polarisation interfaciale et d'orientation sont visibles sur la mesure de la permittivité.

Les matériaux peuvent aussi être classés selon l'intensité de la polarisation d'orientation. Les matériaux qui présentent une forte polarisation d'orientation sont dits matériaux polaires. Tandis que les matériaux non-polaires possèdent seulement une polarisation électronique. Naturellement, un matériel formé de deux composés présentera une polarisation interfaciale.

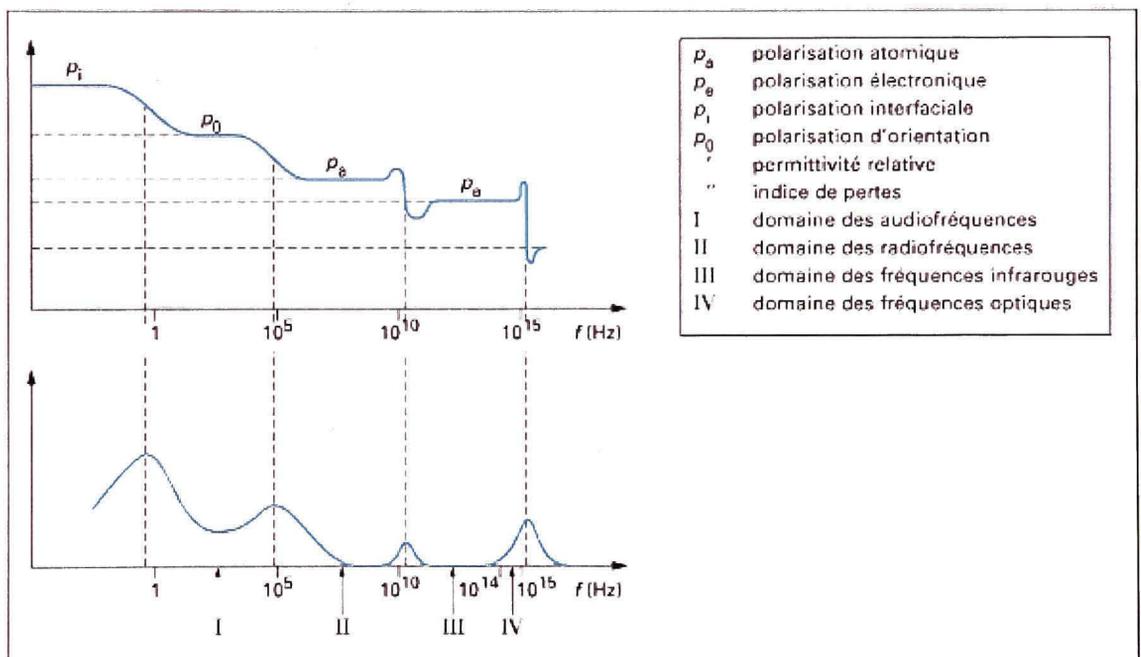


Figure 3.1 Influence des différents types de polarisation sur la permittivité réelle ϵ' (en haut) et la permittivité imaginaire ϵ'' (en bas).

(Tirée de Dubois, 1998)

Source : Cette figure est tirée du document écrit par M Jean-Claude Dubois, *Propriétés diélectriques des polymères*, ce document est disponible sur le site www.techniques-ingenieur.fr, 1998.

La variation de la permittivité réelle et imaginaire, observée à la Figure 3.1, est due aux mécanismes de relaxation. C'est un phénomène qui se produit lorsque la polarisation en fonction du temps ne suit plus le champ électrique appliqué, en raison de son inertie. La

relaxation peut être comparée à la résonance d'un circuit dans lequel il n'existe aucune composante inductive.

Plusieurs modèles de mécanismes de relaxation ont été développés, comme les modèles de Debye et Cole-Cole dont la théorie est présentée dans (Jonscher, 1983) mais qui ne fait pas l'objet de cette étude.

3.2.2 Représentation mathématique de la polarisation

L'induction électrique ou diélectrique du matériau, représentée par le vecteur \mathbf{D} , s'exprime par la somme des charges induites lors de l'application d'un champ électrique. Ce qui représente la somme des charges libres instantanées, reliées à la géométrie, à l'application d'un champ électrique et la somme des charges liées par la polarisation. L'équation générale de la conduction électrique \mathbf{D} est la suivante :

$$\mathbf{D} = \underbrace{\varepsilon_0 \mathbf{E}}_{\text{charges libres}} + \underbrace{\mathbf{P}}_{\text{charges liées}} \quad (3.1)$$

Où

\mathbf{D} est l'induction électrique ou diélectrique (C/m^2)

ε_0 est la permittivité du vide de valeur $8,854 \times 10^{-12}$ (F/m)

\mathbf{E} est le champ électrique (V/m)

\mathbf{P} est la polarisation (C/m^2)

L'induction d'un diélectrique est représentée par l'équation 3.2.

$$\mathbf{D}_{\text{diélectrique}} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad (3.2)$$

Où

ε_r est la permittivité relative d'un matériau

À partir des équations 3.1 et 3.2, on peut définir la polarisation par la relation suivante :

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \mathbf{E} \quad (3.3)$$

Sachant que $(\varepsilon_r - 1)$ est l'équivalent de la susceptibilité électrique χ_e , alors

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E} \quad (3.4)$$

La polarisation pour un diélectrique linéaire est donc définie selon la grandeur du champ électrique appliqué et la susceptibilité électrique du matériau.

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

La polarisation est un phénomène qui varie avec le champ électrique appliqué dans le domaine du temps. Celle-ci contient deux phases. La phase rapide qui suit l'application d'un champ électrique de façon pratiquement instantanée et la phase lente qui ne suit pas le champ électrique $E(t)$ en raison d'un phénomène d'inertie. L'équation 3.5 exprime la phase lente et rapide de la polarisation en fonction du temps.

$$P(t) = \underbrace{\varepsilon_0 \chi_{e_r} E(t)}_{\text{polarisation rapide}} + \underbrace{\Delta P(t)}_{\text{polarisation lente}} \quad (3.5)$$

Où

χ_{e_r} correspond au phénomène rapide de la polarisation moléculaire (sans unité).

Le calcul de la polarisation lente, suite à l'application d'une série d'impulsion $\delta(t)$, est basé sur le principe de superposition : la somme d'excitations consécutives est la somme des réponses des excitations individuelles. Dans ce cas, cette somme représente la convolution de l'intégrale entre le champ appliqué $E(t)$ et la fonction de réponse du diélectrique $f(t)$ qui varie dans le temps. Ce principe est représenté à la Figure 3.2.

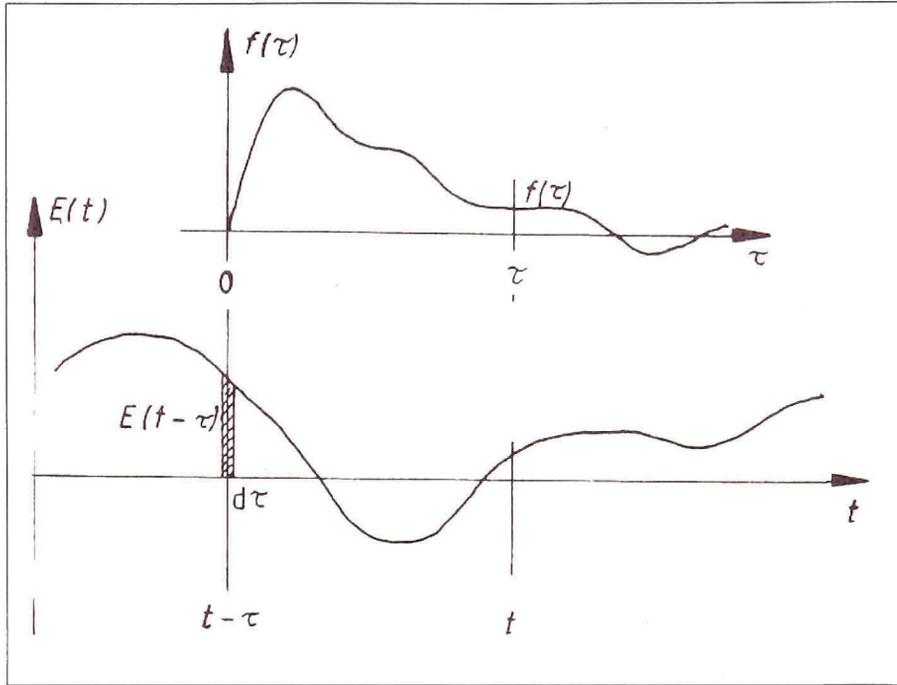


Figure 3.2 Principe de la polarisation en fonction du temps.

(Tirée de Jonscher, 1983)

Source : Cette figure est tirée du livre de M. J.A. Jonscher, *Dielectric relaxation in solids*, 1983.

À partir de la Figure 3.2, la polarisation lente en fonction du temps peut être définie comme suit:

$$P(t) = \varepsilon_0 \int_0^{\infty} f_s(\tau) E(t - \tau) d\tau \quad (3.6)$$

Où le terme $f_s(\tau)$ est la fonction de réponse des phénomènes lents. Sur la Figure 3.2 $f(\tau)$ représente en réalité $f_s(\tau)$.

La polarisation totale est donc exprimée selon l'équation 3.7.

$$P(t) = \underbrace{\varepsilon_0 \chi_{e_x} E(t)}_{\text{polarisation rapide}} + \varepsilon_0 \underbrace{\int_0^t f_s(\tau) E(t-\tau) d\tau}_{\text{polarisation lente}} \quad (3.7)$$

À partir de l'équation 3.1 et 3.7, l'induction diélectrique peut être exprimée dans le domaine du temps de la façon suivante :

$$D(t) = \varepsilon_0 E(t) + \varepsilon_0 \chi_{e_x} E(t) + \varepsilon_0 \int_0^t f_s(\tau) E(t-\tau) d\tau \quad (3.8)$$

La densité de courant peut s'écrire en fonction de la dérivée de l'induction diélectrique dans le domaine du temps et de la conduction directe :

$$J(t) = \frac{dD(t)}{dt} + \sigma E(t) \quad (3.9)$$

Où

$J(t)$ est la densité de courant (A/m^2)

σ est conductivité du matériau (S/m)

En remplaçant la dérivée de l'induction électrique par son expression, on obtient :

$$J(t) = \varepsilon_0 \frac{dE(t)}{dt} + \varepsilon_0 \chi_e \frac{dE(t)}{dt} + \varepsilon_0 \frac{d\left(\int_0^t f_s(\tau) E(t-\tau) d\tau\right)}{dt} + \sigma E(t) \quad (3.10)$$

Dans le cas d'un champ électrique de type échelon et d'amplitude E_0 , on peut écrire :

$$J(t) = \underbrace{\varepsilon_0 \varepsilon_x E_0 \delta(t)}_{\text{polarisation rapide}} + \underbrace{\varepsilon_0 E_0 f_s(\tau)}_{\text{polarisation lente}} + \underbrace{\sigma E_0}_{\text{conduction}} \quad (3.11)$$

Où

$\delta(t)$ est la fonction Dirac et est la dérivée d'un échelon du champ électrique
 ϵ_x est la permittivité à une fréquence élevée égale à $(1 + \chi_{e\infty})$ (sans unité).

Si l'on veut exprimer le courant du diélectrique en fonction du temps, on peut prendre l'exemple d'un condensateur plan à vide. La capacité géométrique qui dépend de la dimension du condensateur s'exprime selon l'équation suivante :

$$C_o = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (3.12)$$

Où

C_o est la capacité d'un condensateur à vide, c'est-à-dire la capacité géométrique (F)

A est la surface de chaque électrode (m^2)

d est la distance entre les électrodes (m)

Si une tension $U(t)$ est appliquée entre les électrodes, il est possible d'évaluer l'expression du courant en fonction du temps $I(t)$ sachant que $J(t) = \frac{I(t)}{A}$ et $E(t) = \frac{U(t)}{d}$. Considérant que $U(t)$ est une tension échelon d'amplitude U_o , alors :

$$I(t) = \begin{cases} \left(\epsilon_x \delta(t) + f_s(t) + \frac{\sigma}{\epsilon_0} \right) C_o U_o & \text{pour } 0 \leq t \leq t_c \\ \left(f_s(t) + \frac{\sigma}{\epsilon_0} \right) C_o U_o & \text{pour } 0 < t < t_c \end{cases} \quad (3.13)$$

Où

$\frac{\sigma}{\epsilon_0}$ représente tout phénomène de conduction directe.

$\epsilon_x \delta(t)$ représente la polarisation instantanée à $t = 0$.

t_c représente le temps de charge (s)

Puisque la fonction $f_s(t)$ est décroissante avec le temps, pour un temps de charge suffisamment long, $I(t)$ tend vers le courant de conduction direct. Le courant $I(t)$ représente le courant de charge $I_c(t)$ ou de polarisation $I_{pol}(t)$. Maintenant, si au temps t_c , les électrodes sont court-circuitées, ceci correspond à la superposition d'une tension égale à $-U_0$. En appliquant le principe de superposition, le courant résultant qui correspond au courant de dépolarisation $I_{dép}(t)$ est équivalent à :

$$I_{dép}(t) = -\{f(t-t_c) - f(t) + \varepsilon_x \delta(t-t_c)\} C_0 U_0 \quad \text{pour } t_c \leq t \leq \infty \quad (3.14)$$

Où le courant est considéré négatif. Il n'y a aucune conductivité présente dans le courant de dépolarisation. Il est donc plus facile de déterminer la fonction de réponse du diélectrique $f_s(t)$ par l'équation 3.15 si on laisse tomber la composante instantanée $\varepsilon_x \delta(t-t_c)$:

$$f(t-t_c) = \frac{-I_{dép}(t)}{C_0 U_0} + f(t) \quad (3.15)$$

Aussi, puisque la fonction de réponse est une fonction qui décroît de façon monotone alors $f(t) \ll f(t-t_c)$ et on peut donc écrire :

$$\boxed{f(t-t_c) = \frac{-I_{dép}(t)}{C_0 U_0}} \quad (3.16)$$

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

L'application d'une tension sinusoïdale plutôt qu'une tension échelon ou Dirac permet d'exprimer la polarisation dans le domaine des fréquences. La conversion de la polarisation du domaine du temps au domaine des fréquences peut se faire par la transformée de Fourier. L'expression d'une fonction $G(t)$ dans le domaine du temps s'exprime par $G(\omega)$ dans le domaine des fréquences.

La transformée de Fourier de la fonction de réponse $f(t)$ est égale à la susceptibilité (équation 3.17).

$$\mathbf{f}(\omega) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt = \chi(\omega) \quad (3.17)$$

Où la susceptibilité est complexe donc égale à :

$$\chi(\omega) = \chi'(\omega) - j\chi''(\omega) \quad (3.18)$$

La transformée de Fourier de la polarisation dans le domaine du temps est donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{P}(\omega) = \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E}(\omega) + \varepsilon_0 \chi(\omega) \mathbf{E}(\omega) \quad (3.19)$$

$\mathbf{P}(\omega)$ est le phaseur de $\mathbf{P}(t)$

$\mathbf{E}(\omega)$ est le phaseur $\mathbf{E}(t)$

Et la densité de courant peut aussi s'exprimer dans le domaine des fréquences :

$$\mathbf{J}(\omega) = j\omega\varepsilon_0 \mathbf{E}(\omega) + j\omega\varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E}(\omega) + j\omega(\chi'(\omega) - j\chi''(\omega))\mathbf{E}(\omega) + \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \mathbf{E}(\omega) \quad (3.20)$$

En ramenant les termes en j ensemble, on obtient :

$$\mathbf{J}(\omega) = j\omega\varepsilon_0 \left\{ 1 + \chi_e + \chi'(\omega) - j \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} + \chi''(\omega) \right) \right\} \mathbf{E}(\omega) \quad (3.21)$$

La susceptibilité peut s'exprimer en fonction de la permittivité par la relation suivante:

$$\mathbf{J}(\omega) = j\omega\varepsilon_x (\varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega)) \mathbf{E}(\omega) \quad (3.22)$$

Où

$$\varepsilon'(\omega) = 1 + \chi_e + \chi'(\omega) \quad (3.23)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega} + \chi''(\omega) \quad (3.24)$$

Le terme $\frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega}$ représente les pertes produites par les charges libres, soit les pertes par conduction, et le terme $\chi''(\omega)$ représente les pertes dues à l'inertie des charges liées, soit les pertes diélectriques.

Le courant exprimé dans le domaine des fréquences, à l'application d'une tension $\mathbf{U}(\omega)$ appliquée, devient :

$$\mathbf{I}(\omega) = j\omega C_0 \left\{ \underbrace{\varepsilon_x + \chi'(\omega)}_{\text{partie capacitive}} - j \underbrace{\left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega} + \chi''(\omega) \right)}_{\text{partie résistive}} \right\} \mathbf{U}(\omega) \quad (3.25)$$

D'après l'équation 3.25, on observe que le courant possède une partie en avance de 90° sur la tension, ce qui peut être représenté par une capacité réelle $C'(\omega)$ et une partie en phase avec la tension, qui peut être représenté par une capacité imaginaire $C''(\omega)$. L'expression du courant en fonction de la fréquence peut s'écrire comme suit :

$$\mathbf{I}(\omega) = j\omega (C'(\omega) - jC''(\omega)) \mathbf{U}(\omega) \quad (3.26)$$

$$\mathbf{I}(\omega) = j\omega \cdot \mathbf{C}(\omega) \cdot \mathbf{U}(\omega) \quad (3.27)$$

Où

$$C'(\omega) = [\varepsilon_x + \chi'(\omega)] C_0 \quad (3.28)$$

$$C''(\omega) = \left[\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} + \chi''(\omega) \right] C_0 \quad (3.29)$$

Le courant circulant à travers le diélectrique possède donc une composante réelle et une composante imaginaire, tel qu'illustré à la Figure 3.3.

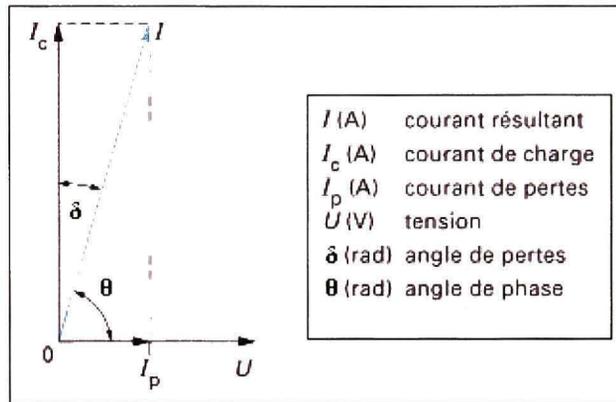


Figure 3.3 *Diagramme de Fresnel pour un condensateur contenant un diélectrique imparfait.*

(Tirée de Dubois, 1998)

Source : Cette figure est tirée du document écrit par M. Jean-Claude Dubois, *Propriétés diélectriques des polymères*, ce document est disponible sur le site www.techniques-ingenieur.fr, 1998.

La tangente de l'angle des pertes δ ($\tan \delta$) est souvent utilisée pour exprimer les pertes. Elle est le rapport de la partie imaginaire sur la partie réelle. Selon la Figure 3.3, la tangente delta (ou le facteur de dissipation) est calculée selon l'équation suivante :

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\omega C''}{\omega C'} \quad (3.30)$$

Sachant que l'expression d'un condensateur est :

$$C = C_0 \varepsilon \quad (3.31)$$

Alors on peut écrire :

$$\boxed{\tan \delta = \frac{\omega C_0 \varepsilon''}{\omega C_0 \varepsilon'} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}} \quad (3.32)$$

Nous verrons que cette mesure peut être utile dans le cas où la capacité géométrique n'est pas connue.

CHAPITRE 4

MESURES DIÉLECTRIQUES

4.1 Introduction

Tel que mentionné à la section 1.4, les mesures diélectriques peuvent s'effectuer dans le domaine du temps et des fréquences. Il existe deux types de mesure dans le domaine du temps qui peuvent représenter le comportement de l'isolation, la mesure de la tension de retour (RVM) et la mesure des courants de polarisation et dépolarisation (PDC). La spectroscopie dans le domaine des fréquences (FDS) est la mesure de la permittivité du diélectrique. Ces trois méthodes de mesure sont expliquées dans cette section.

4.1.1 Mesure des courants de polarisation et dépolarisation (PDC)

Le phénomène de polarisation peut être observé par la mesure du courant de polarisation et de dépolarisation. Tel que vu précédemment, les charges liées, représentées par les dipôles, se déplacent suite à l'application d'un champ électrique. De même, le courant représentant le mouvement des charges liées à la suite de l'application d'une tension échelon, peut être mesuré par un micro-ampèremètre. Ce courant varie exponentiellement avec le temps. Les diélectriques possèdent aussi des charges libres qui, suite à l'application d'une tension, produisent le courant de conduction. Ce courant est additionné au courant produit par les charges liées pour former le courant de charge I_c ou de polarisation I_{pol} en fonction du temps. Le courant de charge tend vers le courant de conduction. Ce qui implique que le courant de conduction, si le temps de mesure est suffisamment long, peut être évalué.

Si on court-circuite les électrodes de mesure après un temps de charge t_c , une tension $-U_0$ est générée aux bornes du diélectrique et un courant de décharge I_d ou de dépolarisation $I_{dépol}$ circule alors dans le circuit. La durée de la mesure du courant de décharge correspond au temps de décharge t_d ou de dépolarisation $t_{dépol}$. Les variations temporelles des deux types de courants sont approximativement de forme exponentielle, tel qu'illustré à la Figure 4.1.

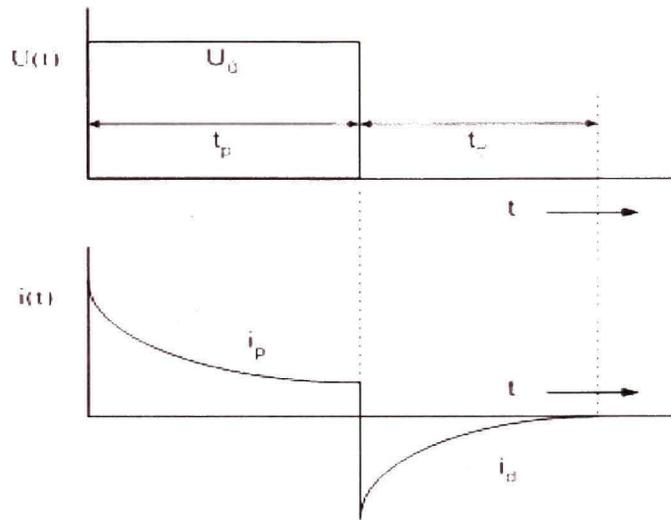


Figure 4.1 *Principe de la mesure des courants de polarisation et dépolarisation.*

(Tirée de (Saha et al., 2004))

Source : Cette figure est tirée de l'article de M M. T.K. saha et P. Purkaital., *Investigation of polarization and depolarization current measurements for the assessment of oil-paper insulation of aged transformers*, p.147; February 2004.

4.1.2 Mesure de la tension de retour (RVM)

La méthode de mesure RVM d'un diélectrique est la plus ancienne. Elle consiste en l'application d'un courant de polarisation et dépolarisation jusqu'au temps t_d à partir duquel le circuit est ouvert. Les charges liées par la polarisation deviennent libres lorsque le circuit est ouvert et une tension se crée aux bornes du diélectrique. Le cycle de la mesure est illustré à la Figure 4.2. Ce cycle est répété à plusieurs reprises et à chaque fois les temps de charge et de décharge sont augmentés jusqu'à ce qu'un maximum de la tension de retour soit atteint.

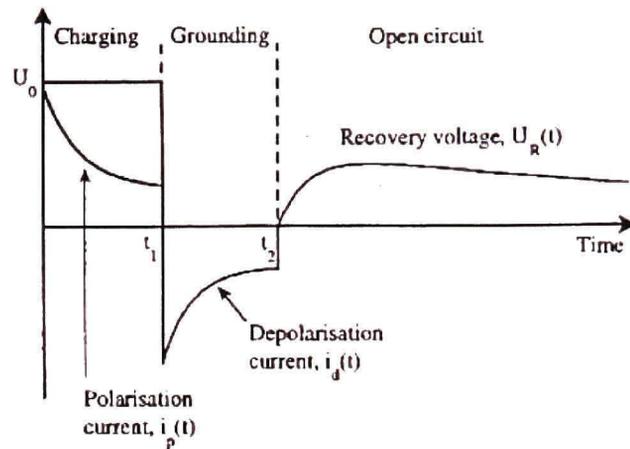


Figure 4.2 *Principe de la mesure de la tension de retour.*

(Tirée de (Zaengl et al., 2004))

Source : Cette figure est tirée de l'article de M. W.S. Zaengl, Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment (transformers, cables etc.), p.6. Cet article a été présenté lors du Symposium on High Voltage Engineering ISH 2004.

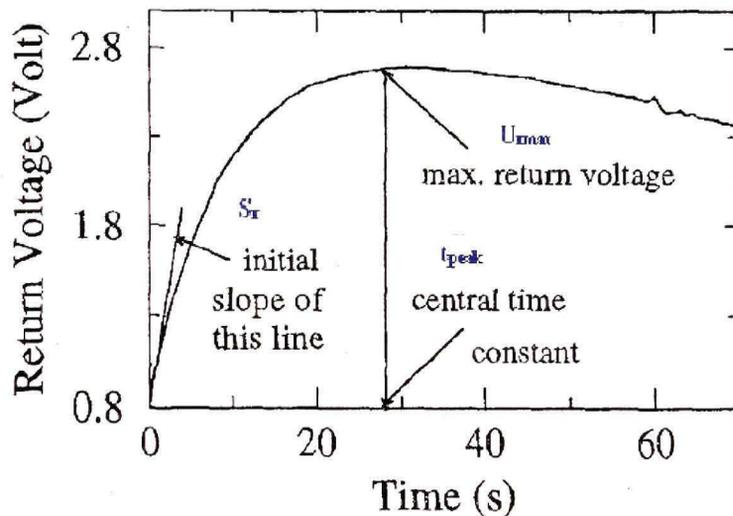


Figure 4.3 *Courbe de la tension de retour.*

(Tirée de (Saha et al., 2004))

Source : Cette figure est tirée de l'article de M. T.K. Saha et al., *Electrical and Chemical Diagnostics of Transformers Insulation-Part A: Aged Transformer Samples*, p.1548. Cet article a été présenté dans le magazine IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 12, no 4, 1997.

Pour chaque cycle, la tension maximale est retenue afin de tracer la courbe de la tension de retour maximale en fonction du temps de charge, tel qu'illustré à la Figure 4.3. Sur cette courbe, trois paramètres sont identifiés et servent à l'étude de l'influence de la température, de l'humidité, du vieillissement et de la géométrie de l'isolation papier/huile sur la tension de retour. Ces trois paramètres sont la tension maximale de retour (U_{rmax}), le temps de charge correspondant à cette tension maximale que l'on nomme aussi constante de temps centrale (t_{peak}) et finalement la pente initiale de la courbe (S_r).

4.1.3 Mesures dans le domaine des fréquences

La mesure des pertes diélectriques consiste à calculer, par la loi d'Ohm généralisée, l'impédance d'un diélectrique en appliquant une tension sinusoïdale à ses bornes. À l'aide d'une mesure du courant et du déphasage, il est possible d'évaluer les composantes capacitatives et résistives de l'impédance où la partie résistive représente les pertes. Les appareils de mesure dans le domaine des fréquences calculent l'impédance qui peut être lue sous la forme de la capacité complexe du diélectrique, selon l'équation 4.1. Les appareils peuvent aussi calculer la capacité réelle (partie capacitive pure) et imaginaire (partie résistive) ou la tangente delta qui est le rapport de ces deux termes. Si la capacité géométrique est connue, il est possible de calculer la permittivité complexe $\epsilon(\omega)$ du diélectrique, selon l'équation 3.31.

$$\mathbf{Z} = \frac{1}{j\omega\mathbf{C}} \quad (4.1)$$

Où

$$\mathbf{C} = C' - jC''$$

La tangente delta (équation 3.32) est une autre façon de mesurer les pertes. Son utilisation permet de comparer des systèmes d'isolation de géométrie différente sans connaître cette dernière, ce qui est souvent le cas pour les transformateurs de puissance.

4.1.4 Appareils de mesure commerciaux utilisés

Plusieurs types de circuits électriques ont été utilisés afin de caractériser les diélectriques mais qui ne font pas l'objet de ce travail. Dans la dernière décennie, des appareils commerciaux ont été développés et sont utilisés aujourd'hui. Ces appareils sont principalement utilisés pour les mesures diélectriques mais certains sont munis de logiciel d'analyse de l'état de l'isolation d'appareil haute tension. Ces appareils plus spécialisés sont basés sur les expériences des dernières décennies. Les appareils commerciaux ayant servi dans cette étude sont présentés ici.

4.1.4.1 IDA 200 de Programma

L'appareil IDA 200 de la compagnie Programma (actuellement PAX diagnostic) est conçu de façon à mesurer l'impédance d'un système d'isolation dans le domaine des fréquences. Le principe de la mesure d'impédance est l'application d'une tension sinusoïdale aux bornes d'un système d'isolation générant un courant qui traverse le système. La tension et le courant sont mesurés par un ampèremètre et un voltmètre, internes à l'appareil. Le principe est illustré à la Figure 4.4.

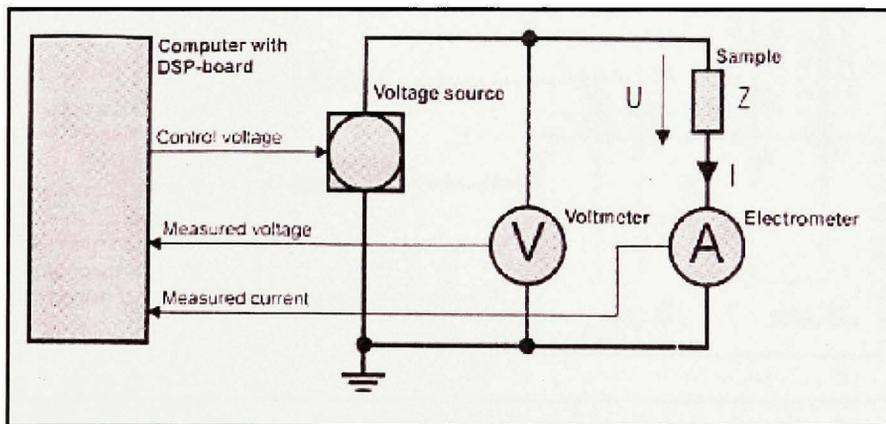


Figure 4.4 *Mesure de l'impédance d'un système d'isolation par l'appareil IDA 200.*

À partir de l'impédance, plusieurs paramètres peuvent être calculés, comme le facteur de dissipation, le facteur de puissance, ainsi que la capacité complexe. Les mesures sont effectuées sur une plage de fréquences variant de 0.0001 Hz à 1 kHz. La tension maximum disponible de l'appareil est de 200 V crête. (*IDA 200 User's Manual 2002*).

Branchement de l'appareil

L'appareil IDA 200 comporte trois connexions de branchement, le branchement *Hi* qui correspond à l'application de la tension sinusoïdale et les branchements *Lo* et *Ground* qui servent au retour du courant.

Il y a deux types de capacités à mesurer dans un système d'isolation d'un transformateur, la capacité entre deux enroulements et la capacité entre un enroulement et la cuve, tel qu'illustré à la Figure 4.5

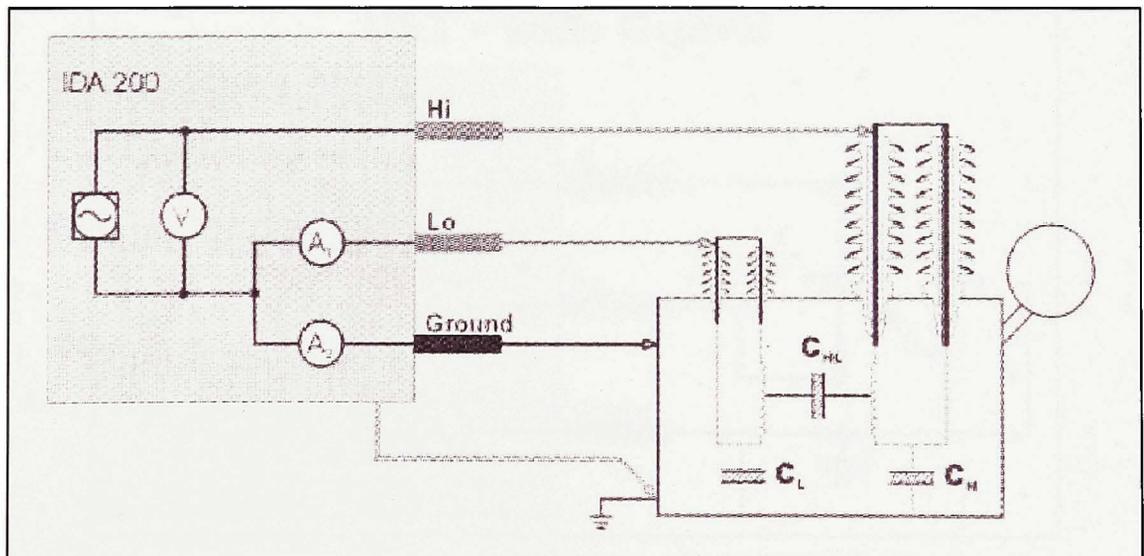


Figure 4.5 Connexion du IDA 200 d'un transformateur à deux enroulements avec une mesure entre les enroulements haute et basse tension.

Où :

- C_{HL} est la capacité de l'isolation papier/huile entre les enroulements haute et basse tension
- C_H est la capacité de l'isolation entre l'enroulement haute tension et la cuve.
- C_L est la capacité de l'isolation entre l'enroulement basse tension et cuve.

Le branchement UST mesure la capacité entre deux électrodes flottantes, les enroulements basse et haute tension dans le cas d'un transformateur à deux enroulements. Dans le cas où la cuve est connectée à la mise à la terre, on parle d'une mesure avec *garde*. Ceci élimine l'effet des capacités C_H et C_L , tel qu'illustré à la Figure 4.6. Une mesure sans garde mesure la capacité C_{HL} en parallèle avec C_H et C_L . Le branchement de type GST (Grounded Specimen Test) mesure la capacité entre un enroulement et la cuve. Cette capacité représente la traversée, l'huile et l'isolation papier de l'enroulement. Il est donc préférable d'utiliser le branchement UST (Ungrounded Specimen Test) puisqu'on limite la mesure à l'isolation papier/huile.

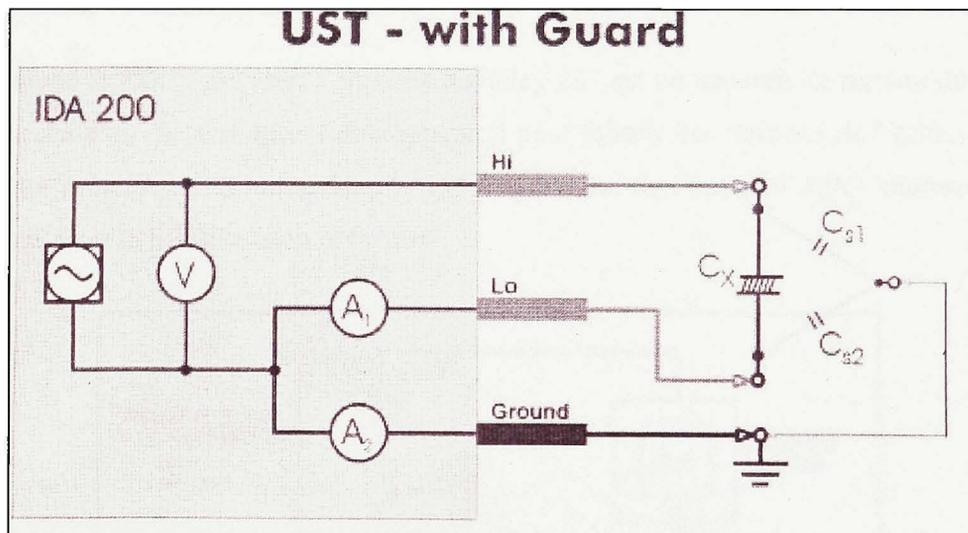


Figure 4.6 Schéma de connexion d'une mesure UST avec garde.

Source : Cette figure est tirée du Guide d'utilisateur de l'appareil IDA 200 de la compagnie Programma, p.136, 2000.

4.1.4.2 PDC Analyser

L'appareil *PDC Analyser* commercialisé par Alff Engineering mesure le courant qui circule dans un système d'isolation lorsqu'une tension y est appliquée et ce, dans le domaine du temps. Deux types de courant peuvent être mesurés, les courants de polarisation et de dépolarisation. Un logiciel d'évaluation permet de calculer certains paramètres tels la capacité complexe et d'évaluer l'état du système d'isolation comme l'humidité du papier et la conductivité de l'huile.

Branchement de l'appareil

La mesure du courant de polarisation et dépolarisation sur un transformateur s'effectue entre les bornes haute et basse tension. Cette mesure est semblable à une mesure effectuée sur un condensateur, où la mesure est prise entre la haute tension et la cuve.

4.1.4.3 Keithley 237

Tout comme le *PDC Analyser*, l'appareil Keithley 237 est un appareil de mesure du courant circulant dans un diélectrique. Cette apppareil peut fournir des tensions de l'ordre de 1100 Volts. Le principe de la mesure est le même que celui de l'appareil *PDC Analyser* et elle s'effectue entre la haute tension et la cuve.

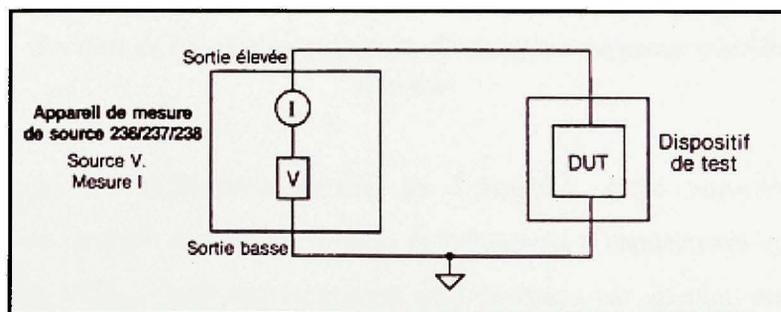


Figure 4.7 Principe de la mesure d'un diélectrique par l'appareil Keithley 237.

4.2 Effet de la géométrie de l'isolation sur la réponse du diélectrique

Comme mentionné à la section précédente, les mesures diélectriques s'effectuent généralement entre les enroulements haute et basse tension, ce qui représente strictement l'isolation papier/huile. Ces derniers sont de formes concentriques imbriqués l'un dans l'autre avec l'enroulement haute tension à l'extérieur. L'isolation qui sépare les enroulements est formée de conduits d'huile séparés entre eux par des couches de papier et de carton cylindrique, qu'on appelle la barrière et de couches de carton dans le sens de l'axe qui forment les espaces, tel qu'illustré à la Figure 4.8. Puisque les caractéristiques diélectriques de l'huile et du carton sont différentes, une variation de la proportion de chaque isolant produit une variation sur les mesures diélectriques.

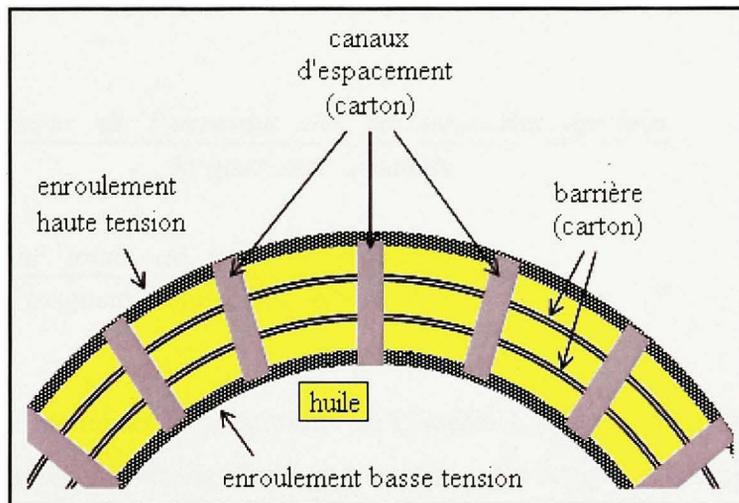


Figure 4.8 *Section de l'isolation papier/huile entre les enroulements haute et basse tension.*

Si on représente les différentes parties de l'isolation entre enroulements par des condensateurs, on pourrait représenter l'huile et les canaux d'espacement en parallèle, suivi de la barrière en série. Cette représentation de l'isolation est appelée modèle XY et est illustrée à la Figure 4.9.

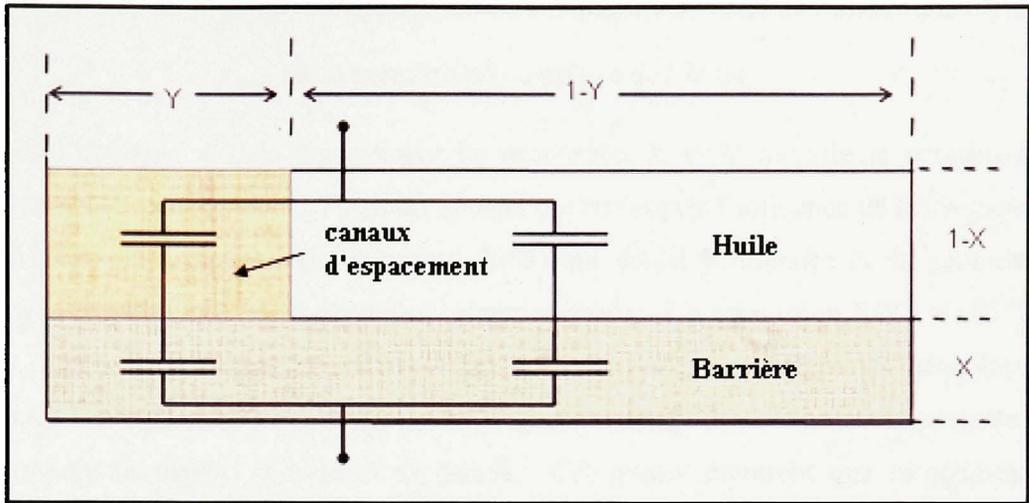


Figure 4.9 *Modèle XY de l'isolation des transformateurs.*

Où

$$X = \frac{\text{épaisseur de l'ensemble des barrières des conduits}}{\text{largeur des conduits}}$$

$$Y = \frac{\text{largeur totale de tous les espacements}}{\text{longueur totale des conduits}}$$

Il est possible de modéliser la permittivité de l'isolation d'un transformateur à partir de la combinaison de la permittivité de l'huile et du papier, en se basant sur le modèle XY.

$$\epsilon(\omega, T)_{sfo} = \frac{Y}{\frac{1-X}{\epsilon_{\text{espacement}} + \frac{X}{\epsilon_{\text{barrière}}}}} + \frac{1-Y}{\frac{1-X}{\epsilon_{\text{huile}} + \frac{X}{\epsilon_{\text{barrière}}}}} \quad (4.2)$$

Où

ϵ_{sfo} est la permittivité complexe de l'isolation du transformateur.

$\epsilon_{\text{espacement}}$ est la permittivité complexe du matériel formant les canaux d'espacement.

$\epsilon_{\text{barrière}}$ est la permittivité complexe des matériaux formant la barrière.

ϵ_{huile} est la permittivité complexe de l'huile.

D'après l'équation 4.2, le changement de proportion X et Y modifie la permittivité de l'isolation du transformateur. Plusieurs auteurs ont remarqués l'influence de la géométrie sur les mesures diélectriques, dont (Gafvert, 2005) qui étudie l'influence de la géométrie en variant la proportion X/Y. Il donne les valeurs suivantes à la proportion X/Y : 10/10, 10/50, 50/50, 50/10. La mesure de la tangente delta obtenue pour différentes géométries est présentée à la Figure 4.10. La variation de la tangente delta est relativement importante selon la variation du rapport d'huile et de carton. Ces études montrent que la géométrie de l'isolation n'est pas un paramètre à négliger.

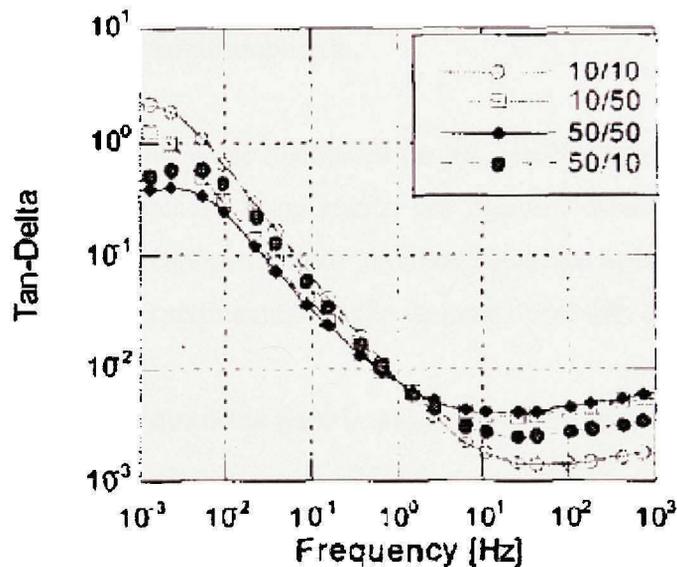


Figure 4.10 Influence des paramètres géométriques X et Y sur la tangente delta d'un transformateur de puissance avec le rapport X/Y = 10/10, 10/50, 50/50 et 50/10.

(Tirée de (M. U. Gafvert et al., 2005))

Source : Cette figure est tirée de l'article de M. Uno Gafvert : *Influence of geometric structure and material properties on dielectric frequency response of composite oil cellulose insulation*, p.75. Cet article a été présenté lors du Symposium International on Electrical Insulating, 5-9 juin 2005.

4.3 Effet de l'humidité sur la réponse du diélectrique

L'humidité est un paramètre important qui affecte l'état de l'isolation des transformateurs de puissance. Elle réduit la durée de vie du papier de moitié pour une augmentation de deux fois sa quantité dans le papier et elle diminue la tenue diélectrique de l'isolation papier/huile ((Du et al., 1998). La quantité d'eau dans le papier est donc une mesure importante.

L'humidité est aussi l'un des facteurs les plus connus qui influencent les mesures diélectriques. Les études menées jusqu'à ce jour ont permis de développer des applications permettant d'évaluer le pourcentage d'humidité dans le papier par les mesures PDC. Ces méthodes ne sont pas au point puisqu'il a été observé à plusieurs reprises que le vieillissement du système d'isolation papier/huile affecte la mesure PDC de la même façon que l'humidité mais à plus faible amplitude.

Cette section montre l'influence de l'humidité sur les mesures diélectriques mais, avant tout, il est important de comprendre l'importance des mesures d'humidité dans les systèmes d'isolation et de connaître comment migre l'humidité entre le papier et l'huile. Ces données sont importantes lors des expérimentations afin de mieux contrôler ce paramètre.

4.3.1 Mesure du taux d'humidité dans le papier et dans l'huile

L'humidité du papier est mesurée en pourcentage de poids d'eau par rapport au poids du papier sec. Si des échantillons de papier sont disponibles, l'humidité du papier est mesurée par la méthode Karl Fisher. Étant donné que ce n'est généralement pas le cas, le taux d'humidité du papier est déterminé à partir de la quantité d'eau dans l'huile. La quantité d'eau mesurée dans l'huile est en ppm, ce qui représente le rapport du poids d'eau sur le poids de l'huile ($\mu\text{g d'H}_2\text{O/g d'huile}$).

La mesure de la quantité d'eau du papier à partir des mesures de la quantité d'eau de l'huile est basée sur la relation d'équilibre du contenu en eau qui existe entre le papier et l'huile et qui varie selon la température. Plusieurs auteurs ont développé des courbes d'équilibre

d'humidité des systèmes d'isolation papier/huile en fonction de la température. Les courbes d'Oomen sont considérées comme étant les plus précises, Figure 4.11.

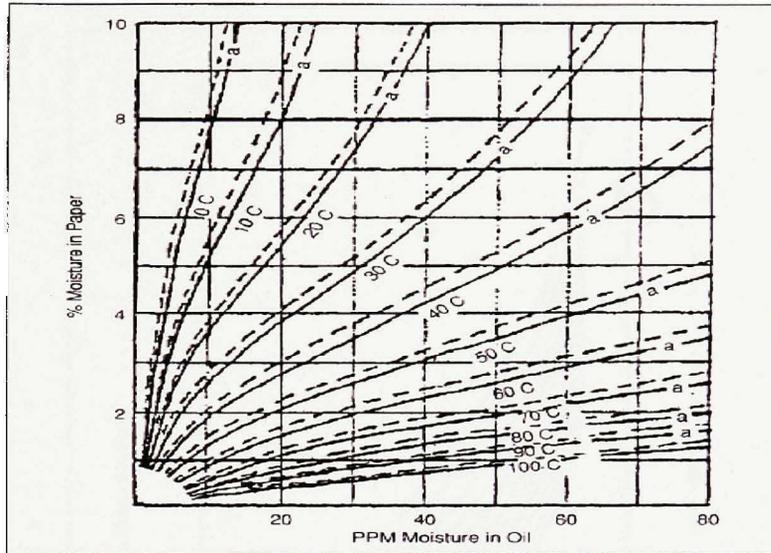


Figure 4.11 *Courbes d'Oomen de l'équilibre de l'humidité entre le papier et l'huile.*

(Tirée de (Mme Du et al., 1999))

Source : Cette figure est tirée de l'article de Mme.Y. Du et al.: *Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems*, p.13, Cet article a été présenté dans le magazine *Electrical Insulation Magazine* Vol. 15, no 1, 1999.

Oommen a aussi développé des courbes d'équilibre d'humidité entre le papier et l'air présentées à la Figure 4.12. Ces courbes ont servies à déterminer l'humidité dans le papier lors des expérimentations effectuées sur les échantillons papier en laboratoire à défaut d'avoir accès à des analyses par la méthode Karl Fisher.

L'inconvénient d'utiliser ces courbes pour déterminer le taux d'humidité dans le papier provient de la difficulté à obtenir des résultats précis dû à la faible précision des courbes aux basses températures et à la difficulté à atteindre l'équilibre pour les systèmes d'isolation des transformateurs. La température varie constamment dans les transformateurs de puissance. Aussi, aux basses températures, l'équilibre est très long à atteindre. Le temps nécessaire à un

système d'isolation pour atteindre l'équilibre peut être déterminé par le coefficient de diffusion entre le papier et l'huile.

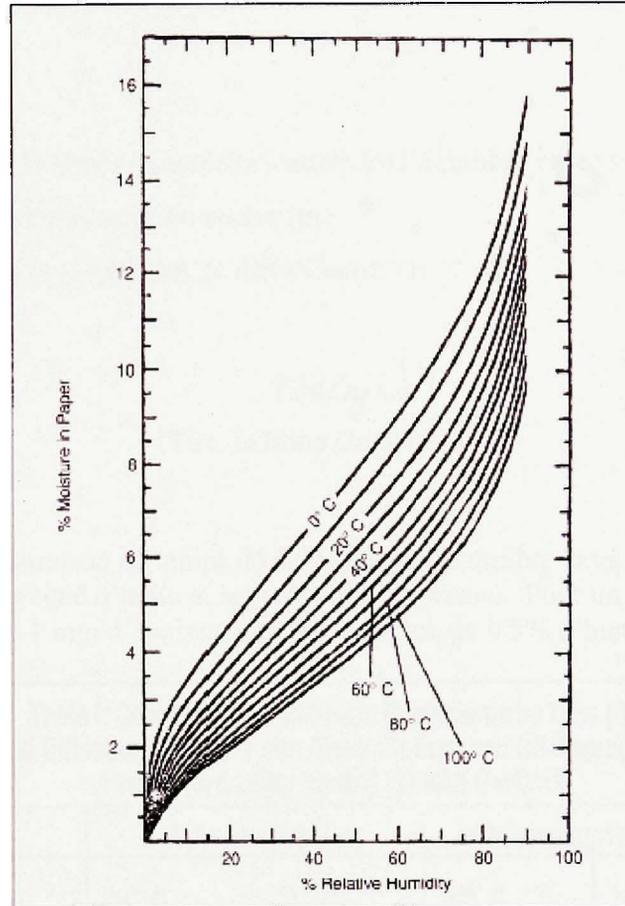


Figure 4.12 *Courbes d'Oommen de l'équilibre de l'humidité entre le papier et l'air.*

(Tirée de (Mme Du et al., 1999))

Source : Cette figure est tirée de l'article de Mme.Y. Du et al.: *Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems*, p.13. Cet article a été présenté dans le magazine *Electrical Insulation Magazine* Vol. 15, no 1, 1999.

4.3.2 Temps de diffusion de l'humidité entre le papier et l'huile

Le temps de diffusion de l'humidité entre le papier et l'huile peut être utile afin de déterminer si l'équilibre en humidité d'un système d'isolation est atteint. (Du et al., 1999) présente des

coefficients de diffusion du papier imprégné et non-imprégné d'huile, (Tableau 4.1).
L'équation du temps de diffusion est la suivante :

$$\tau = \frac{d^2}{\pi^2 D} \quad (4.3)$$

Où

τ est le temps nécessaire à atteindre l'équilibre en humidité (seconde)

d est l'épaisseur du papier (m)

D est le coefficient de diffusion (m^2/s)

Tableau 4.1

(Tiré de Mme Du et al., 1999)

Comparaison du temps de diffusion de l'humidité entre le carton imprégné d'huile et le carton non-imprégné. Pour un carton de 1 mm d'épaisseur et une variation de 0.5% d'humidité

Table I: Comparison of Diffusion Coefficients by Foss [31] and Diffusion Time for 1 mm-Thick Oil-Free and Oil-Impregnated Pressboard using (6) and (9) with $C=0.5\%$				
	Oil-Free Pressboard		Oil-impregnated Pressboard	
T	20° C	70° C	20° C	70° C
D (m^2/s)	1.7×10^{-11}	9.5×10^{-10}	8.5×10^{-14}	4.7×10^{-12}
$\tau = d^2 / (\pi^2 D)$ (hours)	1.7	0.03	333	6

Source : Ce tableau est tiré de l'article de Mme.Y. Du et al.: *Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems*, p.16. Cet article a été présenté dans le magazine *Electrical Insulation Magazine* Vol. 15, no 1, 1999.

La troisième ligne du tableau donne l'exemple du temps de diffusion d'un échantillon papier de 1 mm d'épaisseur. Le temps nécessaire à l'équilibre pour le papier non-imprégné est 5.6 fois plus long à 20 °C qu'à 70°C. De plus, le temps de diffusion est beaucoup plus élevé pour

le papier imprégné d'huile contenu dans l'isolation des transformateurs que pour un papier non-imprégné.

4.3.3 Influence de l'humidité sur les mesures diélectriques

Plusieurs études ont démontré la corrélation entre les mesures PDC et le pourcentage d'humidité contenu dans le papier, d'où le développement d'applications de mesure d'humidité du papier. Cette corrélation s'exprime par l'augmentation du courant de polarisation aux temps longs et par l'augmentation de la permittivité pour les mesures FDS. L'étude précédente effectuée sur les maquettes de transformateurs par (Hassan) a démontré que l'humidité a un effet masquant sur le vieillissement de l'isolation papier/huile. En effet, le vieillissement est visible pour l'isolation papier contenant moins de 2.25% d'humidité tel qu'illustré à la Figure 4.13 pour une mesure sur une maquette contenant 1.2 % d'humidité. La Figure 4.14 illustre le cas où il n'y a pas de corrélation avec le DP, l'humidité masquant ce dernier.

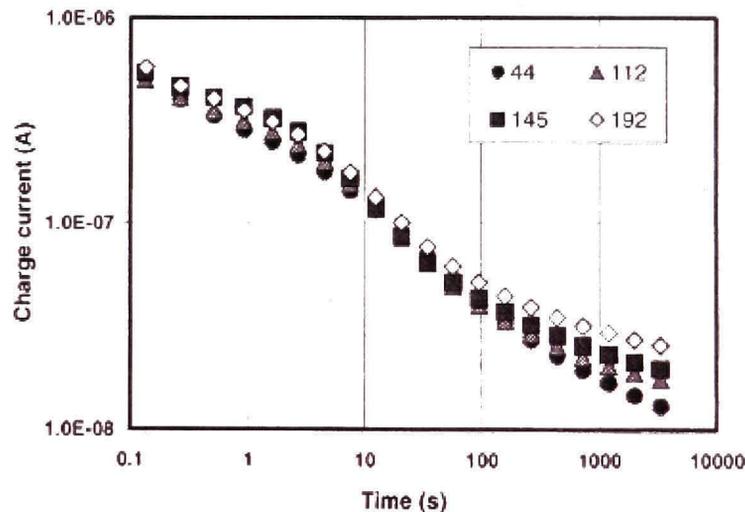


Figure 4.13 *Courant de polarisation de l'isolation d'une maquette de transformateur à 1.2% d'humidité. (les chiffres représentent le nombre d'heures de vieillissement).*

(Tirée de ((Noirhomme et al., 2005))

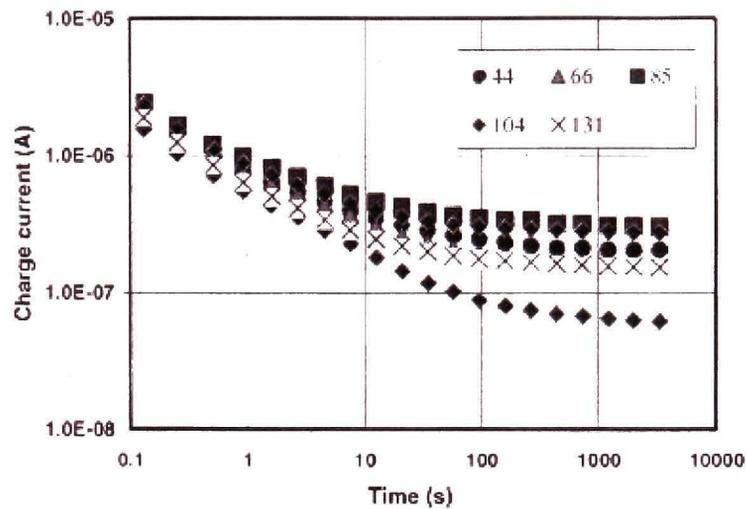


Figure 4.14 *Courant de polarisation de l'isolation de maquettes de transformateur à un taux d'humidité de 3.48%.*

(Tirée de ((Noirhomme et al., 2005)))

Source : Cette figure est tirée de l'article de M. B. Noirhomme et al.: *Application of Dielectric Response Techniques for the Condition Assessment of Power Transformers*, p.274, juillet 2005.

4.3.4 Conclusion

Le taux d'humidité du papier de l'isolation est déterminé selon les courbes isothermes d'Oommen à parti des analyses d'huile. Cependant cette méthode n'est pas précise en basse température et, de plus, il est difficile d'atteindre l'équilibre en humidité. Des applications commerciales ont été développées pour déterminer l'humidité du papier à l'aide des mesures PDC mais ses applications ne sont pas au point.

L'humidité du papier augmente l'amplitude du courant de charge de la même façon que le vieillissement du papier. Jusqu'à maintenant aucune étude n'a permis de différencier l'influence de ces deux paramètres.

4.4 Effet de la température sur la réponse du diélectrique

4.4.1 Introduction

Un des paramètres importants affectant la réponse diélectrique d'un matériau est la température. Sur les vrais transformateurs, la température de mesure n'est pas contrôlée et est habituellement reliée à la température ambiante. Afin de comparer les mesures diélectriques entre elles, prises à différentes températures, il est important de mesurer l'influence de ce paramètre.

4.4.2 Théorie

Les mesures diélectriques de plusieurs matériaux diélectriques ne varient pas en amplitude mais seulement en fréquence avec la variation de la température. C'est le cas de l'isolation papier/huile. La dépendance à la température suit la loi d'Arrhenius représentée par l'équation 4.4. Ceci implique que la forme spectrale de la mesure diélectrique de l'isolation du diélectrique n'est pas modifiée par la température, elle subit seulement un déplacement latéral dans le domaine des fréquences. Ceci permet dans plusieurs cas de normaliser la courbe en effectuant un déplacement latéral afin de faire coïncider plusieurs courbes prises à différentes températures. La courbe de normalisation est appelée *courbe maîtresse*. (Hill et Dissado 1982). L'équation d'Arrhenius est la suivante :

$$a_T = Ae^{-E_a/RT} \quad (4.4)$$

Où

a_T représente le déplacement (Hz)

E_a représente l'énergie d'activation (J/mol)

R représente la constante des gaz parfait égale à 8.314 J / (K mol)

T représente la température en Kelvin

A est appelé facteur pré-exponentiel

La représentation de la dépendance en température peut se faire dans un graphique semi-logarithmique de la fréquence en fonction de l'inverse de la température. Cette représentation est appelée graphique d'Arrhenius (McMurray et Fay, 2001). La dépendance à la température dans le graphique d'Arrhenius est représentée par la droite de l'équation 4.5.

$$\ln a_T = -\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T}\right) + \ln A \quad (4.5)$$

Où le terme $-\frac{E_a}{R}$ représente la pente de la droite. À partir des données de la droite, il est donc possible de calculer l'énergie d'activation.

Il est aussi possible de comparer deux mesures prises à différentes températures. Il suffit de soustraire l'équation 4.6 de l'équation 4.7. On élimine ainsi le facteur pré-exponentiel, et on obtient l'équation 4.8.

$$\ln a_{T_1} = \ln A - \frac{E_a}{RT_1} \quad (4.6)$$

$$\ln a_{T_2} = \ln A - \frac{E_a}{RT_2} \quad (4.7)$$

$$\boxed{\ln \frac{a_{T_2}}{a_{T_1}} = \left(\frac{E_a}{RT}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} \quad (4.8)$$

Lorsqu'on effectue la normalisation des courbes en température, il est important de le faire par rapport au pic de relaxation puisque c'est le mécanisme de relaxation qui est fonction de la température. Lorsqu'il y a normalisation des courbes, c'est toujours par rapport à la constante de temps du pic de relaxation ω_p . Aussi, la réponse diélectrique d'un matériau peut posséder plusieurs mécanismes de relaxation arbitrairement appelés α , β , γ ..., en fonction de leur ordre d'apparition lorsque la fréquence augmente. Ces mécanismes de relaxation représentent souvent des phénomènes distincts qui ne répondent pas aux mêmes lois. Ce phénomène est remarqué lors de la formation de la courbe maîtresse. Lorsque la

forme spectrale est modifiée à partir d'une certaine fréquence avec la température, ceci peut être causé par la présence d'un deuxième mécanisme de relaxation qui ne répond pas à la loi d'Arrhenius. Les deux mécanismes peuvent être deux mécanismes de pertes séparés l'un de l'autre, ou bien un mécanisme de perte et un processus de conduction directe ((Jonscher, 1983)). Comme mentionné précédemment, (Densley et Gupta, 2001) observent deux mécanismes de relaxation pour le papier imprégné d'huile, l'un causé par l'huile et l'autre par le papier. Ces deux derniers réagissent de manière différente à la température. Pour l'étude qui fait l'objet de ce travail, seulement un mécanisme de relaxation a été observé. C'est le mécanisme en basse fréquence.

CHAPITRE 5

MAQUETTES DES TRANSFORMATEURS

5.1 Introduction

Suite aux informations obtenues de la littérature sur la sensibilité des mesures diélectriques au vieillissement de l'isolation, cette méthode de diagnostic de l'isolation a été sérieusement envisagée par Hydro-Québec qui a investi dans le projet *Complexe papier/huile*. L'objectif principal de cette étude était de séparer le vieillissement du papier des autres contributions à la mesure : l'humidité et le vieillissement de l'huile sur des transformateurs maquettes et sur des échantillons d'enroulement en laboratoire pour compléter l'information.

Pour la première étape de l'expérimentation utilisant des maquettes de transformateurs de 100 kVA, on a produit un vieillissement accéléré de l'isolation par élévation de la température. Cette étape a permis de vérifier s'il existe une corrélation entre le vieillissement du complexe papier/huile et les mesures RVM, PDC et FDS. Les paramètres servant d'indicateur de vieillissement étaient le degré de polymérisation (DP) du papier et le facteur de puissance (FP) de l'huile.

Les premiers résultats ont été obtenus en 2004 sur deux groupes de maquettes de transformateurs. Les mesures ont été analysées par Gharbi Hassan et ont fait l'objet d'un mémoire (Hassan, 2006). Les résultats ont démontré qu'il n'y avait pas de corrélation entre le vieillissement du papier (DP) et les mesures RVM. Une corrélation a par ailleurs été observée avec les mesures PDC et FDS pour les maquettes ayant un taux d'humidité inférieur à 2.3%. En ce qui concerne le facteur de puissance, une corrélation a été observée pour les cuves de moins de 3% d'humidité. Basé sur ces résultats préliminaires, le vieillissement de deux autres groupes de maquettes a été entrepris.

L'analyse des résultats de ces dernières mesures fait l'objet de ce chapitre. La corrélation entre les mesures diélectriques sur le complexe papier/huile et le vieillissement du papier (DP) et le vieillissement de l'huile (FP) a été étudiée dans un premier temps. Dans un deuxième temps, les mesures diélectriques ont été modélisées, utilisant le modèle géométrique XY. Cette modélisation a permis de tracer les courbes de la permittivité du papier imprégné et de vérifier si la corrélation avec le DP en était améliorée. Puis finalement, une étude sur la dépendance à la température des mesures diélectriques a été effectuée sur deux groupes de maquettes. Les mesures effectuées sur les échantillons d'enroulement sont présentées au chapitre 6.

5.2 Description des maquettes

Les maquettes, qu'on peut voir à la Figure 5.1, ont été construites de manière à représenter les transformateurs de puissance et ont été assemblées à l'atelier de Trois-Rivières d'Hydro-Québec. Des matériaux usagés ont été utilisés pour le noyau, la cuve et le couvercle provenant de transformateurs de distribution de 100 kVA. Les pièces ont été nettoyées et recyclées avant d'être utilisées.

Des matériaux neufs ont été utilisés pour la partie isolation, qui est la partie qui fait l'objet de cette étude. Le fil de cuivre des enroulements provient de la compagnie Austral. Sa section rectangulaire est de 2.286 mm par 6.55 mm et il est enroulé de sept couches de papier Kraft de type Tullis Russel CE de 50 μm d'épaisseur contenant 0.8% de N_2 . Deux types d'huile ont été utilisés pour l'expérimentation, l'huile Luminol Tri de Petro-Canada et l'huile Nitro 10CX de la compagnie Nynas. L'huile a été traitée afin d'abaisser le facteur de puissance après une contamination par la peinture recouvrant les cuves. La peinture initiale a du être changée par de la peinture époxy utilisée dans les transformateurs de puissance et fournie par la compagnie ABB.



Figure 5.1 *Photo des maquettes.*

(Tirée de (Noirhomme et al., 2005))

Source : Cette photo est tirée d'une présentation Power Point de M. B. Noirhomme et al., *Projet durée de vie des transformateurs, Évaluation du complexe papier-huile*, 2005.

Les enroulements basse et haute tension sont cylindriques. La hauteur est de 28 cm pour l'enroulement extérieur. Le noyau possède 288 tours avec un total de 12 rangées et il y a 24 tours par rangées. Un carton sépare l'enroulement basse tension de la haute tension ainsi que des canaux d'espacements. Avant de refermer le couvercle, 20 échantillons papier sur cavalier de cuivre ont été installés dans chaque cuve, pour prélèvements ultérieurs destinés à faire le suivi du vieillissement. Ces échantillons subissent le même vieillissement en température que l'isolation des enroulements. Ils serviront donc de témoin pour la mesure du DP et pour les mesures diélectriques en laboratoire. Le Tableau 5.1 présente les dimensions de la partie isolation des maquettes.

Tableau 5.1

Paramètres de la partie magnétique des maquettes de transformateurs

Partie de l'isolation	Éléments mesurés	Dimensions
Enroulement haute tension (extérieur)	Hauteur totale	28 cm
	Hauteur totale des conducteurs	19 cm
	Nombre de tours	288
	Nombre de rangées	12
	Tours par rangées	24
Enroulement basse tension (intérieur)	Hauteur totale	28 cm
	Hauteur totale des conducteurs	19 cm
	Nombre de tours	72
	Nombre de rangées	3
	Tours par rangées	24
Espace entre les enroulements	Carton	0.26 mm
	Espacement	20.5 mm
Conducteur	Barre de cuivre	2.286mm X 6.55mm
Isolation des conducteurs	Papier Tullis Russel Kraft CE (7 couches)	50 µm
Huile	Nynas 10CX	
	Luminol Tri de Petro-Canada	

5.3 Processus de vieillissement

Comme mentionné précédemment, il y a 16 maquettes séparées en quatre groupes. Initialement, l'isolation des cuves a été conditionnée de manière à obtenir différents pourcentages d'humidité du papier, soit de 0.75 à 4%, ceci afin de différencier l'effet de l'humidité de celui du vieillissement. Un seul groupe est isolé avec de l'huile Luminol Tri qui est une huile qui s'oxyde très peu. On s'attend à ce que les caractéristiques de cette huile varient très peu pendant toute la durée du vieillissement donc n'apportent pas de contributions aux mesures diélectriques. Le vieillissement et les mesures des groupes 1 et 4 ont débuté en février 2003 alors que ceux des groupes 2 et 3 ont débuté en octobre 2004. Les

températures de vieillissement sont de 95, 115, 125 et 135°C selon le groupe de maquettes. Le Tableau 5.2 présente un portrait des conditions initiales des cuves, comprenant entre autre, l'identification des groupes des cuves, le type d'huile utilisé, le taux d'humidité et le DP initial du papier.

Tableau 5.2

Conditions initiales des cuves

Groupe	No cuve	Type d'huile	% d'H ₂ O	DP	T°C de vieillissement	Date de la 1 ^{ère} mesure
G1	4	Nynas 10CX	1.2	1180	135	Mars 2003
	6	Nynas 10CX	1.97	1096		
	8	Nynas 10CX	3.48	1047		
	12	Nynas 10CX	0.75	1132		
G2	2	Nynas 10CX	1.43	1154	115	Oct.2004
	3	Nynas 10CX	4.17	944		
	5	Nynas 10CX	3.39	939		
	10	Nynas 10CX	2.24	1135		
G3	13	Luminol	2.68	1049	95	Oct. 2004
	14	Luminol	3.7	1048		
	15	Luminol	2.05	1075		
	16	Luminol	1.39	1080		
G4	1	Nynas 10CX	1.7	1100	125	Février 2003
	7	Nynas 10CX	2.3	989		
	9	Nynas 10CX	3.3.	1047		
	11	Nynas 10CX	1.31	1171		

Un cycle de vieillissement en température complet comprend la montée en température jusqu'à la température de vieillissement, cette température est maintenue pendant un temps déterminé nécessaire au vieillissement. Ensuite, la température est abaissée à 55°C, qui est la température requise pour l'échantillonnage de l'huile. Cette température est maintenue 48 heures afin de permettre au système papier/huile d'atteindre l'équilibre en humidité avant l'échantillonnage. C'est au moment de l'échantillonnage de l'huile qu'un échantillon papier

sur cavalier est retiré de la cuve pour une mesure du DP. Par la suite, la température de la cuve est abaissée à 25°C pour un minimum de 24 heures avant la prise des mesures diélectriques (RVM, FDS, PDC). Ces 24 heures d'attente sont nécessaires au système pour atteindre l'équilibre en humidité puisqu'on sait que cette dernière affecte les mesures diélectriques.

5.4 Mesures

5.4.1 Caractérisation de l'huile

Une caractérisation de l'huile a été effectuée après chaque cycle de vieillissement pour observer sa condition. Ceci consistait surtout à déterminer ses propriétés physico-chimiques et accessoirement à déterminer le contenu en gaz dissous. Ces essais ont été effectués au laboratoire Jeanne d'Arc d'Hydro-Québec. Le Tableau 5.3 présente la liste des essais effectués. C'est le facteur de puissance qui a servi d'indicateur de vieillissement de l'huile. Cette mesure a été prise selon la norme ASTM D924 à 100°C.

Tableau 5.3

Caractérisation de l'huile

Propriétés physico-chimiques	Unités de mesure	Gaz dissous	Unités de mesure
Rigidité diélectrique	kV (2mm)	Hydrogène	ppm
Acidité	mg KOH/g d'huile	Oxygène	%
Tension interfaciale	mN/m	Azote	%
Pertes diélectriques	% (à 100°C)	Dioxyde de carbone	ppm
Couleur	Unités ASTM	Acétylène	ppm
Inhibiteur	ppm de DBPC	Éthylène	ppm
Eau	ppm	Éthane	ppm
		Méthane	ppm
		Monoxyde de carbone	ppm

5.4.2 Mesure du degré de polymérisation du papier

Les mesures du DP du papier ont été effectuées dans les laboratoires de l'IREQ. La mesure s'est effectuée selon la norme ASTM D4243 sur les échantillons papier sur cavalier retirés des cuves après chaque cycle de vieillissement.

5.4.3 Mesures diélectriques

Comme mentionné précédemment, les mesures sur les maquettes ont été effectuées dans les domaines temporel et fréquentiel. L'appareil IDA 200 a été utilisé pour les mesures dans le domaine des fréquences. La plage de fréquence variait de 0.003 Hz à 1 kHz. La tension d'application était de 200 Volts. Le branchement était de type UST entre la haute et basse tension, la cuve étant connectée à la terre.

Dans le domaine du temps, les courants de polarisation et dépolarisation ont été mesurés avec l'appareil Keithley 237, excepté dans le cas des mesures prises pour l'étude de la variation de la température où c'est l'appareil *PDC Analyser* qui a été utilisé. Les temps de polarisation et dépolarisation étaient de 5000 et 2500 secondes respectivement. La tension d'application était de 1000 V. Le branchement était de type GST entre la haute tension et la cuve.

5.5 Présentation des résultats et discussion

Comme mentionné à la section 2.2, le comportement du papier est visible aux basses fréquences dans le domaine des fréquences et aux temps longs dans le domaine du temps. C'est pourquoi les mesures ont été analysées aux basses fréquences, soit à 0.003, 0.01 et 0.1 Hz. De plus, la mesure de la tangente à 60 Hz est une mesure fréquemment utilisée lors de la maintenance des transformateurs (essai Doble) mais dont la pertinence est remise en question. En ce qui concerne les mesures du courant de polarisation, l'analyse est limitée aux temps longs, soit à 5000 secondes.

5.5.1 Corrélation entre le DP et la tangente delta

5.5.1.1 Mesures dans le domaine des fréquences

La Figure 5.2 illustre la variation des pertes représentées par la tangente delta pour une cuve sèche à différentes étapes du vieillissement. On remarque que les pertes augmentent graduellement avec la diminution du DP. Pour les fréquences étudiées, à 0.01 et 0.003 Hz, l'augmentation des pertes est évidente. À 0.1 et 63 Hz, il y a un chevauchement des mesures pour des DP inférieurs à 615 dû à la faible dispersion des mesures. Aucune corrélation ne peut donc être établie à ces fréquences. La corrélation à 0.01 et 0.003 Hz de la tangente delta en fonction du DP a été observée pour les cuves possédant un taux d'humidité de moins de 2.25%. Les résultats aux fréquences de 0.01 et 0.003 Hz, pour l'ensemble des cuves sèches des groupes 1, 2 et 4, sont présentés à la Figure 5.3 et Figure 5.4.

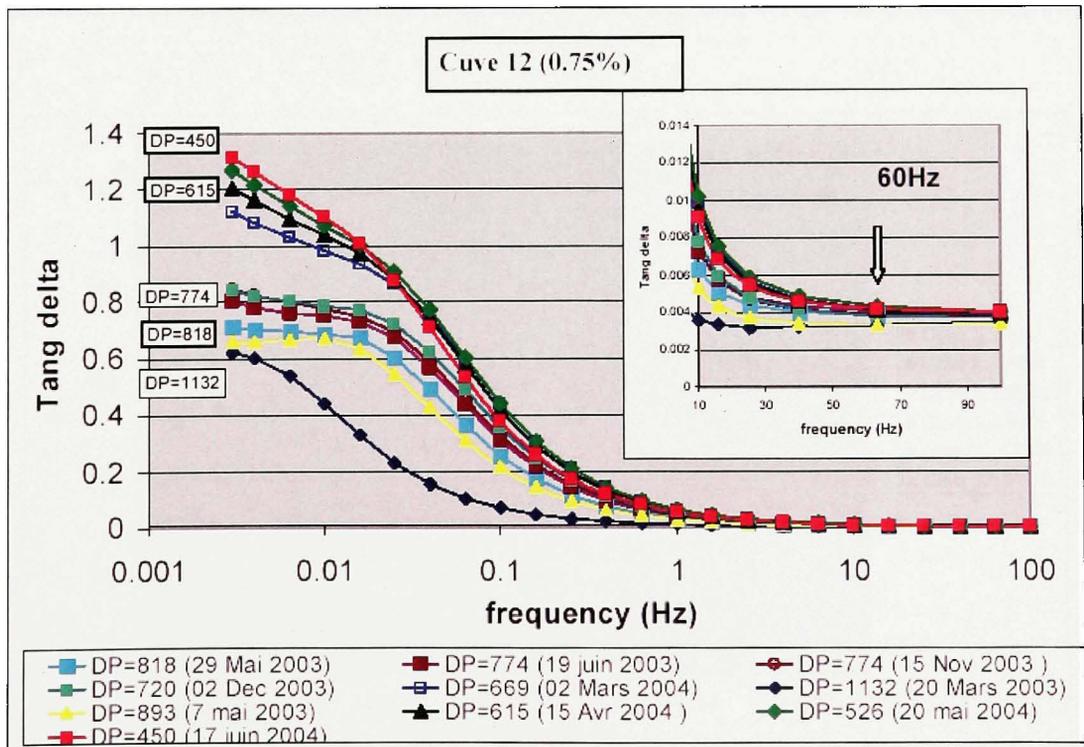


Figure 5.2 Variation typique des pertes en fonction de la fréquence pour une cuve sèche durant le vieillissement.

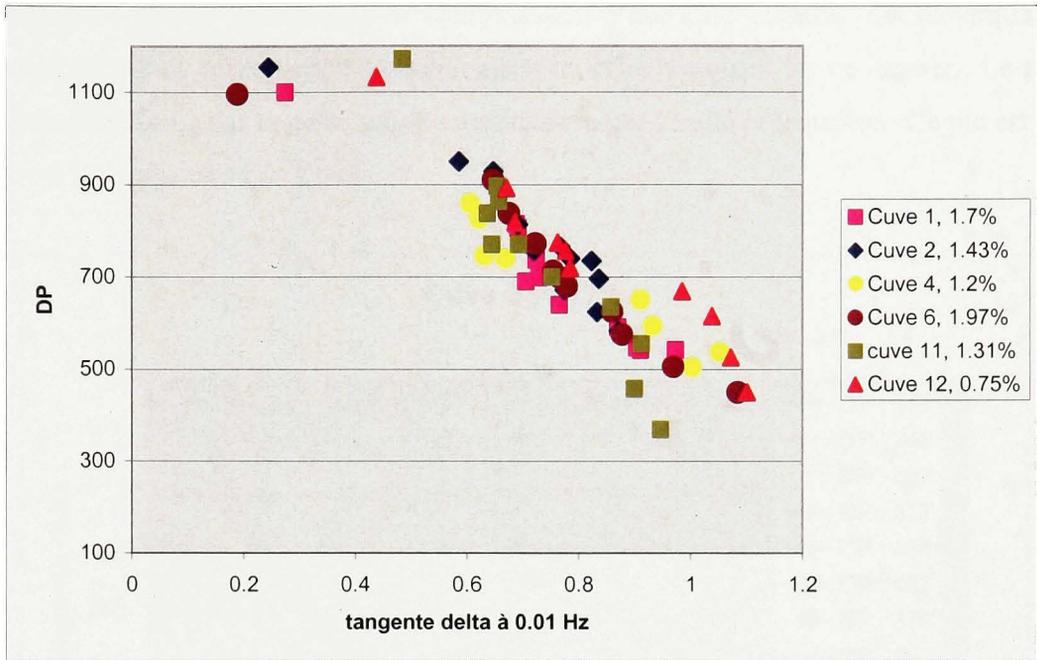


Figure 5.3 *Corrélation entre le DP et la $\tan \delta$ à 0.01 Hz pour les cuves sèches des groupes 1, 2 et 4.*

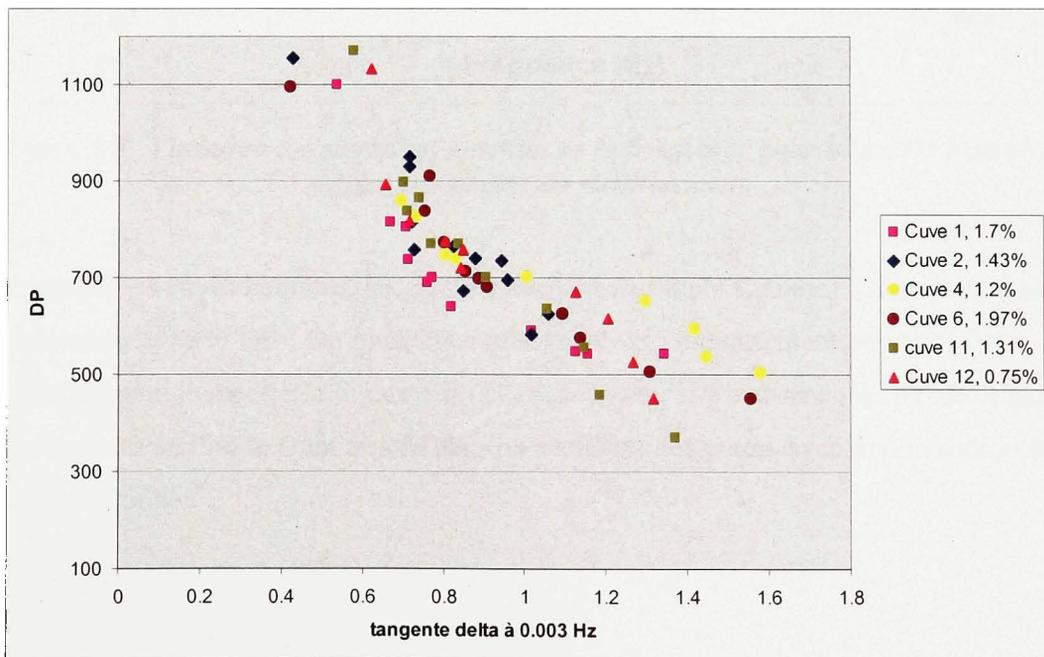


Figure 5.4 *Corrélation entre le DP et la $\tan \delta$ à 0.003 Hz pour les cuves sèches des groupes 1, 2 et 4.*

La Figure 5.5 montre un exemple de vieillissement d'une cuve humide. On remarque qu'il n'y a pas de pic de relaxation, l'humidité ayant un effet masquant sur ce dernier. Le pic de relaxation est formé par la polarisation interfaciale entre l'huile et le papier. Ce pic est aussi associé à la conductivité de l'huile.

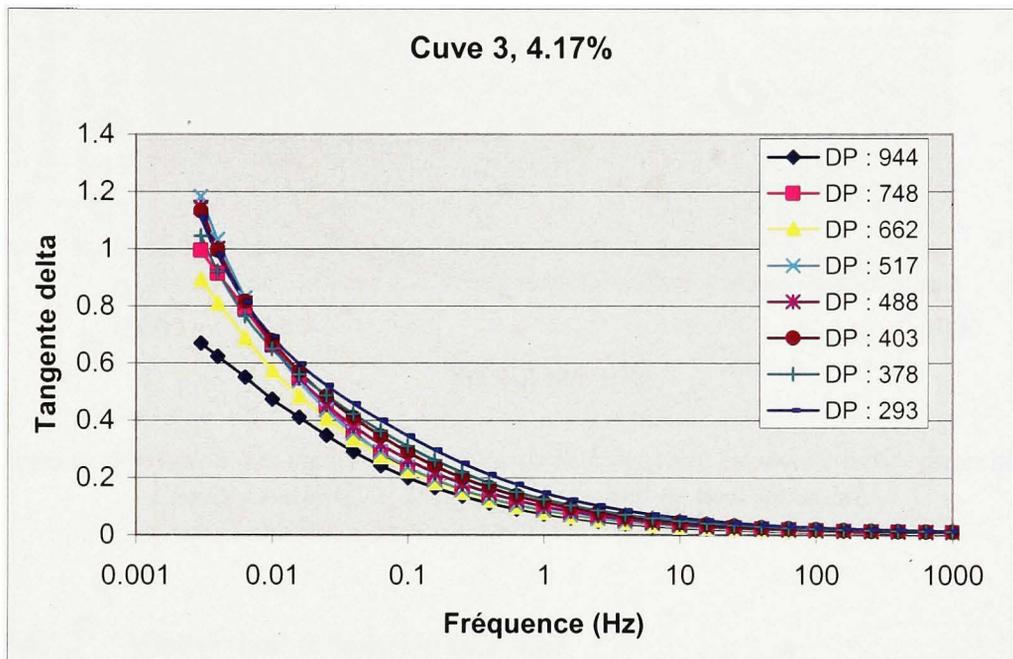


Figure 5.5 *Variation des pertes en fonction de la fréquence pour une cuve humide, à différentes étapes du vieillissement.*

Tout comme les cuves humides, les cuves contenant de l'huile Luminol Tri ne présentent pas de corrélation avec le DP. De plus, elles présentent un comportement semblable aux cuves humides, comme le montre la Figure 5.6. C'est-à-dire qu'il y a absence du pic de relaxation, la conductivité de l'huile étant très faible. La variation des pertes avec la diminution du DP est aussi très faible.

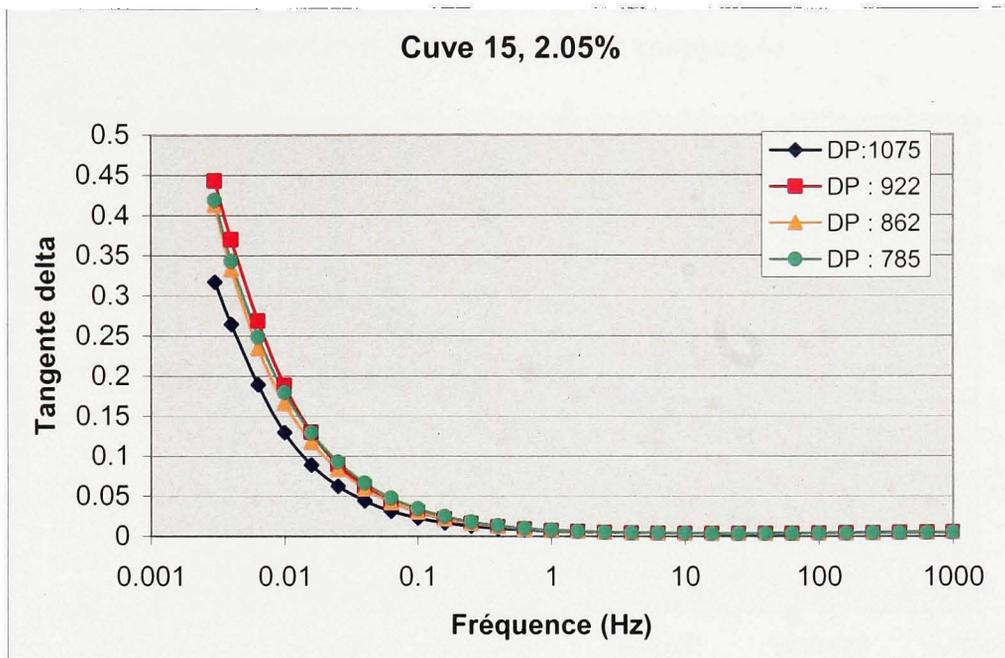


Figure 5.6 Variation des pertes en fonction de la fréquence pour une cuve contenant de l'huile Luminol Tri à différentes étapes du vieillissement.

5.5.1.2 Mesure dans le domaine du temps

Les résultats obtenus avec les mesures du courant de polarisation aux temps longs (5000 secondes) sont semblables à ceux obtenus pour les mesures de la tangente delta. C'est-à-dire qu'une corrélation avec le DP est observée pour les cuves ayant un taux d'humidité inférieur à 2.25% seulement et que les cuves contenant de l'huile Luminol Tri ne présentent aucune corrélation avec le DP. La Figure 5.7 illustre le comportement du courant de polarisation d'une cuve sèche. On remarque une augmentation du courant de polarisation avec la diminution du DP. La Figure 5.8 montre la corrélation entre le courant de polarisation et le DP à 5000 secondes pour les cuves des groupes 1 et 4. On remarque que le courant de polarisation est plus élevé pour les cuves humides. En éliminant les cuves humides, on obtient le graphique de la Figure 5.9.

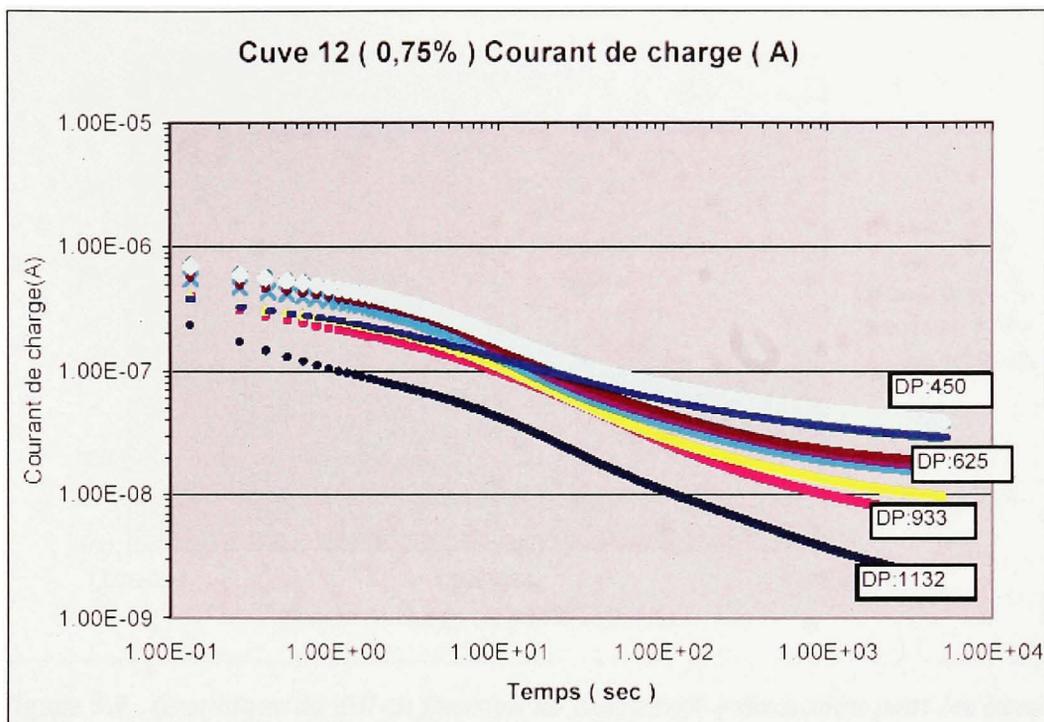


Figure 5.7 Variation du courant de polarisation en fonction du temps pour une cuve sèche.

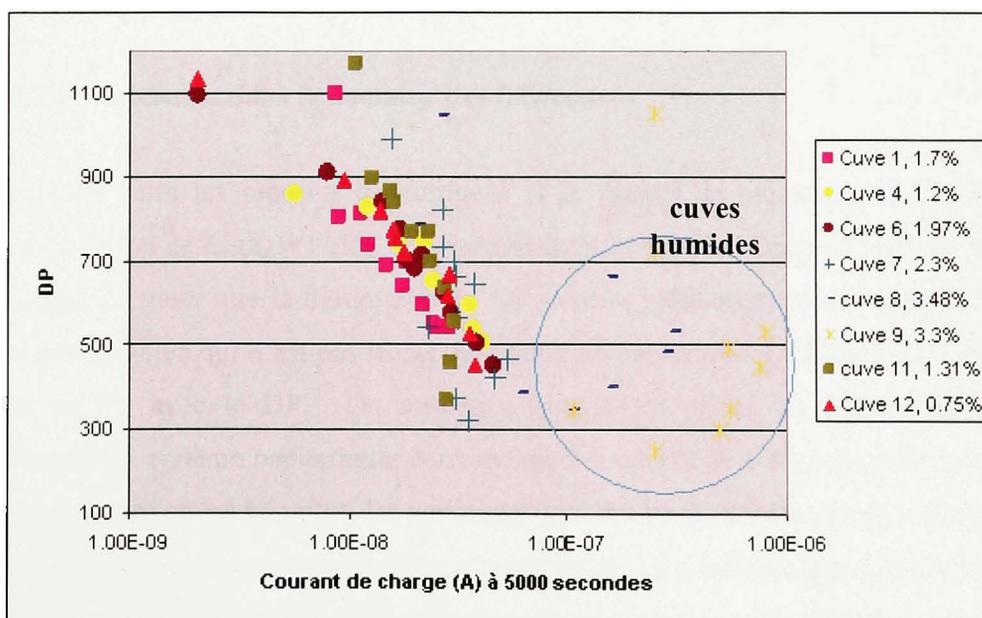


Figure 5.8 Graphique du DP en fonction du courant de polarisation pour les cuves des groupes 1 et 4

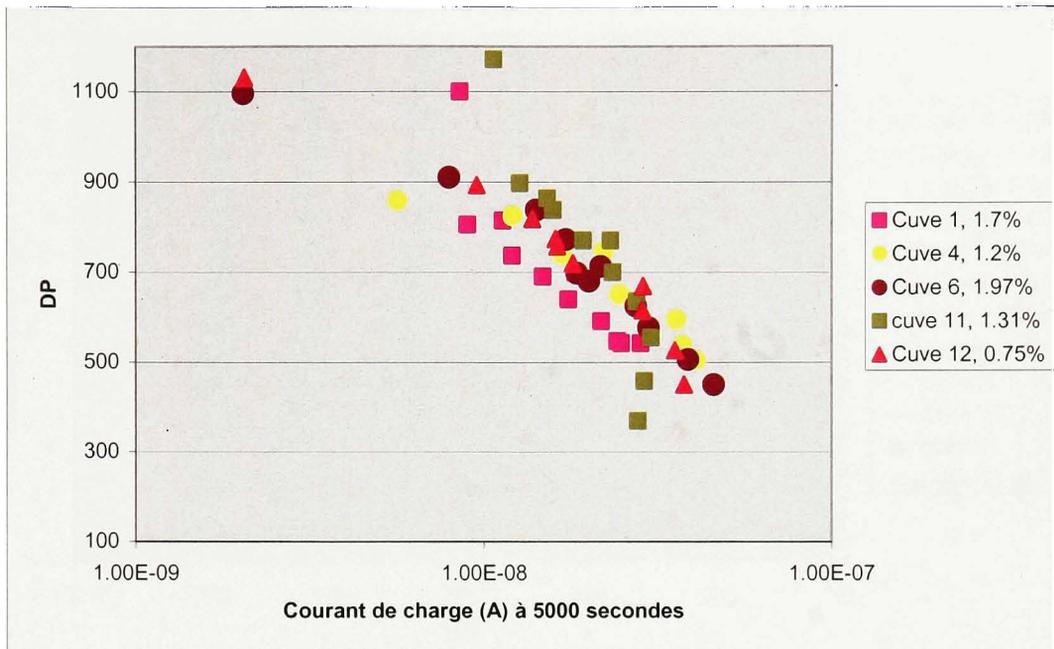


Figure 5.9 Graphique du DP en fonction du courant de polarisation pour les cuves sèches des groupes 1 et 4.

5.5.2 Corrélation avec le facteur de puissance de l'huile et la tangente delta

5.5.2.1 Mesures dans le domaine des fréquences

La corrélation entre les mesures diélectriques et le facteur de puissance de l'huile a été étudiée dans le but de dégager l'effet du vieillissement de l'huile. Dans un premier temps, il est important de noter que la diminution du DP avec le vieillissement du complexe papier huile est constante ce qui n'est pas le cas du facteur de puissance. La Figure 5.10 illustre la variation du FP avec le DP. On remarque que le FP atteint un maximum pour un vieillissement du système papier/huile correspondant à un DP de 600, puis tend à diminuer. Pour ce qui est des cuves humides, les variations sont moins prononcées et les valeurs du FP sont aussi plus petites comparativement aux cuves sèches. Le facteur de puissance de l'huile des cuves contenant de l'huile Luminol ne sont pas représentés sur le graphique en raison de leur très faible valeur, c'est pourquoi aucune conclusion ne peut être tirée pour ces dernières.

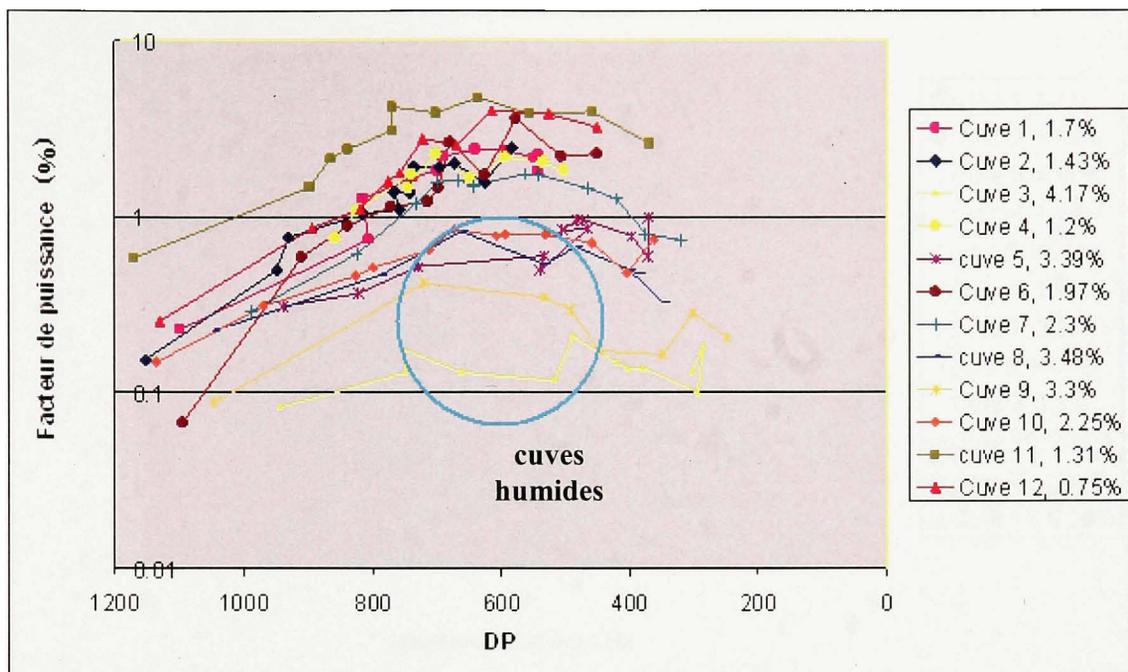


Figure 5.10 *Facteur de puissance de l'huile en fonction du DP du papier.*

Le comportement du FP qui augmente puis diminue, explique le faible taux de corrélation aux fréquences de 0.003 et 0.01 Hz où la tangente augmente graduellement (Figure 5.2). Cependant il existe une corrélation avec la tangente delta à 0.1 Hz pour les groupes de cuves 1, 2 et 4, tel qu'illustré à la Figure 5.11. À la Figure 5.12, seulement les cuves sèches sont représentées à l'exception de la cuve 5. On remarque sur les mesures de la cuve 7 que la variation du FP suit la tangente delta. Le FP augmente jusqu'à un maximum puis diminue. On constate également que le FP de l'huile des cuves humides plafonne à des faibles valeurs. Nous n'avons pas d'explications claires pour ces observations, elles pourraient être liées aux échanges de produits polaires entre le papier et l'huile ou entre l'eau et l'huile. Il se peut qu'à la fréquence de 0.1 Hz, ce soit la mesure de l'huile qui influence le plus la tangente delta, d'où sa variation avec le facteur de puissance de l'huile.

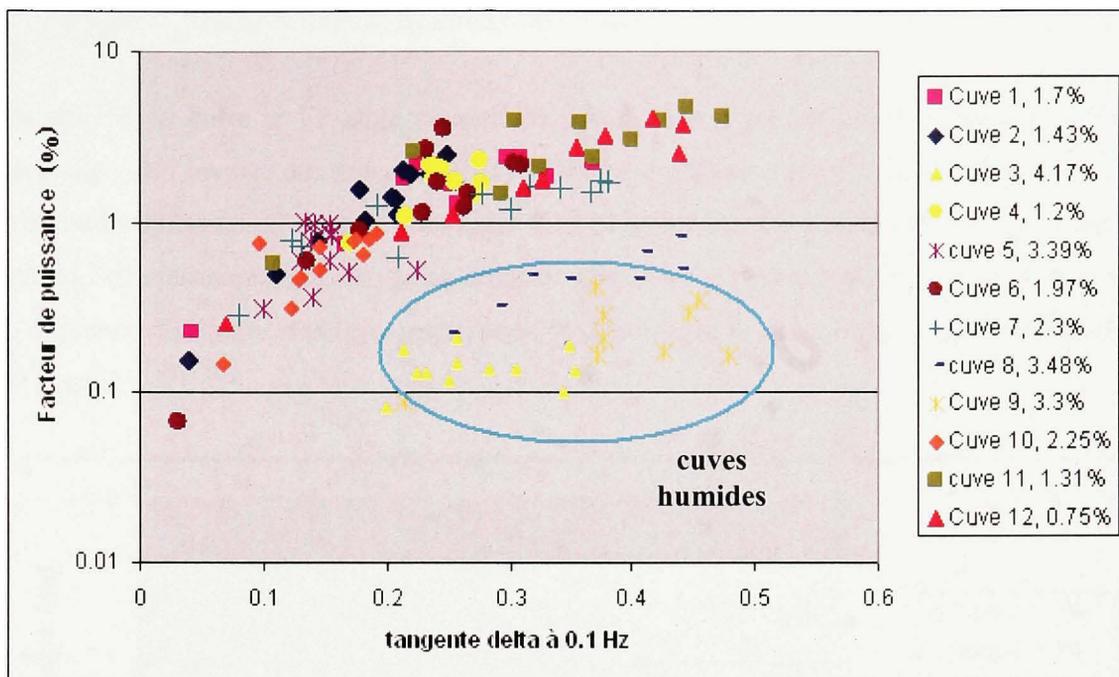


Figure 5.11 Graphique du FP en fonction de la $\tan \delta$ pour les cuves des groupes 1, 2 et 4 à 0.1 Hz.

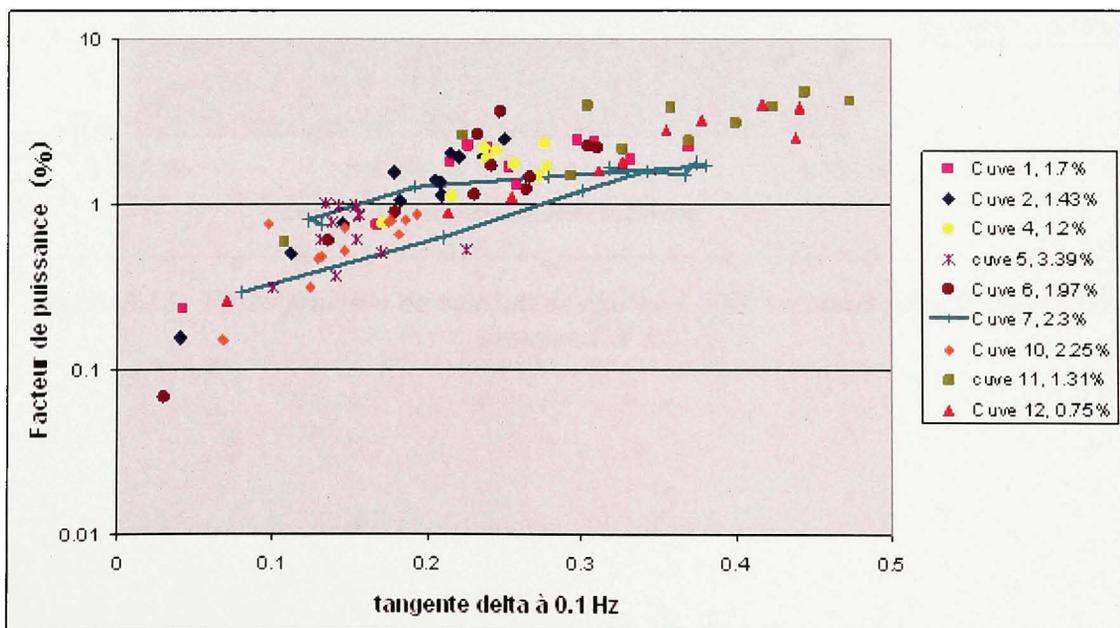


Figure 5.12 Graphique du FP en fonction de la $\tan \delta$ pour les cuves sèches des groupes 1, 2 et 4 à 0.1 Hz.

5.5.2.2 Mesures dans le domaine du temps

La corrélation entre le FP et le courant de polarisation a été effectuée seulement à 5000 secondes. À l'inverse des mesures FDS, à 5000 secondes une corrélation est observée pour les cuves sèches, tel qu'illustré aux Figure 5.13 Figure 5.14. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les mesures du courant de polarisation ont été prises entre la haute tension et la cuve. L'influence de l'huile étant plus importante, il se peut que la mesure soit plus représentative de l'huile.

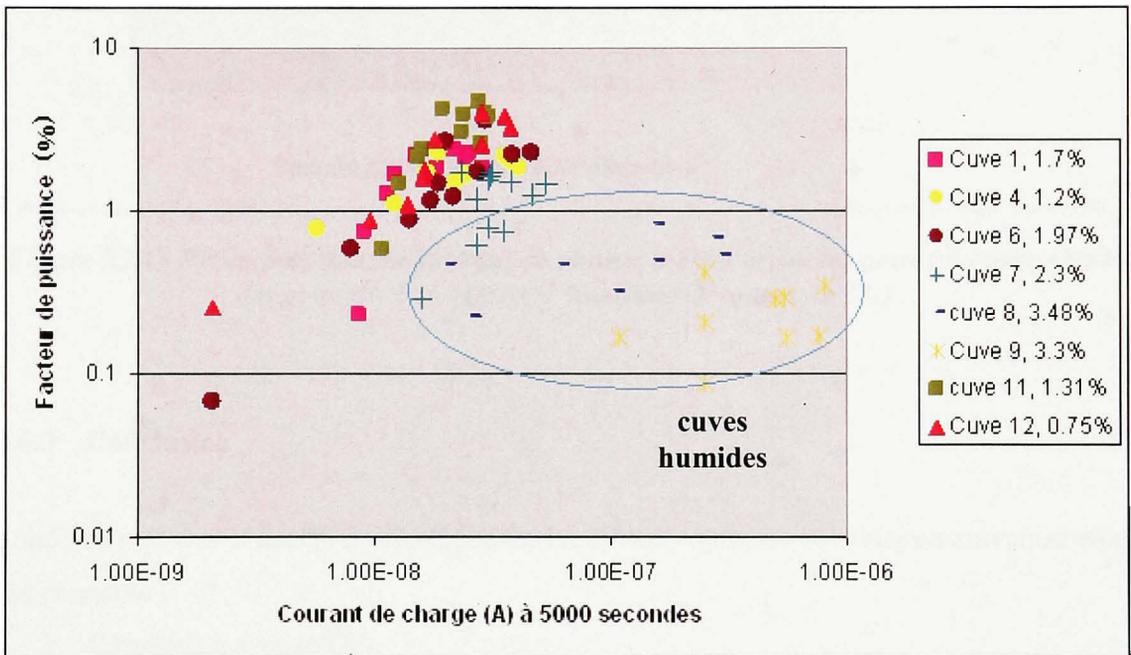


Figure 5.13 *FP en fonction du courant de charge à 5000 secondes pour les cuves des groupes 1 et 4.*

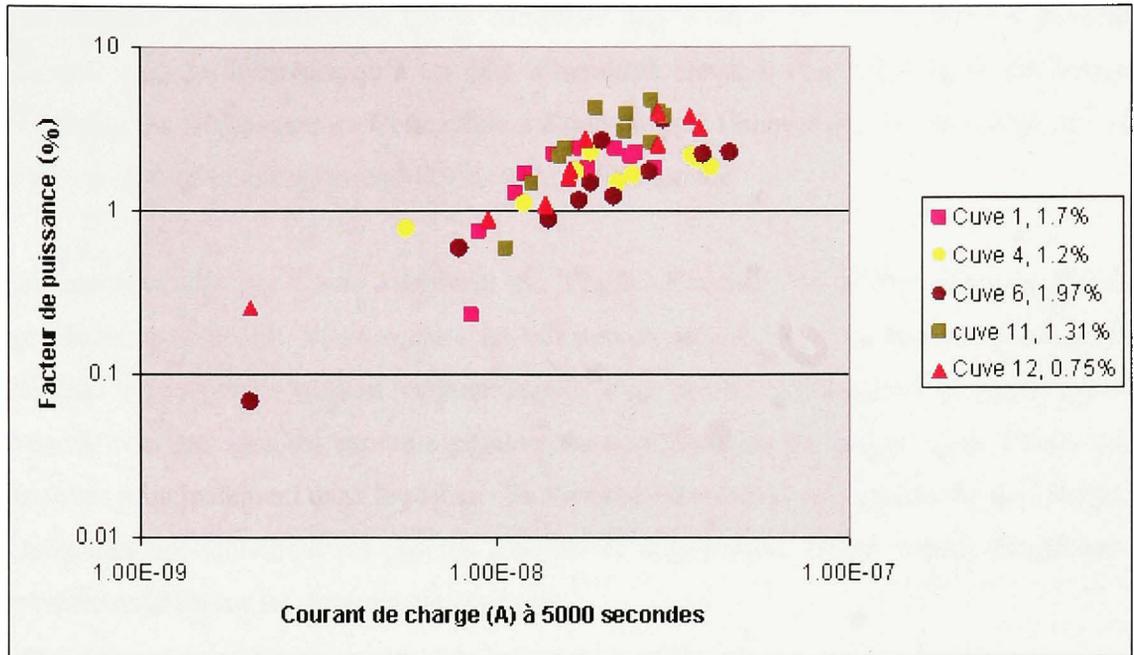


Figure 5.14 *FP en fonction du courant de charge à 5000 secondes pour les cuves sèches des groupes 1 et 4 (taux d'humidité de moins de 2%).*

5.5.3 Conclusion

Suite aux mesures et analyses effectuées sur les cuves, on tire les conclusions suivantes en ce qui concerne :

1. Corrélation avec le DP
 - Il existe une corrélation apparente entre le DP et la tangente delta à 0.003 et 0.01 Hz pour les cuves contenant un taux d'humidité inférieur à 2.25%.
 - Il existe une corrélation entre le DP et le courant de polarisation à 5000 secondes pour les cuves ayant un taux d'humidité inférieur à 2.25%.
 - Aucune corrélation n'est remarquée sur les cuves humides.
 - Aucune corrélation n'est remarquée sur les cuves contenant de l'huile Luminol Tri.

Ces mesures ont été effectuées sur le complexe papier/huile. Il a été observé à plusieurs reprises dans la littérature qu'à un taux d'humidité élevé, il était difficile de différencier l'humidité du vieillissement. Cette étude a démontré que l'humidité a un effet masquant sur le pic de relaxation des mesures FDS et sur le vieillissement.

Les résultats sur les cuves contenant de l'huile Luminol Tri n'ont démontré aucune corrélation avec le DP. Cette huile s'est très peu oxydée et le FP est demeuré à un niveau très bas. Ces résultats laissent supposer que ce n'est pas le vieillissement du papier qui est mesuré. On sait que les produits polaires du vieillissement du papier et de l'huile sont contenus principalement dans le papier. En l'absence de produit de dégradation de l'huile, le papier contient seulement ses propres produits de dégradation, ce qui semble insuffisant à produire un effet sur les mesures diélectriques.

2. Corrélation avec le FP

- Il n'existe aucune corrélation entre le FP et la tangente delta à 60 Hz.
- Il existe une corrélation entre la tangente delta et le FP à une fréquence de 0.1 Hz pour les cuves ayant un taux d'humidité inférieur à 2.3%.
- Il existe une corrélation entre le FP et le courant de polarisation à 5000 secondes.

5.6 Modélisation

Il a été mentionné à plusieurs reprises que le but de ce travail était de séparer l'effet de l'humidité de celui du vieillissement dans un premier temps, et de séparer l'effet du vieillissement de l'huile de celui du papier dans un deuxième temps. Il a aussi été vu que l'isolation papier/huile peut être représentée par un circuit équivalent et plus spécifiquement par le modèle XY qui tient compte de la géométrie du transformateur. Afin de préciser l'influence du vieillissement du papier sur les mesures diélectriques, une modélisation de la permittivité du papier et de l'huile séparément a été effectuée, basée sur le modèle géométrique XY.

5.6.1 Équation de la permittivité du système papier/huile d'un transformateur

Comme vu à la section 3.4 de la partie théorique, la permittivité complexe d'un transformateur est déterminée en fonction de la permittivité complexe du papier et de l'huile et en fonction de sa géométrie. L'équation 3.3 étant l'expression de la permittivité du système d'isolation du transformateur :

$$\varepsilon(\omega, T)_{sfo} = \frac{Y}{\frac{1-X}{\varepsilon_{\text{espacement}}} + \frac{X}{\varepsilon_{\text{barrière}}}} + \frac{1-Y}{\frac{1-X}{\varepsilon_{\text{huile}}} + \frac{X}{\varepsilon_{\text{barrière}}}}$$

Sachant que le carton, qui compose les canaux d'espacement, et le papier, qui compose la barrière des enroulements, sont des matériaux de même nature, il est possible d'écrire que les propriétés du carton et du papier sont semblables, tenant compte du fait que le carton est formé exclusivement de papier. On peut donc écrire que la permittivité du papier est égale à celle du carton, c'est-à-dire $\varepsilon_{\text{espacement}} = \varepsilon_{\text{barrière}} = \varepsilon_{\text{papier}}$. Alors, l'équation de la permittivité complexe du transformateur peut s'écrire comme suit :

$$\varepsilon_{sfo} = \left[Y \cdot \varepsilon_{\text{papier}} + \frac{1-Y}{\frac{1-X}{\varepsilon_{\text{huile}}} + \frac{X}{\varepsilon_{\text{papier}}}} \right] \quad (5.1)$$

Où

$\varepsilon_{\text{papier}}$ est la permittivité complexe du papier.

5.6.2 Équation de la permittivité du papier

La permittivité du papier peut être représentée par l'équation 5.2.

$$\varepsilon_{\text{papier}} = \varepsilon_{\text{papier}} + \frac{\Delta\varepsilon}{(1+j\omega\tau)^{\gamma}} + a_{p1} (j\omega)^{n_{p1}-1} - ja_{p2} (\omega)^{n_{p2}} - j \frac{\sigma_p}{\omega\varepsilon_o} \quad (5.2)$$

Où

$\varepsilon_{\text{papier}}$ est la permittivité à fréquence élevée du papier ou la constante diélectrique.

$\frac{\Delta\varepsilon}{(1+j\omega\tau)^{\gamma}}$ est l'expression d'un mécanisme de relaxation suivant le modèle de

Cole-Davidson. (Jonscher, 1983). Ce mécanisme de relaxation est occasionnellement présent pour le papier.

$a_{p1}(j\omega)^{n_{p1}-1}$ correspond à l'augmentation des pertes en basses fréquences.

C'est un mécanisme de dispersion à basse fréquence, (Low Frequency Dispersion, LFD), qui entraîne une augmentation des pertes (théorie, Jonscher).

$ja_{p2}(\omega)^{n_{p2}}$ modélise l'augmentation des pertes à fréquence plus élevée, c'est-à-dire à partir de 100 Hz et plus.

$j\frac{\sigma_p}{\omega\varepsilon_0}$ correspond à l'augmentation des pertes due à la conductivité du papier.

Les Figure 5.15 et Figure 5.17 sont des exemples de modélisation de la permittivité complexe d'un échantillon papier sur cavalier retiré d'une maquette de transformateur. L'erreur entre la permittivité provenant des mesures et la permittivité modélisée est presque nulle. On remarque la pertinence d'ajouter le terme $ja_{p2}(\omega)^{n_{p2}}$ pour la modélisation des fréquences élevées (Figure 5.15 et Figure 5.16).

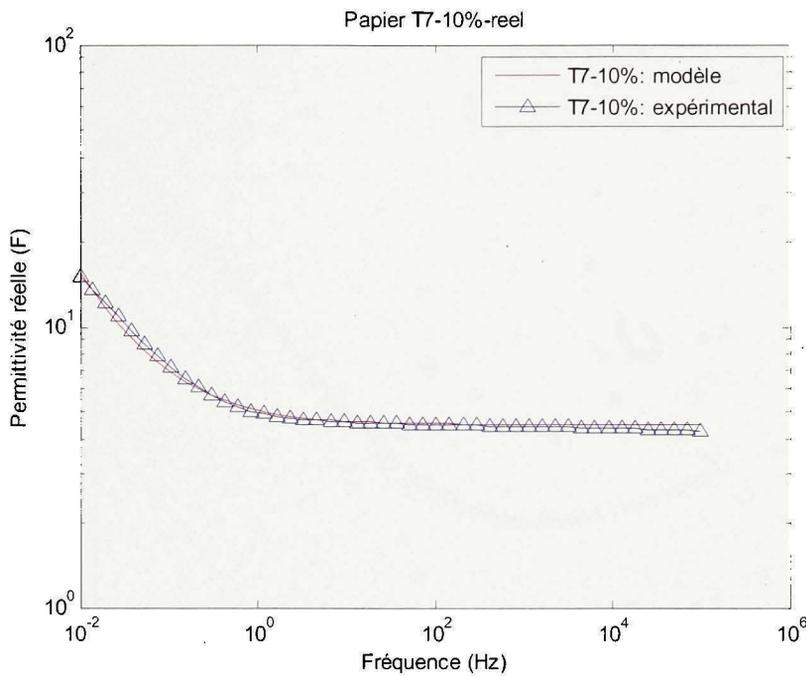


Figure 5.15 Modélisation de la permittivité réelle ϵ' d'un échantillon papier.

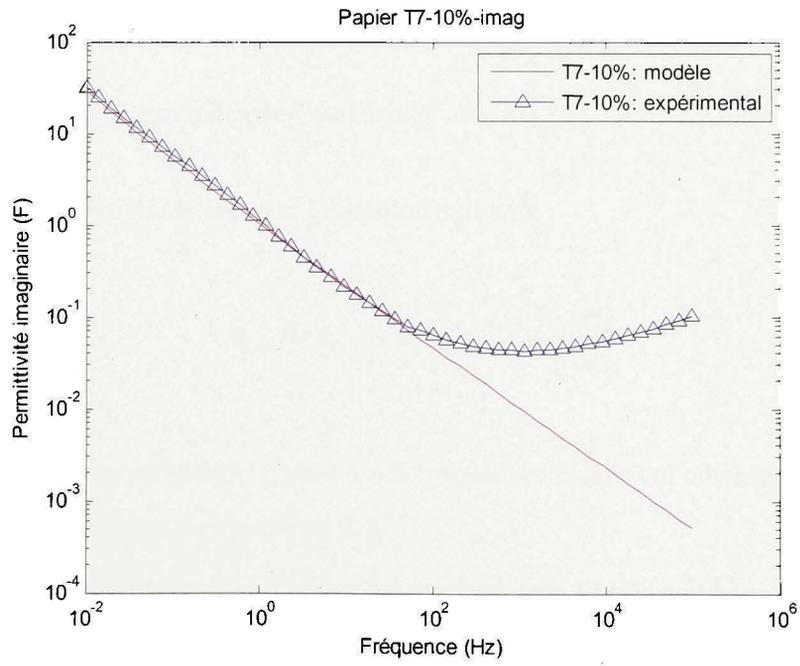


Figure 5.16 Modélisation de la permittivité imaginaire ϵ'' sans l'utilisation du terme $ja_{p2}(\omega)^{n2}$.

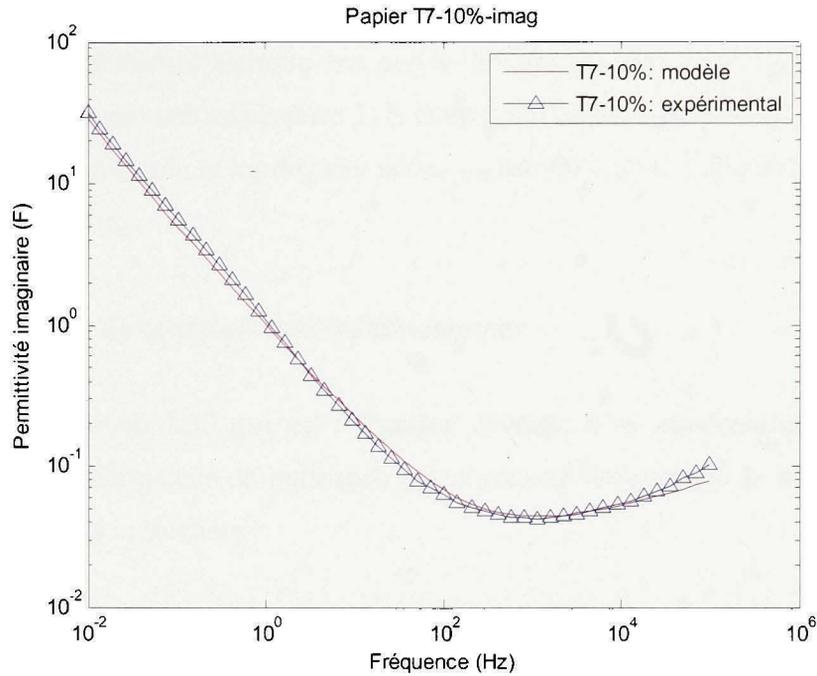


Figure 5.17 Modélisation de la permittivité imaginaire ε'' avec l'ajout du terme $ja_{p2}(\omega)^{n_{p2}}$.

5.6.3 Équation de la modélisation de l'huile

L'huile peut aussi être modélisée par l'équation suivante :

$$\varepsilon_{huile} = \varepsilon_{huile} + a_h (j\omega)^{n_h-1} - j \frac{\sigma_h}{\omega \varepsilon_o} \quad (5.3)$$

Où

ε_{huile} est la permittivité de l'huile à des fréquences élevées et correspond à la constante diélectrique qui est de l'ordre de 2.2.

$a_h (j\omega)^{n_h-1}$ représente l'augmentation des pertes de l'huile aux basses fréquences.

$j \frac{\sigma_h}{\omega \varepsilon_o}$ représente l'augmentation des pertes dues à la conductivité.

Le terme du pic de relaxation et le terme de la variation des pertes à des fréquences plus élevées n'est pas nécessaire puisque les pertes de l'huile sont principalement de type ohmique. Comme mentionné au chapitre 3, la courbe des pertes ohmiques se traduit par une pente de -1 dans un diagramme log-log des pertes en fonction de la fréquence. Il n'y a donc pas de pic de relaxation.

5.6.4 Modélisation de la capacité du transformateur

En partant de l'équation 3.32 qui est l'équation de base d'un condensateur, la capacité complexe d'un transformateur de puissance ayant comme diélectrique la combinaison du papier et de l'huile est la suivante :

$$C_{yfo} = C_o \epsilon_{yfo} \quad (5.4)$$

À partir de cette dernière équation et connaissant la capacité de l'isolation à la fréquence du réseau, la capacité géométrique de l'isolation d'un transformateur peut être déterminée par la relation suivante :

$$C_{60Hz} = C_o \left| \epsilon_{yfo}(60Hz) \right| \rightarrow C_o = \frac{C_{60Hz}}{\left| \epsilon_{yfo}(60Hz) \right|}$$

Si on remplace ϵ_{yfo} par sa valeur, équation 5.1, dans l'expression précédente on obtient :

$$C_o = \frac{C_{60Hz}}{\left[Y \cdot \epsilon_{papier} + \frac{1-Y}{\frac{1-X}{\epsilon_{huile}} + \frac{X}{\epsilon_{papier}}} \right]} \quad (5.5)$$

En se basant sur la dernière équation, le calcul de la capacité géométrique d'un transformateur nécessite la connaissance des paramètres de l'isolation du transformateur suivants :

- **Les paramètres géométriques X et Y.** Ces valeurs ont souvent besoin d'être estimées puisqu'elles ne sont pas disponibles pour les vieux transformateurs.
- **La capacité à 60 Hz.** Cette valeur représente la capacité à la fréquence du réseau et peut être mesurée à l'aide d'un multimètre.
- **La permittivité du papier à 60 Hz.** À la fréquence du réseau on peut estimer que la permittivité du papier est purement réelle et représente la constante diélectrique qui peut être estimée entre 1.5 et 3.5 dépendamment du taux d'humidité contenu dans le papier.
- **La permittivité de l'huile à 60 Hz.** La permittivité de l'huile à cette fréquence représente aussi la constante diélectrique de l'huile et est estimée à 2.2.

En revenant à l'équation 5.4 de la capacité complexe du transformateur, il est possible de déterminer la permittivité complexe du papier en fonction de la fréquence puisque la capacité complexe du transformateur est mesurée expérimentalement et la capacité géométrique, étant estimée à partir de l'équation 5.5 est maintenant connue.

Une fois la valeur de la permittivité complexe $\epsilon_{yfo}(\omega)$ calculée, il reste à déterminer les permittivités complexes de l'huile $\epsilon_{huile}(\omega)$ et du papier $\epsilon_{papier}(\omega)$. Ceci peut être effectué de deux façons :

La première serait d'effectuer une mesure de la réponse en fréquence sur un échantillon d'huile d'un transformateur ou d'une cuve et de modéliser la permittivité de l'huile à l'aide de l'équation 5.3. Une fois la permittivité de l'huile connue, il suffit de la remplacer dans l'équation 5.1 et de calculer la permittivité complexe du papier à l'aide des équations 5.1 et 5.2.

Dans le cas où il n'est pas possible d'obtenir de mesure d'huile, il faut procéder par essais et erreurs, assisté d'une optimisation pour l'ajustement des paramètres, ceux du papier et de l'huile, pour les équations 5.2 et 5.3 intégrées dans l'équation 5.1, de la permittivité complexe du transformateur.

Lors de la modélisation de la permittivité complexe des maquettes de transformateur, aucune mesure diélectrique de l'huile n'était disponible, les paramètres de la permittivité de l'huile et du papier ont dû être estimés. Les calculs pour les estimer ont été effectués à l'aide d'une application dans GUI du logiciel Matlab développée pendant ce projet de maîtrise. Des boucles de calcul ont été utilisées pour chaque paramètre. Le choix de la valeur des paramètres s'est basé sur le calcul d'erreur par la méthode des moindres carrés. Certains paramètres ont été estimés au départ afin réduire le temps de calcul et ont été réajustés par la suite. C'est le cas de la valeur de la conductivité de l'huile qui est déterminée à partir des mesures du facteur de puissance effectuées, sur une base régulière, sur des échantillons provenant des cuves sur une base régulière.

5.6.5 Résultats et discussion

La modélisation a été effectuée sur les cuves 1 à 12, soit les cuves contenant l'huile Nynas 10CX pour des DP de 450, 750 et 1000, la modélisation sur les cuves contenant l'huile Luminol Tri n'ayant pas donné de bons résultats, le pourcentage entre la mesure et la valeur modélisée étant trop grande. Le taux d'humidité du papier varie de 1.2 à 4.17%. Afin de démontrer l'effet de la modélisation sur les mesures, on peut comparer la tangente delta des cuves avec la tangente delta modélisée du papier imprégné. Si on prend l'exemple des mesures sur les cuves ayant un DP de 750 (Figure 5.18), on remarque une dispersion des mesures en basse fréquence due principalement à la variation du taux d'humidité mais aussi à la polarisation interfaciale, conséquence de la conductivité de l'huile. Mise à part les cuves très humides, c'est-à-dire les cuves 3, 5, 8 et 9, la concentration des mesures à 0.003 Hz est située entre les points 0.71 et 1.06 (tangente delta). Pour les cuves humides, les pertes sont beaucoup plus élevées. On remarque aussi un pic de relaxation généré par la polarisation

interfaciale pour les cuves les moins humides. Comme déjà mentionné, l'humidité masque l'effet de la polarisation.

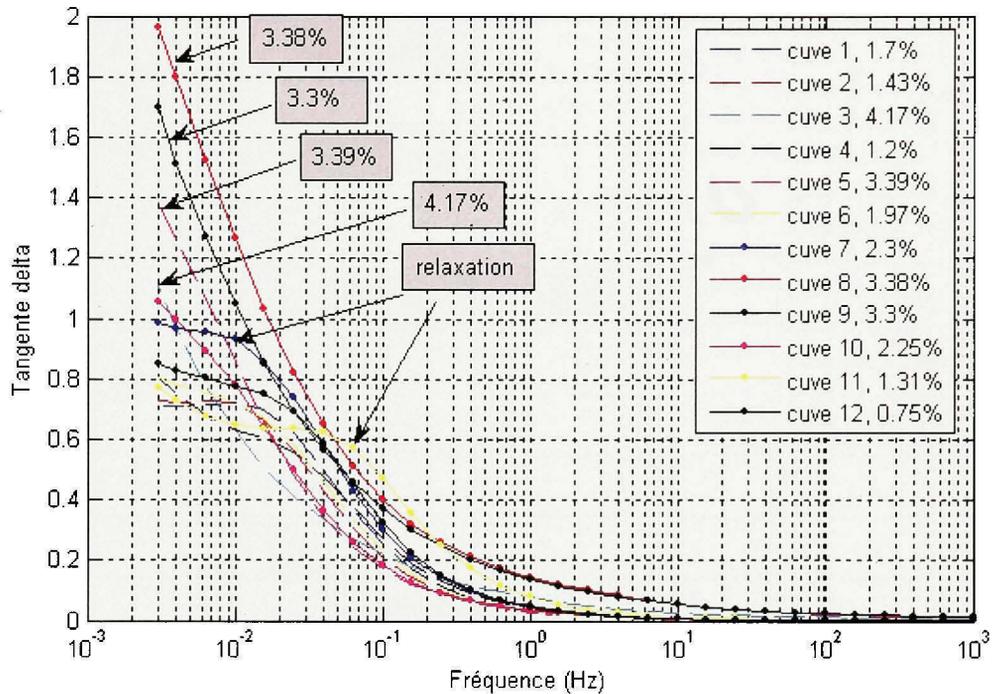


Figure 5.18 *Tangente delta mesurée pour les cuves 1 à 12, pour un DP de 750.*

La Figure 5.19 illustre la tangente delta du papier calculée à partir de la permittivité modélisée, déduite à partir de l'équation 5.1. On remarque que le pic de relaxation disparaît. En excluant les mêmes cuves humides, 3, 5, 8, et 9, la plupart des mesures se situe entre 0.49 et 0.67. Pour les cuves moyennement humides, les cuves 7 et 10 avec 2.3 et 2.25 %, la valeur de la tangente à 0.003 Hz se rapproche des valeurs de tangente delta du papier des cuves plus sèches. L'ensemble des valeurs pour les cuves sèches et moyennement humides après modélisation est plus homogène que pour les mesures prises directement sur les cuves.

Si on fait le même exercice pour des mesures des cuves dont l'isolation possède un DP de 450 et 1000, mais en excluant les cuves très humides, 3, 5, 8, et 9, on obtient les résultats illustrés à la Figure 5.20 pour les cuves et à la Figure 5.21 pour le papier imprégné d'huile. Les résultats ont été compilés sous forme de la variation de la tangente delta à 0.003 Hz pour

chaque DP. La tangente delta des cuves comparée à la tangente delta modélisée du papier imprégné est représentée au Tableau 5.4.

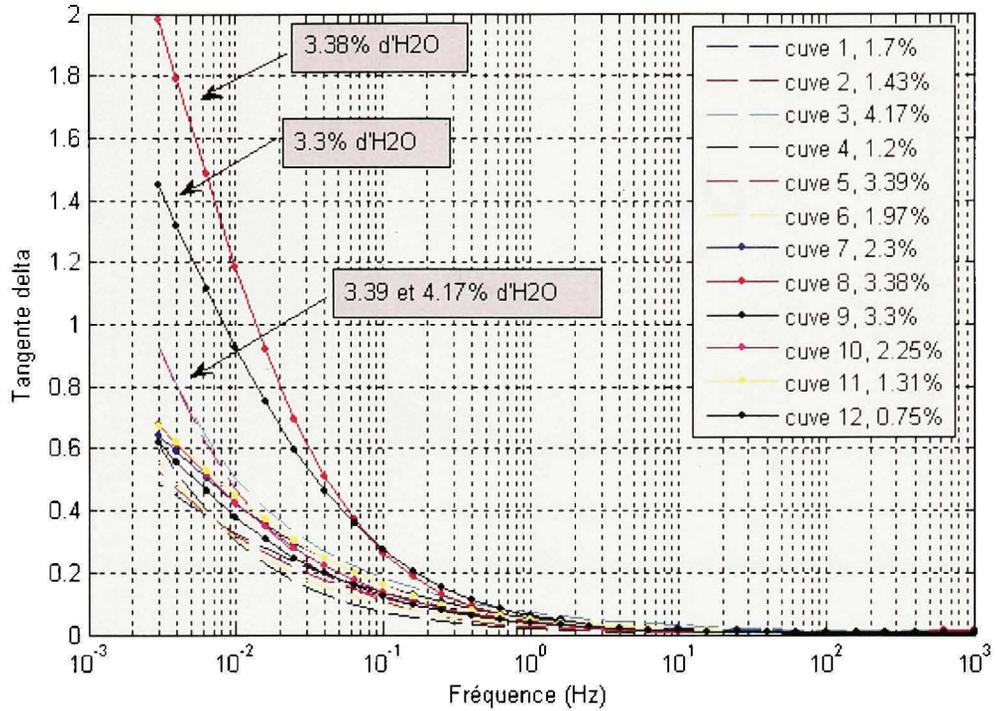


Figure 5.19 Modélisation de la tangente delta du papier pour les cuves 1 à 12, avec un DP de 750.

Tableau 5.4

Écarts des mesures de la tangente delta et des mesures de DP

DP	DP max	DP min	Δ DP	Tan δ Max (cuve)	Tan δ Min (cuve)	Δ Tan δ (cuve)	Tan δ Max (papier)	Tan δ Min (papier)	Δ Tan δ (papier)
1000	1135	989	146	0.88	0.42	0.46	0.42	0.11	0.31
750	785	720	65	1.06	0.71	0.35	0.67	0.49	0.18
450*	503	369	134	2.02	1.29	0.73	1.47	0.96	0.51

*Les cuves 1 et 2 ne sont pas incluses puisque le DP était beaucoup plus élevé que 450.

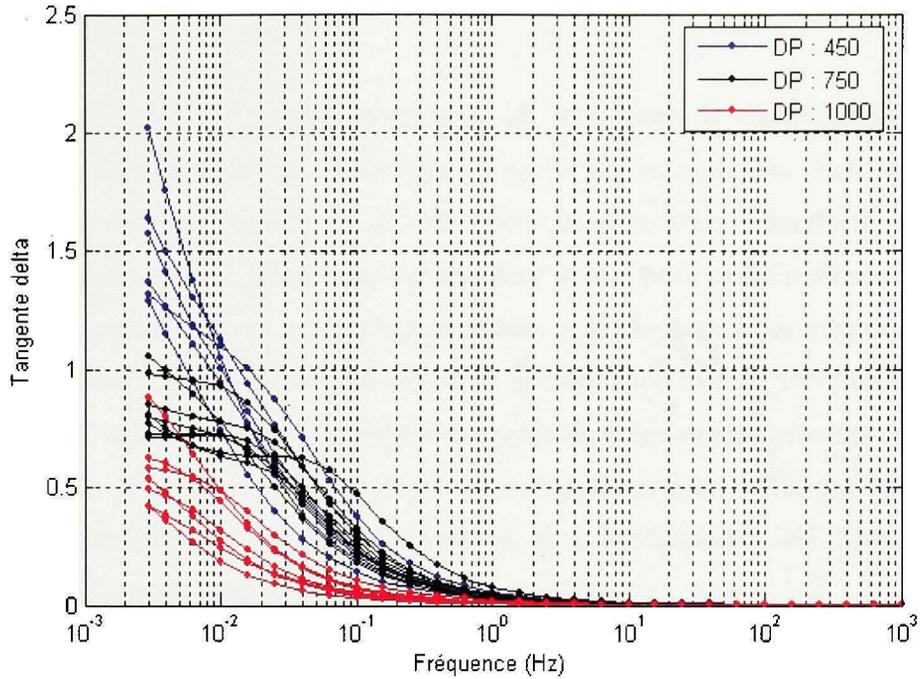


Figure 5.20 *Comparaison de la tangente delta des cuves pour des DP de 450, 750 et 1000.*

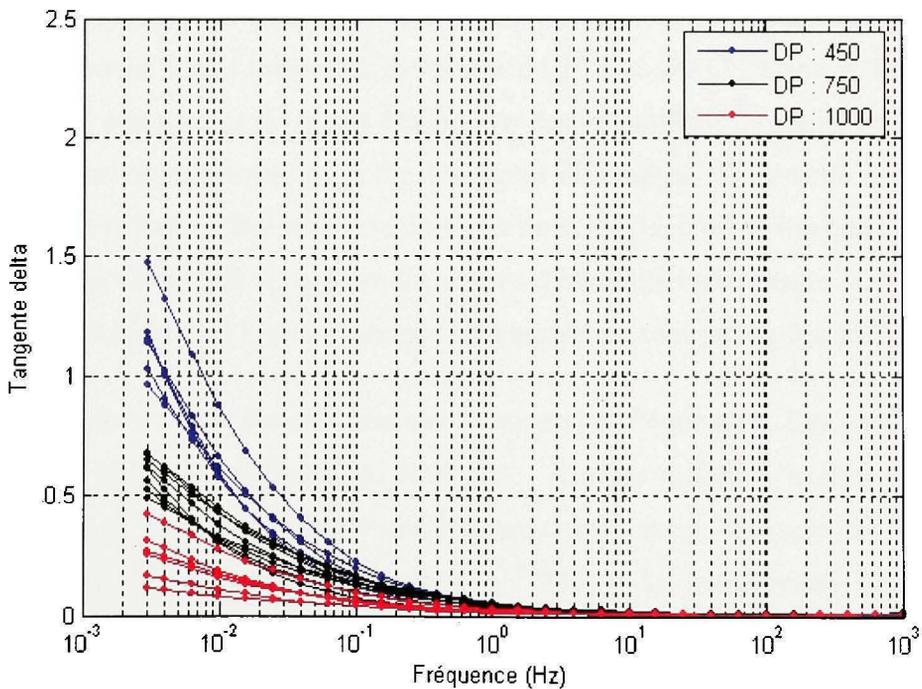


Figure 5.21 *Comparaison de la modélisation de la tangente delta du papier imprégné pour des DP de 450, 750 et 1000.*

5.6.6 Conclusion

La modélisation de la permittivité complexe des maquettes de transformateur a permis d'isoler ce qui nous semble être l'influence du papier sur les mesures. Les Figure 5.20 et Figure 5.21 ont démontré que le pic de relaxation qui varie avec la conductivité de l'huile affecte les mesures à 0.003 Hz de par leur grandeur et leur position. En éliminant ce pic de relaxation, la corrélation avec le DP s'est améliorée et la dispersion des mesures a diminué. De plus, les cuves moyennement humides, dont la corrélation avec le DP était masquée par l'humidité, ont vu la valeur de la tangente delta ramenée à des valeurs près des cuves sèches. La modélisation de la permittivité du papier a permis de corriger l'effet de l'humidité pour les cuves moyennement humides. Cependant, la modélisation a été beaucoup moins concluante sur les cuves contenant de l'huile Luminol Tri.

5.7 Effet de la température sur la réponse du diélectrique

Afin d'illustrer l'effet de la température sur les mesures diélectriques, les groupes de cuves 1 et 3 ont été soumis à des températures variant de 10°C à 50°C. Dans la littérature, les mesures ont été prises, dans la plupart des cas, sur des échantillons de papier neuf imprégnés et pour certaines expérimentations, à des humidités différentes. Dans cette expérience, les conditions des systèmes d'isolation sont plus près de la réalité, c'est-à-dire que les valeurs du DP varient entre 420 et 812 et ce, pour des valeurs d'humidité variant entre 1.39 à 3.7%. Les conditions des échantillons lors des mesures en température sont présentées au Tableau 5.5.

Les mesures ont été prises dans les domaines temporel et fréquentiel. Les appareils utilisés sont l'ITERG, le PDC *Analyser* et le IDA 200. Afin de faciliter l'analyse, les mesures effectuées dans le domaine du temps ont été converties dans le domaine des fréquences à l'aide de la transformée de Hamon (Hamon, 1952). La transformée de Hamon est l'équivalent de la transformée de Fourier, l'utilisation de cette transformation nécessite moins de calcul et est aussi efficace comme démontré par (Hassan, 2006).

Tableau 5.5

Conditions de test pour les mesures en température des groupes de cuves 1 et 3

Groupe	No cuve	Type d'huile	% d'H ₂ O	DP	T°C de mesure	T°C de référence
G3	1	Nynas 10CX	1.7	547	25, 30, 40,50	25
	7	Nynas 10CX	2.3	248		
	9	Nynas 10CX	3.3.	321		
G3	13	Luminol	2.68	730	10, 20, 30 40	20
	14	Luminol	3.7	671		
	15	Luminol	2.05	785		
	16	Luminol	1.39	812		

5.7.1 Déplacement de la courbe en température vers une courbe maîtresse

Comme mentionné à la section 3.6 de la partie théorique, la normalisation des courbes en température vers une courbe maîtresse s'effectue par un déplacement horizontal dans le domaine des fréquences. Pour toutes les courbes, le déplacement à été calculé dans un plan log-log de la tangente delta en fonction de la fréquence par interpolation mathématique. La Figure 5.22 montre un exemple de calcul du déplacement d'une courbe vers la courbe maîtresse.

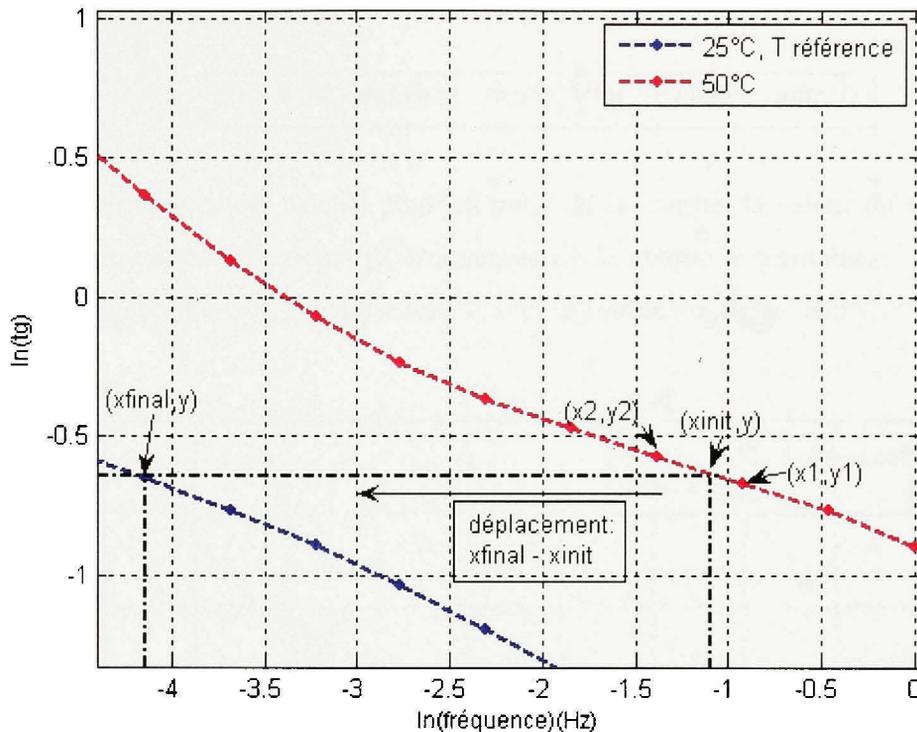


Figure 5.22 *Déplacement horizontal par interpolation d'une courbe en température.*

(x_1, y_1) : Première coordonnée connue de la courbe à déplacer.

(x_2, y_2) : Deuxième coordonnée connue de la courbe à déplacer.

(x, y) : Coordonnée de la courbe à déplacer dont on cherche la valeur de x_{init} qui représente la fréquence et dont la valeur en y (tangente delta) est connue.

(x_f, y) : Coordonnée connue de la courbe maîtresse

Le déplacement requiert un point (x, y) de la courbe en température à 50°C qui doit être ramené à un point connu (x_{final}, y) de la courbe maîtresse. Le déplacement est égal à $x_{final} - x_{init}$, où x_{init} est déterminé par interpolation mathématique (équation 5.6).

$$\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{y_2 - y}{x_2 - x_{init}} \quad (5.6)$$

Le déplacement peut aussi être écrit de la façon suivante:

$$\ln a_T = \ln(\text{fréquence finale}) - \ln(\text{fréquence initiale}) \quad (5.7).$$

Une fois le déplacement calculé pour un point de la courbe, la valeur du déplacement est soustraite de toutes les valeurs de fréquences de la courbe à normaliser. La Figure 5.23 illustre le déplacement de la courbe à 50°C vers la courbe maîtresse à 25°C.

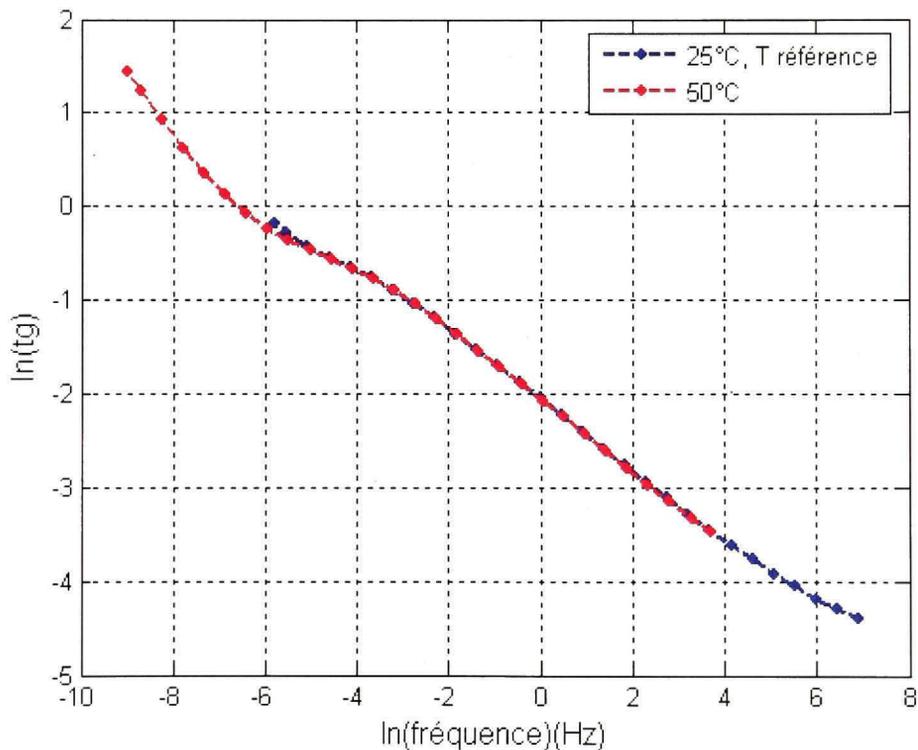


Figure 5.23 Déplacement en fréquence d'une courbe à 50°C vers la courbe maîtresse à 25°C.

On remarque que la courbe à 50°C a la même forme spectrale que celle à 25°C. Et que seule la constante de temps du pic de relaxation s'est déplacée vers les plus hautes fréquences avec l'augmentation de la température. Ce qui implique qu'un seul mécanisme de relaxation est présent.

La Figure 5.24 est un exemple de mesures prises dans le domaine des fréquences, à différentes températures, puis normalisées sur une courbe maîtresse (Figure 5.25). Ces mesures ont été effectuées initialement dans le domaine des fréquences. Un autre exemple de mesure en température est illustré à la Figure 5.26, mais cette fois sur des mesures prises dans le domaine du temps avec l'appareil ITERG, puis converties dans le domaine des fréquences à l'aide de la transformée de Hammon. À la Figure 5.27, on observe les courbes normalisées.

Pour les mesures prises dans le domaine du temps, on remarque qu'il n'y a pas de pic de relaxation visible. Le déplacement d'une courbe en l'absence d'un pic de relaxation est plus difficile à réaliser puisque le déplacement peut s'effectuer autant en amplitude qu'en fréquence. C'est pourquoi il est préférable d'utiliser les mesures effectuées dans le domaine des fréquences pour la normalisation. À la Figure 5.25, on remarque qu'avec la normalisation, la courbe atteint une valeur de e^{-9} ce qui représente une fréquence de 0.00012 Hz comparativement à 0.003 Hz. La courbe maîtresse contient donc plus d'information que les mesures individuelles à une température fixe.

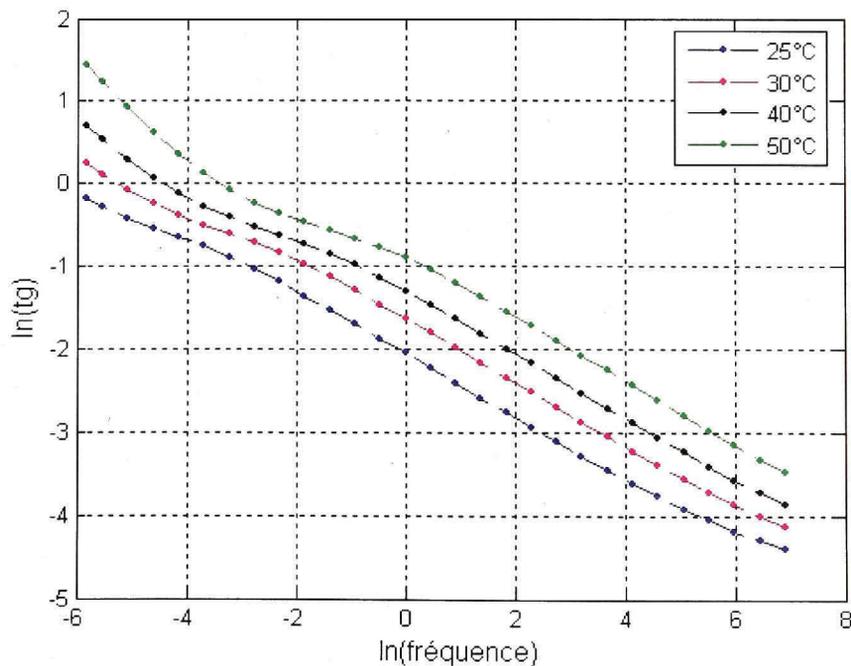


Figure 5.24 Courbes de la tangente delta prises à différentes températures pour la cuve 9.

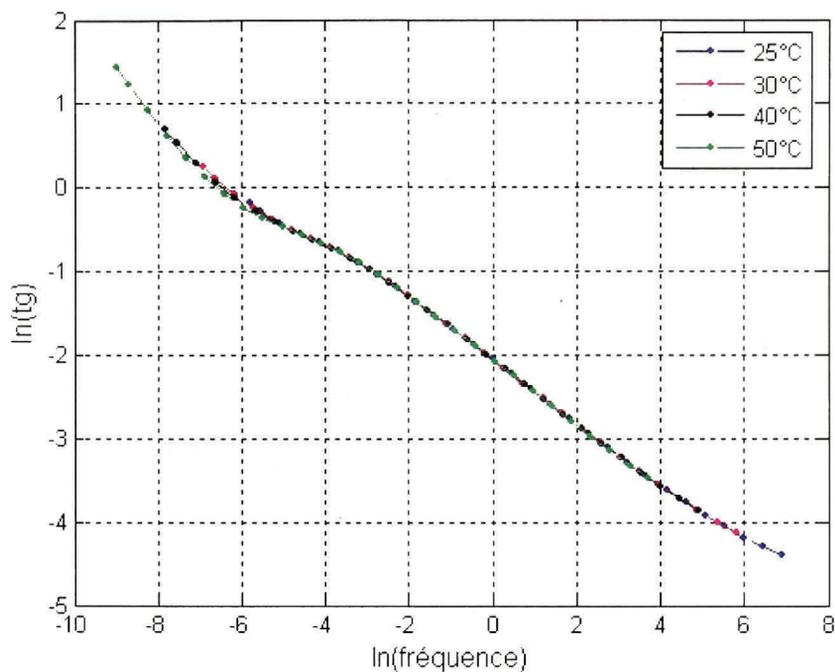


Figure 5.25 Normalisation à la courbe maîtresse à 25°C pour les mesures de la Figure 5.24.

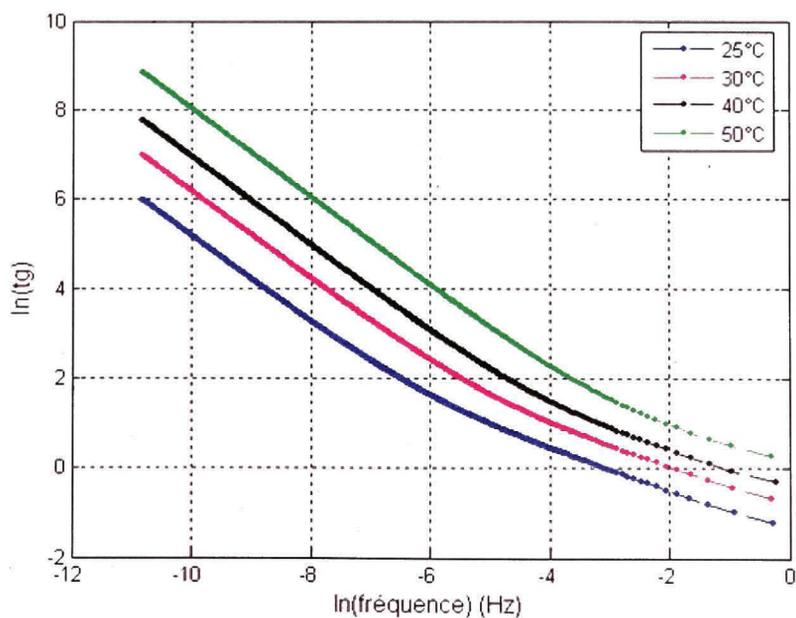


Figure 5.26 Courbes des courants de polarisation convertis dans le domaine des fréquences à différentes températures pour la cuve 9.

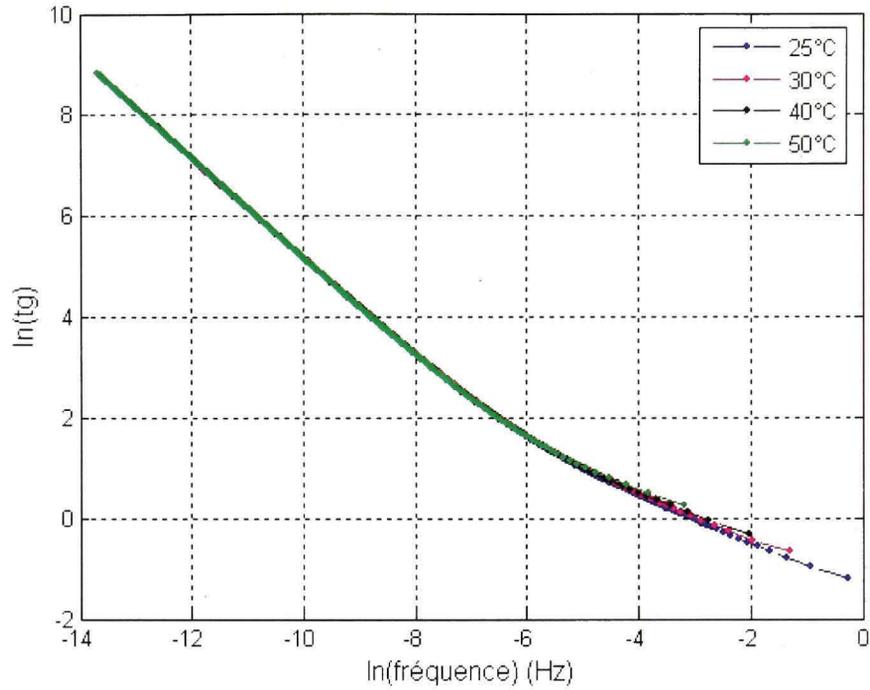


Figure 5.27 Normalisation à la courbes maîtresse à 25°C pour les mesures de la Figure 5.26.

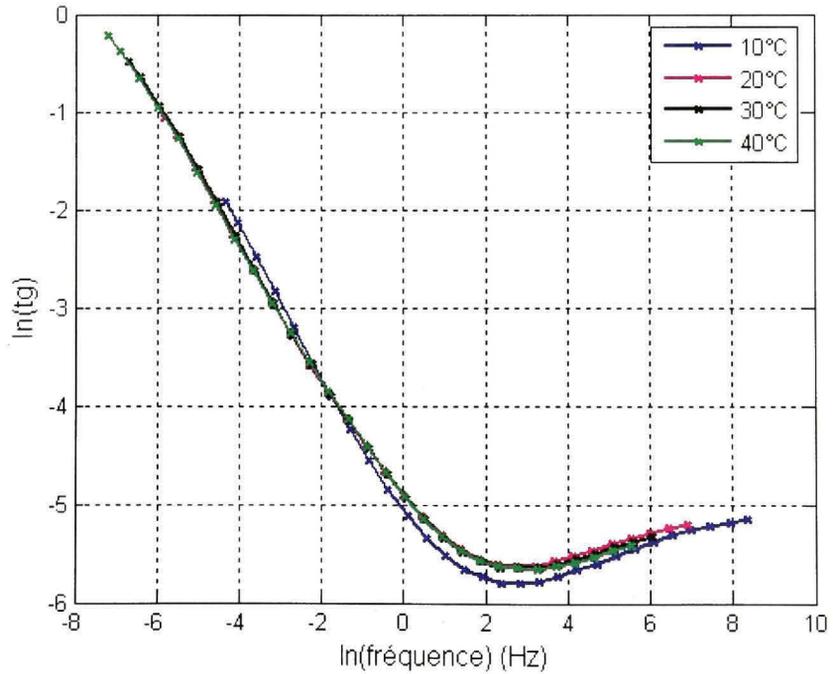


Figure 5.28 Normalisation sur une courbe maîtresse à 20°C pour la cuve 13.

La Figure 5.28 est un exemple de normalisation pour les cuves contenant de l'huile Luminol Tri. Ces mesures ont été prises pour des températures entre 10°C à 40°C. On remarque un changement de la forme spectrale pour la mesure à 10 °C. Le Tableau 5.6 présente les valeurs du déplacement $\ln(a_T)$, pour les mesures effectuées avec les appareils ITREG, PDC Analyser et le IDA 200.

Tableau 5.6

Déplacement en fréquence des cuves des groupes 1 et 3
pour les mesures prises avec l'appareil IDA 200

Cuve	% H ₂ O	DP	Déplacement $\ln a_T$, (Hz)			
			10°C	20°C	30°C	40°C
16	1.39	812	-0.8	0	0.99	2.15
15	2.05	785	-0.76	0	0.83	2.07
13	2.68	730	-1.67	0	0.86	1.36
14	3.7	671	-1.37	0	1.26	2.63

Cuve	% H ₂ O	DP	Déplacement $\ln a_T$, (Hz)			
			25°C	30°C	40°C	50°C
1	1.7	547	0	0.472	1.131	1.831
7	2.3	321	0	0.493	1.602	2.558
9	3.3	248	0	0.55	1.6	2.62

Tableau 5.7

Déplacement en fréquence des cuves des groupes 1 et 3
pour les mesures prises avec l'appareil PDC Analyser

Cuve	% H ₂ O	DP	Déplacement $\ln a_T$, (Hz)			
			10°C	20°C	30°C	40°C
16	1.39	812	-1.14	0	0.92	1.85
15	2.05	785	-1.1	0	1.01	2.05
13	2.68	730	-1.04	0	0.97	2.05
14	3.7	671	-1.1	0	1.05	2.21

Tableau 5.8

Déplacement en fréquence des cuves des groupes 1 et 3
pour les mesures prises avec l'appareil ITERG

Cuve	% H ₂ O	DP	Déplacement ln a _T , (Hz)			
			10°C	20°C	30°C	40°C
16	1.39	812	-1.22	0	0.95	1.93
15	2.05	785	-1.23	0	0.9	1.94
13	2.68	730	-1.58	0	0.84	1.8
14	3.7	671	-1.23	0	0.9	1.94

Cuve	% H ₂ O	DP	Déplacement ln a _T , (Hz)			
			25°C	30°C	40°C	50°C
1	1.7	547	0	0.47	1.49	2.33
7	2.3	321	0	0.095	0.65	1.48
9	3.3	248	0	1.01	1.79	2.87

5.7.2 Graphique d'Arrhenius

Comme mentionné à la partie théorique, selon la loi d'Arrhenius, le déplacement est représenté dans un graphique semi-logarithmique en fonction de l'inverse de la température par une droite d'équation :

$$\ln a_T = -\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T}\right) + \ln A$$

Où la pente de la droite est égale à $-\frac{E_a}{R}$. Afin de simplifier la lecture, l'expression de la température est souvent représentée par unités de "1000/Température". L'équation de la droite devient alors:

$$\ln a_T = -\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln A \quad (5.8)$$

En connaissant les paramètres de l'équation de la droite d'Arrhenius, il est possible de calculer l'énergie d'activation. Ces paramètres peuvent être calculés à l'aide de méthodes statistiques. Dans ce cas, c'est la méthode des moindres carrés qui a été utilisée pour calculer les paramètres de la droite de régression : $y = b_1x + b_0$. Les paramètres calculés à partir des valeurs du déplacement des Tableau 5.6, Tableau 5.7 et Tableau 5.8 sont présentés au Tableau 5.9. Pour chaque groupe de mesures, un paramètre moyen a aussi été calculé. Ces paramètres ont été déterminés en calculant l'erreur générée par chacune des courbes déplacées par rapport à la courbe maîtresse. Les cuves 1 et 14 ont été exclues du calcul, la première en raison de sa marginalité et la deuxième en raison du fort pourcentage d'humidité.

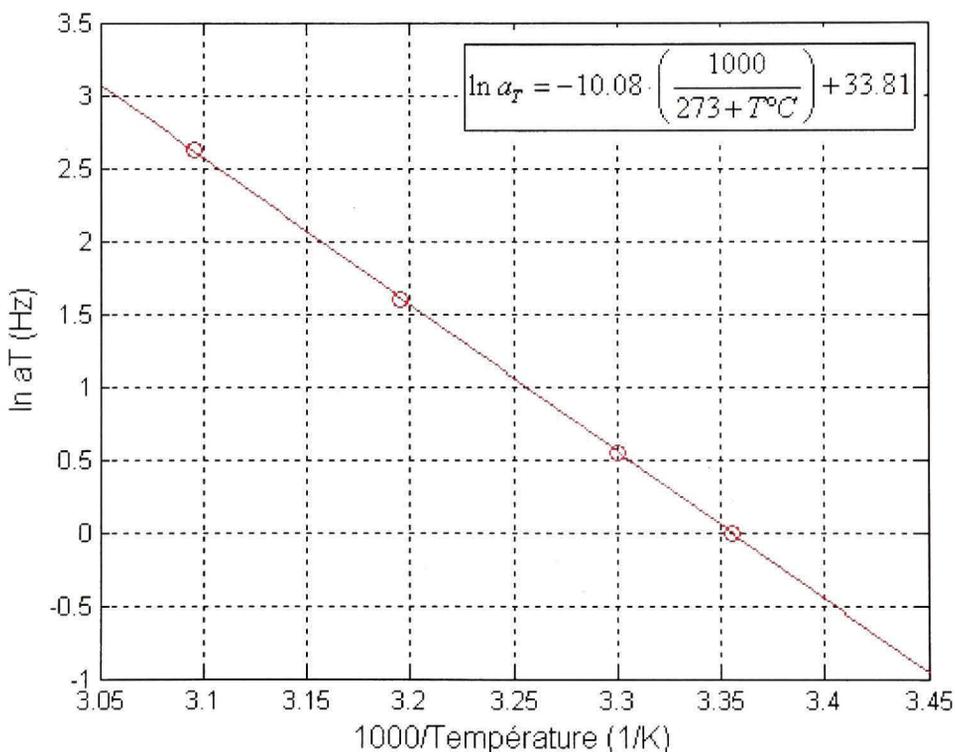


Figure 5.29 Déplacement en fonction de $1000/Température$ la cuve 9, mesure prises avec l'appareil IDA 200.

Tableau 5.9

Paramètres b_0 et b_1 de la droite de régression du déplacement en fréquence en fonction de la variable "1000/Température" pour l'ensemble des mesures

Cuve	% H ₂ O	DP	IDA 200		PDC		ITERG	
			b_1	b_0	b_1	b_0	b_1	b_0
16	1.39	812	-8.68	31.42	-8.84	30.09	-9.22	31.42
15	2.05	785	-8.22	28.18	-9.26	31.60	-9.22	31.40
13	2.68	730	-8.61	29.78	-9.71	33.88	-9.8	33.2
14	3.7	671	-11.76	40.18	-9.78	33.18	-7.88	27.13
		Paramètres moyen	-9.9	33	-9.5	32.31	-9.32	31.7
1	1.7	547	-6.91	23.24			-9.08	30.35
7	2.	420	-9.95	33.37			-5.7	19.42
9	3.3	248	-10.07	33.81			-10.43	35.2
		Paramètres moyen	-9.7	32.9			-9.08	30.80

5.7.2.1 Modélisation de l'effet de la température sur la réponse fréquentielle

À partir des paramètres moyens b_0 et b_1 déterminés à la section précédente, il a été possible de trouver une équation générale afin de modéliser le comportement de la mesure diélectrique en fonction de la température. Le déplacement des mesures en température a été recalculé selon l'équation générale et l'erreur générée entre la courbe maîtresse et la courbe normalisée pour chacune des mesures. La Figure 5.30 représente la normalisation des courbes en température selon l'équation générale de la cuve 9 pour les mesures effectuées avec l'appareil IDA 200. L'erreur absolue générée entre la courbe maîtresse et les courbes normalisées est présentée à la Figure 5.31. La Figure 5.32 représente la normalisation des courbes en températures, de la cuve 9 effectuées avec l'appareil PDC, basée sur l'équation

générale déterminée précédemment. La Figure 5.33 représente l'erreur calculée entre la courbe maîtresse et les courbes normalisées.

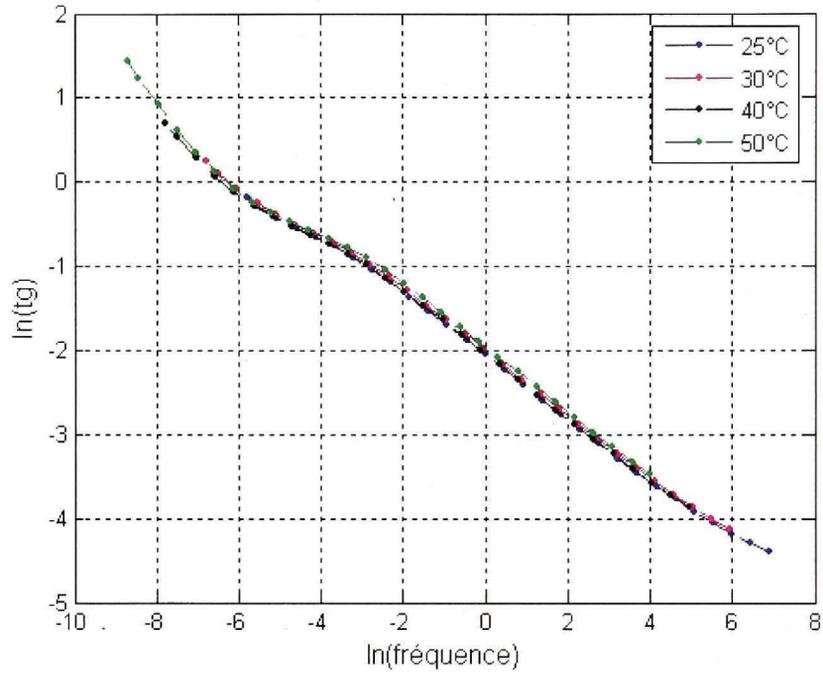


Figure 5.30 Normalisation des courbes en température à 25°C à l'aide de la modélisation pour les courbes de la Figure 5.24.

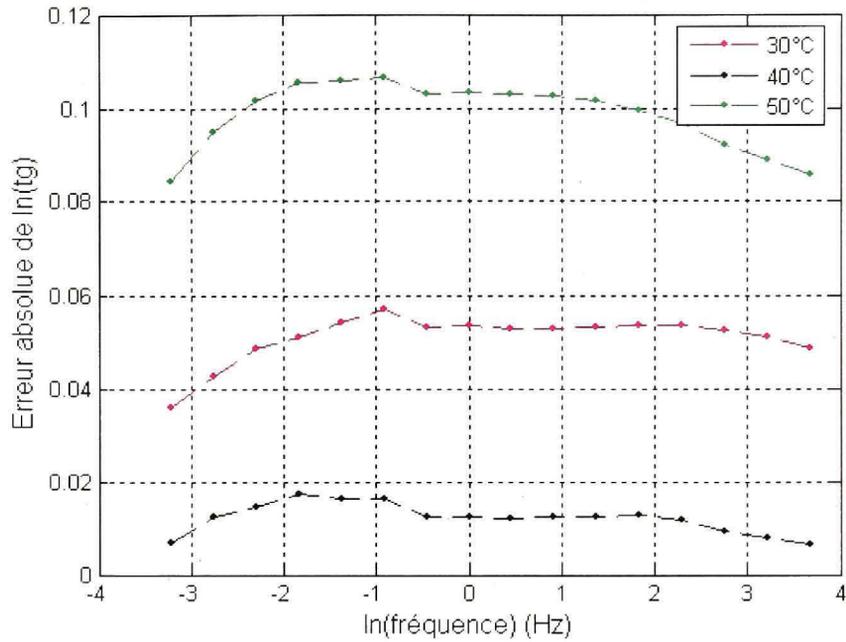


Figure 5.31 Erreur absolue mesurée entre la courbe maîtresse et chaque courbe normalisée en fonction de la fréquence pour la modélisation des courbes de la Figure 5.30.

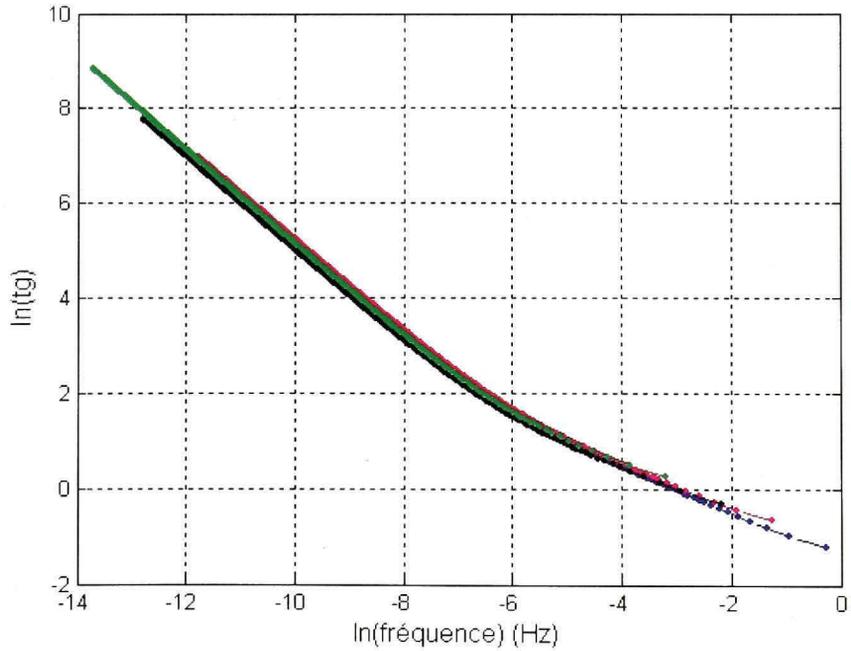


Figure 5.32 Normalisation des courbes en température à 25°C à l'aide de la modélisation pour les courbes de la Figure 5.26.

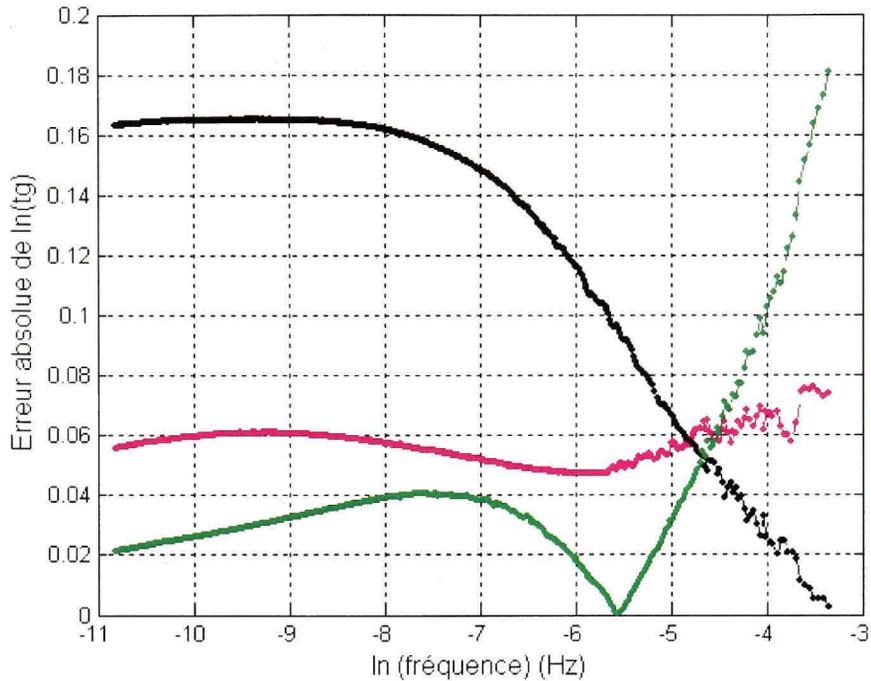


Figure 5.33 Erreur absolue mesurée entre la courbe maîtresse et chaque courbe normalisée en fonction de la fréquence pour la modélisation des courbes de la Figure 5.32.

5.7.2.2 Énergie d'activation

Un des paramètres qui caractérise le processus de relaxation d'un matériau polaire est l'énergie d'activation. L'énergie d'activation peut être exprimée en joules par mol (J/mol) ou en électronvolt (eV). L'énergie d'activation a été calculée pour l'ensemble des mesures à partir des calculs de la pente de régression b_1 . L'énergie d'activation a été calculée en J/mol puis convertie en eV. Les résultats sont présentés au Tableau 5.10. La droite d'Arrhenius pour quelques cuves ainsi que leur énergie d'activation correspondante est présentée à la Figure 5.34. Pour les mesures prises dans le domaine des fréquences, l'énergie d'activation tend à augmenter avec le pourcentage d'humidité.

Tableau 5.10

Énergie d'activation pour l'ensemble des mesures

Cuve	% H ₂ O	DP	IDA 200	PDC	ITERG
			E _a (eV)	E _a (eV)	E _a (eV)
16	1.39	812	0.75	0.76	0.79
15	2.05	785	0.71	0.80	0.79
13	2.68	730	0.74	0.84	0.84
14	3.7	671	1.01	0.84	0.68
		Paramètre moyen	0.85	0.82	0.80
1	1.7	547	0.60		0.78
7	2.	420	0.86		0.49
9	3.3	248	0.87		0.90
		Paramètre moyen	0.84		0.78

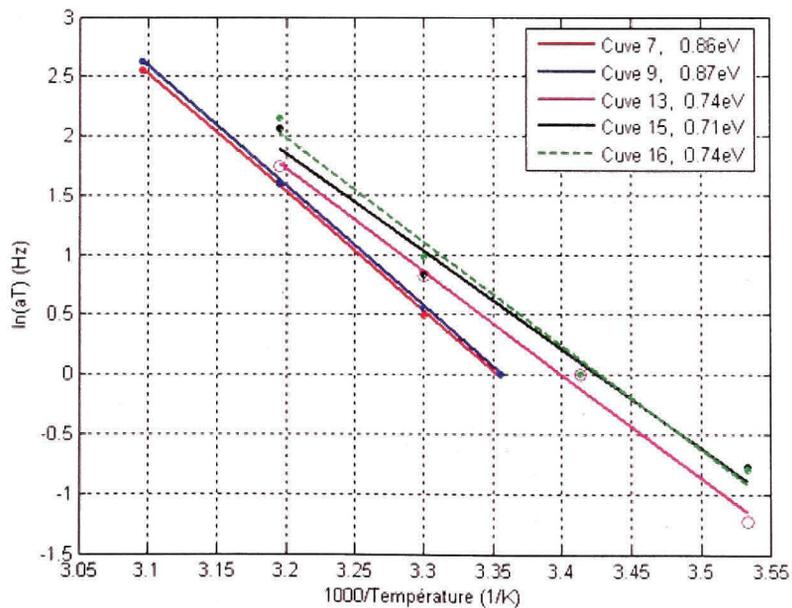


Figure 5.34 Graphique d'Arrhenius des cuves 1, 7, 8, 15 et 26.

5.7.3 Conclusion

La dépendance à la température des mesures diélectriques sur le complexe papier/huile suit une loi d'Arrhenius dans le cas d'une variation d'humidité et du vieillissement. La normalisation des courbes en température a pu être modélisée par une équation générale. L'énergie d'activation moyenne de 0.8 eV a été calculée à partir de cette équation générale. Cette équation se limite à des mesures prises dans une plage de température de 10 à 50°C.

5.8 Conclusion

Les mesures sur le système d'isolation papier/huile des maquettes de transformateurs ont démontré une forte corrélation avec le DP du papier et l'augmentation des pertes à basses fréquences. Et une corrélation avec le FP de l'huile à une fréquence intermédiaire et ce, pour des taux d'humidité inférieure à 2.25% dans les deux cas. Notons que la plupart des transformateurs de puissance en service possède un taux d'humidité de papier de l'ordre de 0.75%. La corrélation observée pourrait en principe permettre de déduire le DP du papier par la mesure des pertes à basses fréquence. Cependant, à ce stade de l'expérimentation, il n'est pas possible de différencier l'effet du vieillissement de l'huile à celui du papier puisqu'on sait que la conductivité de l'huile a une forte influence dans les basses fréquences étudiées (mécanisme de relaxation) et que les produits polaires de dégradation de l'huile peuvent se retrouver aussi dans le papier. Cependant, il n'y a aucune corrélation sur les cuves contenant de l'huile Luminol Tri même si le vieillissement du papier est significatif.

La modélisation de la permittivité du papier a permis de diminuer l'influence de l'huile par la suppression du pic de relaxation et par le fait de diminuer la dispersion des mesures pour un DP donné en diminuant l'effet de l'humidité sur les cuves moyennement humides. Cependant, les cuves contenant de l'huile Luminol ont été plus difficiles à modéliser et les résultats ne sont pas concluants.

Finalement, la variation des pertes diélectriques du complexe papier/huile en fonction de la température suit une loi d'Arrhenius qui peut être généralisée à toutes les cuves dont l'humidité est inférieure à 2.5%.

CHAPITRE 6

ÉCHANTILLONS D'ENROULEMENT

6.1 Introduction

Comme mentionné dans la première partie, des échantillons sur cavalier ont été placés initialement à l'intérieur des maquettes, afin de subir le même vieillissement que le papier des enroulements. En plus de servir pour la mesure du DP, ces échantillons ont permis d'effectuer des mesures diélectriques spécifiques au papier afin de confirmer ou d'infirmer les résultats obtenus sur les maquettes. En effet, l'expérimentation sur les échantillons de papier en laboratoire permet d'identifier séparément l'effet de l'huile et du papier.

Les échantillons ont été prélevés à différentes étapes du vieillissement puis apportés en laboratoire dans une chambre climatique. Une fois l'équilibre en humidité atteint, des mesures diélectriques ont été effectuées. La reproductibilité des mesures n'a cependant pu être démontrée et les résultats devenaient par le fait même invalides. Une expérimentation contrôlée sur les échantillons s'avérait essentielle afin de s'assurer que la corrélation observée sur les maquettes provenait spécifiquement des produits de dégradation du papier et non de ceux de l'huile. C'est pourquoi il a été décidé d'entreprendre une expérimentation supplémentaire en laboratoire.

L'expérimentation comporte deux volets. Le premier volet consiste en un vieillissement d'échantillons de papier non-imprégné. Le but du vieillissement des échantillons de papier sans imprégnation d'huile était d'obtenir des échantillons vieillis exempts de produits de dégradation de l'huile ne contenant que les produits de dégradation du papier. L'imprégnation du papier s'est donc effectuée après le vieillissement, avec de l'huile neuve et de l'huile vieillie provenant des maquettes, afin d'évaluer l'effet des produits de dégradation de l'huile.

Le deuxième volet de l'expérimentation consiste à caractériser des échantillons de papier imprégnés d'huile à différentes étapes du vieillissement et de comparer les résultats avec la première expérimentation. Deux types d'huile ont été utilisés, une huile neuve Nynas Nitro 10CX et une huile neuve de marque Luminol Tri comparable ces deux huiles ayant été utilisées pour les maquettes. L'utilisation de l'huile Luminol Tri permettra de valider les résultats obtenus avec les maquettes contenant cette huile. Le type de mesure utilisé pour les échantillons de laboratoire s'est limité aux mesures dans le domaine des fréquences afin de simplifier l'expérimentation.

6.2 Description des échantillons des enroulements

Les échantillons utilisés sont formés de papier Kraft enroulé sur des cavaliers de cuivre comme le montre la Figure 6.1. Il y a sept couches de papier sur le cavalier de cuivre. Un papier de cuivre possédant un côté adhésif a été installé sur le papier Kraft et a servi d'électrode de mesure. Pour les mesures diélectriques, la tension est appliquée sur le cavalier de cuivre directement. La mesure est prise sur l'électrode centrale. Les petites électrodes de chaque côté sont les électrodes de gardes qui limitent les effets de bord et le contournement. Les dimensions complètes des échantillons sont présentées au Tableau 6.1.

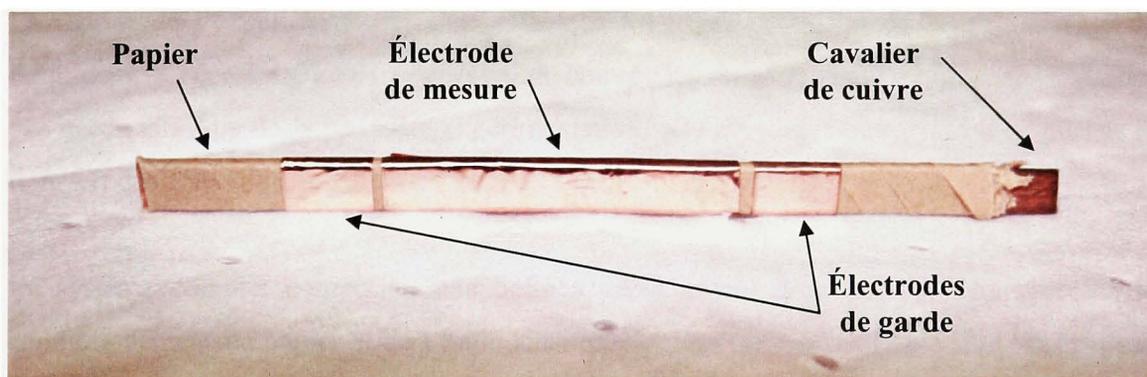


Figure 6.1 *Échantillon sur cavalier de papier non-imprégné avec électrodes de cuivre.*

Tableau 6.1

Dimensions d'un échantillon de papier sur cavalier

	Dimensions (mm)
Longueur de la barre de cuivre	140
Largeur de la barre de cuivre	6.55
Épaisseur de la barre de cuivre	2.34
Épaisseur de la couche de papier	0.467
Largeur de l'électrode centrale	51
Largeurs des électrodes de garde	13.6

6.3 Description du montage

Lors de l'expérimentation sur les échantillons sur cavalier provenant des maquettes, le problème de reproductibilité des mesures provenait d'un problème de contrôle de l'humidité. Les mesures devaient être prises à des taux d'humidité de la chambre climatique de l'ordre de 5 et 10% alors qu'il était en réalité de 15% à 20%.

La reprise de l'expérimentation s'est effectuée à l'IREQ en raison de la disponibilité de l'équipement nécessaire à l'expérimentation, comme les fours de vieillissement, qui n'étaient pas nécessaire lors de la première expérimentation. De plus, ceci permettait d'empêcher le transfert des échantillons entre l'ÉTS et l'IREQ. .

Le système complet comportait une boîte à gants munie d'un sas où s'est effectué le conditionnement du papier et de l'huile ainsi que les mesures diélectriques des échantillons sur cavalier. Une photo de la boîte à gants est présentée à la Figure 6.2. La boîte à gants comportait à l'intérieur une barre d'alimentation où étaient branchés un ventilateur permettant une distribution uniforme de l'humidité et un brasseur magnétique pour le conditionnement de l'huile. Un système de déshumidification de la boîte à gants, tel qu'illustré à la Figure 6.3 a permis le contrôle de l'humidité. Ce dernier comprenait un

dessicant absorbant l'humidité de l'air qui circulait entre celui-ci et la boîte à gants par le moyen d'une pompe. Le tout était contrôlé par un contrôleur PID connecté à un capteur d'humidité.



Figure 6.2 *Intérieur de la boîte à gants.*



Figure 6.3 *Système de contrôle de l'humidité de la boîte à gants.*

6.4 Procédure d'expérimentation

Les échantillons ont d'abord subi un conditionnement à une humidité relative de 2.5 % dans la boîte à gants à l'IREQ. La procédure détaillée du conditionnement est présentée à la section 6.5. L'huile était contenue dans des bécjers d'un litre, placés dans la boîte à gants sur un brasseur magnétique afin d'accélérer le conditionnement de l'huile. Les huiles et les papiers ont été conditionnés à la même humidité. Avant l'imprégnation des échantillons, un litre de chaque type d'huile a été prélevé pour la caractérisation.

Les échantillons d'enroulement ont été vieillis dans un four en laboratoire à une température variant entre 105°C et 110°C. La température à l'intérieur variait de 105°C à 110°C. Tous les échantillons ont été vieillis en même temps. À intervalle régulier, un échantillon était

retiré du four pour une mesure de DP. Deux échantillons de chaque groupe ont servi à la mesure du DP final. Lorsque le vieillissement désiré était atteint, un groupe d'échantillons étaient retirés du four. Un délai de 48 heures était respecté avant de retirer les bouchons après le vieillissement. Cette étape était nécessaire pour ramener l'équilibre en humidité dans les bouteilles.

L'installation des électrodes de cuivre s'est effectuée après le vieillissement dans une boîte à gants flexible à une humidité d'environ 5%. Cette valeur n'est pas très précise en raison du choix du capteur d'humidité. Puis, les échantillons ont été remis dans la boîte à gants rigide, le bouchon ouvert, à une humidité de 2% pour quelques heures avant de refermer hermétiquement les bouchons avant l'imprégnation. La décision d'installer les électrodes après le vieillissement a été motivée par le fait que la température maximale que peut supporter la colle conductrice du papier de cuivre est de 130°C.

L'imprégnation des échantillons s'est effectuée dans la boîte à gants. Les bouchons ont été refermés dans la boîte à gants puis toutes les bouteilles ont été placées dans un agitateur mécanique pour 48 heures afin de permettre une meilleure imprégnation.

Chaque bouteille contenant les échantillons a été identifiée selon un code précis dépendamment de l'imprégnation, du type d'huile utilisé et du nombre d'échantillons de chaque groupe. Pour le premier volet, un échantillon vieilli à un DP de 500 et imprégné d'huile vieilli sera identifié IHV500-1. Puisqu'il y a six échantillons pour chaque catégorie, les échantillons imprégnés d'huile vieillie à un DP de 500 ont été identifiés d'IHV500-1 à IHV500-6. Un échantillon de même DP et imprégné d'huile neuve sera identifié IHN500-1. Et finalement des mesures avaient été prévues sur des échantillons non-imprégnés et ont été identifiés comme suit, NI500-1.

Le Tableau 6.2 présente les conditions des échantillons avant et après le vieillissement ainsi qu'une description de ceux-ci.

Tableau 6.2

Tableau des conditions avant et après vieillissement des échantillons de papier, 1^{er} volet de l'expérience

Nom de l'échantillon	État de l'huile d'imprégnation	% H ₂ O du papier avant vieillissement	% H ₂ O du papier après vieillissement	DP théorique	DP* atteint 1 ^{ère} mesure	DP atteint 2 ^{ème} mesure
IHN1100	Neuve	1	1	1100	1138.71	1144.77
IHV1100	Vieillie	1	1	1100	1138.71	1144.77
IHN800	Neuve	1	inconnu	800	807.10	810.07
IHV800	Vieillie	1	inconnu	800	807.10	810.07
IHN500	Neuve	1	inconnu	500	498.87	432.52
IHV500	Vieillie	1	inconnu	500	498.87	432.52
IHN200	Neuve	1	inconnu	200	183.57	182.10
IHV200	Vieillie	1	inconnu	200	183.57	182.10

*L'erreur de la mesure est de l'ordre de ± 40

Il est important de mentionner qu'au début du vieillissement, une odeur de brûlé s'est faite sentir. Après vérification auprès du fabricant, il s'est avéré que les bouchons contenaient une partie en caoutchouc qui assure l'étanchéité de la bouteille. Les spécifications mentionnaient que la température que ces bouchons pouvaient supporter était de 120°C pour 20 minutes. L'étanchéité des bouteilles n'a pu être garantie ce qui explique certains résultats.

Le nombre d'échantillons a été déterminé afin de s'assurer de la reproductibilité des mesures. Aussi, parmi l'ensemble des échantillons, un certain nombre a été prévu pour permettre les mesures du DP et de l'humidité. L'organigramme de la procédure d'expérience est présenté en annexe incluant le nombre d'échantillons utilisés.

Pour le deuxième volet, la procédure d'expérience s'est déroulée de la même façon que pour le 1^{er} volet et ce, pour toutes les étapes, c'est-à-dire les mesures prises dans la boîte à gants, l'imprégnation dans la boîte à gants et le temps de brassage des échantillons. Le seul

changement se situe au niveau de l'imprégnation qui s'est effectuée avant le vieillissement plutôt qu'après, afin de vérifier si les produits de dégradation du papier seraient retenus par l'huile. Les électrodes ont été installés à l'air ambiant en raison de la difficulté pour l'installation des électrodes sur le papier imprégné. Puisque les échantillons imprégnés ont une cinétique d'absorption de l'humidité beaucoup plus lente que ceux non imprégnés et puisque le temps de pose des électrodes est de quelques minutes seulement pour chaque échantillon, il n'était pas nécessaire d'effectuer l'installation des électrodes à humidité contrôlée pour les échantillons imprégnés. Les conditions avant et après vieillissement du 2^{ème} volet de l'expérimentation sont présentées au Tableau 6.3.

Tableau 6.3

Tableau des conditions avant et après vieillissement des échantillons papier, 2^{ème} volet de l'expérimentation

Nom de l'échantillon	Type d'huile d'imprégnation	% H₂O à la mesure	DP théorique	DP* atteint 1^{ère} mesure	DP atteint 2^{ème} mesure
ECX800	Nynas 10CX	1	800	731	ND
ECX600	Nynas 10CX	1	600	786	ND
ECX200	Nynas 10CX	1	200	580	ND
LUM800	Luminol Tri	1	800	747	672
LUM600	Luminol Tri	1	600	655	ND
LUM200	Luminol Tri	1	200	608	716

*L'erreur de la mesure est de l'ordre de ± 40

6.5 Conditionnement des échantillons

Aucune mesure du taux d'humidité du papier n'a pu être effectuée à l'IREQ en raison du manque de disponibilité du personnel qualifié. Le taux d'humidité du papier a été déterminé théoriquement à partir des courbes d'Oommen, Figure 4.12. Les échantillons ont été conditionnés afin d'obtenir un pourcentage d'humidité dans le papier d'environ 1%, ce qui

correspond à 2.5 à 3% d'humidité relative dans la boîte à gants. Les mesures FDS ont servi à déterminer si l'équilibre était atteint tel qu'illustré à la Figure 6.4.

Tout d'abord, une mesure initiale, datée du 15 juin, a été effectuée sur un échantillon à l'air ambiant. On remarque que les pertes sont élevées et que la forme de la courbe s'approche d'une ligne droite. Ensuite, afin de réduire le temps de conditionnement, les échantillons ont été placés dans une cloche sous vide. Le taux d'humidité du papier n'atteint pas 0% mais s'approche de cette valeur. Puis finalement, les échantillons ont été placés dans la boîte à 2.5% d'humidité pour atteindre l'équilibre en quelques jours seulement. Les dernières mesures du 25, 26 et 27 juin se superposent, ce qui assure que l'équilibre est atteint.

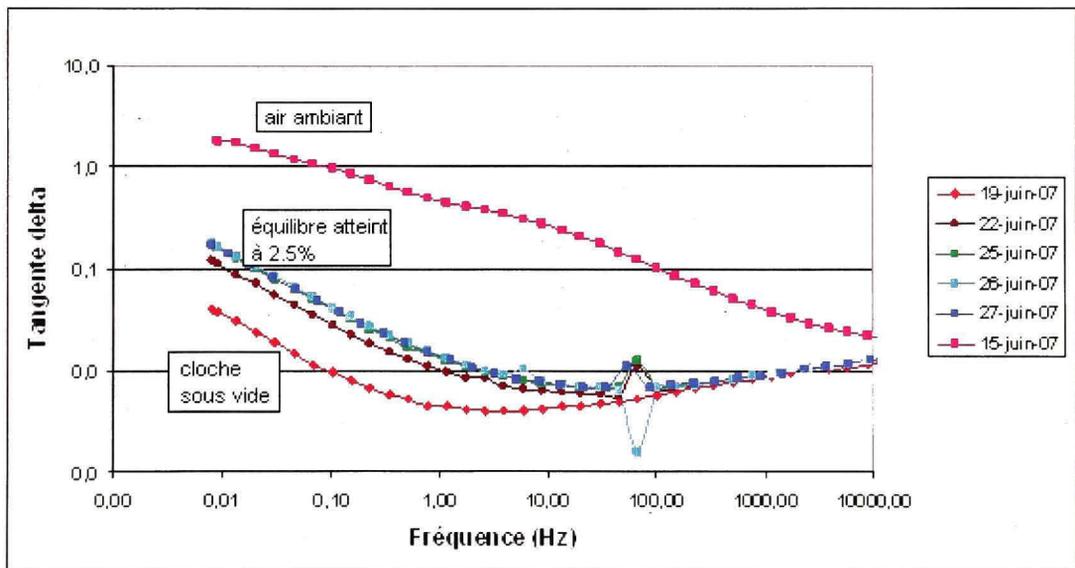


Figure 6.4 Conditionnement des échantillons non-imprégnés.

Dans le premier volet de l'expérimentation, quelques échantillons imprégnés d'huile ont été reconditionnés en humidité. Comme mentionné à la partie théorique, l'échange de l'humidité entre l'air et le papier imprégné requiert beaucoup plus de temps que pour le papier non-imprégné. La Figure 6.5 est un exemple de conditionnement de papier imprégné avec une augmentation de l'humidité. Les mesures n'ont pas été prises à intervalles réguliers, mais il est clair que l'équilibre a été atteint puisque les dernières mesures, s'étalant sur une semaine, ne présentent aucune variation de la tangente delta.

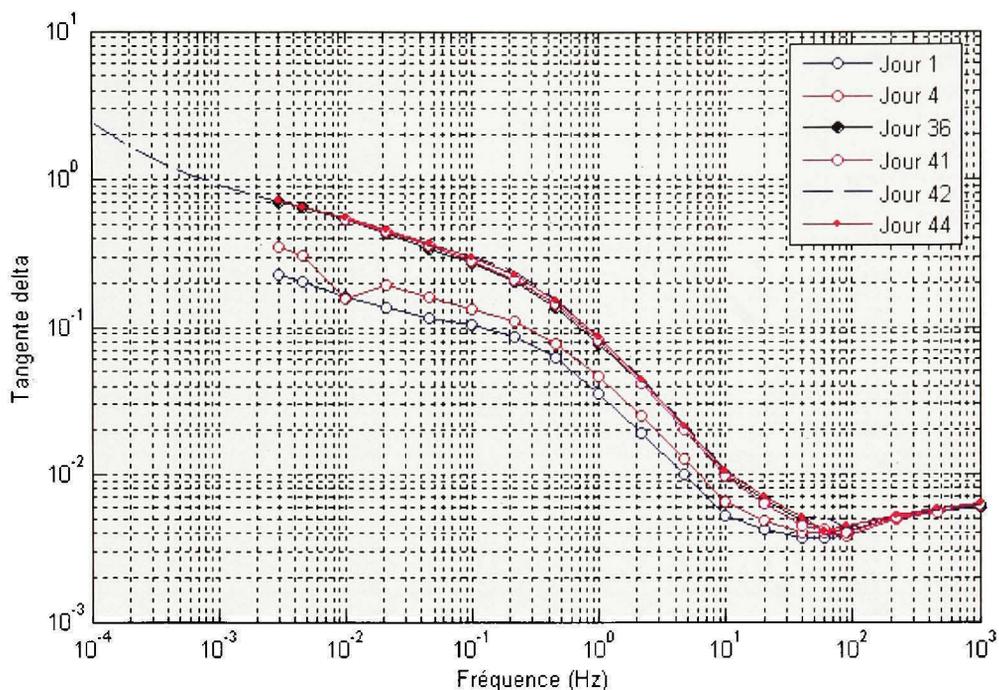


Figure 6.5 *Conditionnement d'un échantillon d'huile Luminol à 600DP après vieillissement.*

6.6 Reproductibilité des mesures

Comme mentionné au début de cette section, il est important de s'assurer de la reproductibilité des mesures. Pour le premier volet de l'expérimentation, six échantillons de chaque catégorie ont été prévus pour les mesures. Dans la plupart des cas, seulement cinq mesures ont été analysées pour diverses raisons. Comme par exemple trop de bruit sur une mesure, ou la mise de côté d'un échantillon en raison d'un dommage survenu lors des manipulations. La reproductibilité des mesures a été vérifiée pour tous les groupes de DP. La Figure 6.6 présente un exemple de mesures pour cinq échantillons à un DP de 500 imprégnés d'huile neuve et numérotés d'IHN500-1 à IHN500-6.

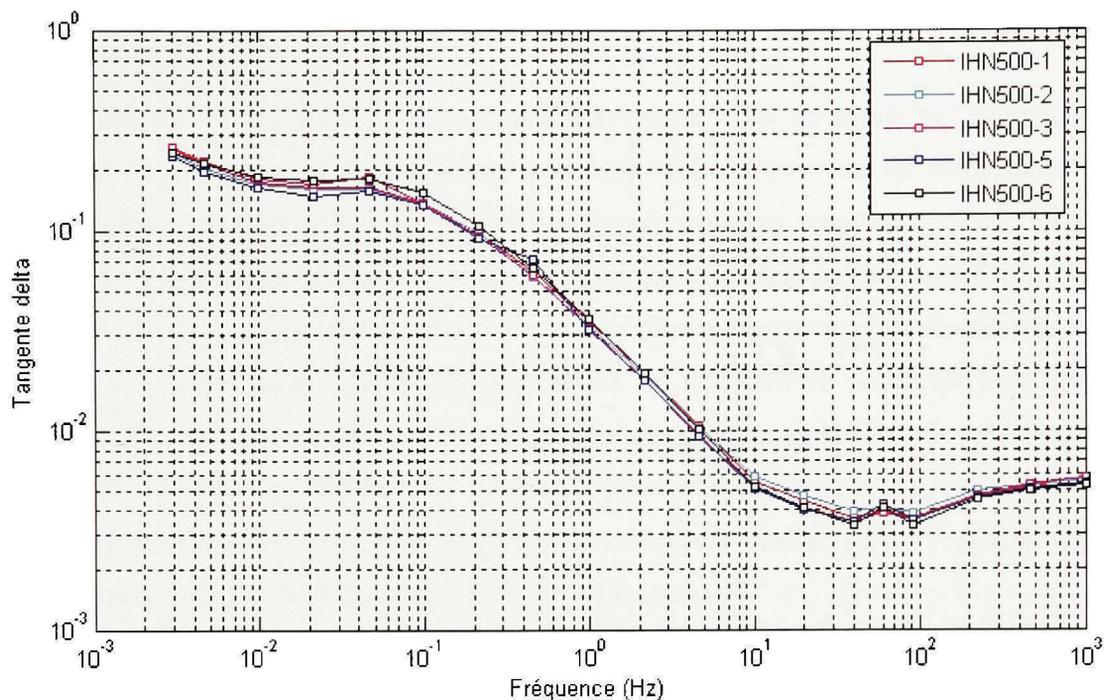


Figure 6.6 *Reproductibilité des mesures sur cinq échantillons imprégnés d'huile neuve à 500 DP.*

Tableau 6.4

Tableau du calcul d'erreur de la $\tan \delta$ à 0.003Hz pour la reproductibilité des mesures

Nom de l'échantillon	Moyenne $\tan \delta$	% écart-type	Écart entre max et min	Erreur absolue	Pourcentage d'erreur (%)
IHN1100	0.6553	4.08	0.0672	0.0336	5.1
IHV1100	0.7157	1.67	0.03343	0.0167	2.3
IHN800	0.4879	5.60	0.06386	0.0319	6.5
IHV800	0.6329	3.74	0.06929	0.0346	5.5
IHN500	0.2479	4.35	0.0284	0.0142	5.7
IHV500	0.3228	5.28	0.0437	0.0218	6.7
IHN200	0.8104	7.44	0.144	0.072	8.8
IHV200	0.7928	ND*	ND	ND	ND

*Seulement une mesure a été prise

6.7 Premier volet de l'expérimentation : Échantillons vieillis sans imprégnation

La difficulté à déterminer s'il existe une corrélation entre le DP du papier et l'augmentation des pertes diélectriques est de déterminer la contribution des produits de vieillissement de l'huile puisque cette dernière vieillie avec le papier dans les transformateurs. De plus, presque toutes les expériences faites jusqu'à ce jour par différents auteurs, afin d'observer la corrélation entre les mesures du diélectrique et le vieillissement du papier, se sont effectuées sur du papier vieilli avec l'huile. En vieillissant les échantillons de papier à différentes valeurs du DP et en les imprégnant tous avec la même huile par la suite, il devenait possible d'écarter l'effet du vieillissement de l'huile. Le but d'avoir deux groupes d'échantillons imprégnés d'huile neuve et d'huile vieillie était d'observer l'influence du vieillissement de l'huile. Les résultats seront discutés à la fin de cette section.

6.7.1 Mesures

Le Tableau 6.5 présente les caractéristiques de la mesure en fréquence. Puisque l'huile n'a pas été vieillie lors de l'expérimentation, les conditions de l'huile sont restées les mêmes pour toutes les mesures.

Tableau 6.5

Caractéristiques de la mesure en fréquence

Caractéristiques	
Appareil	IDA 200
Tension d'application	10 V RMS
Plage de fréquences	0.003 à 1kHz

6.7.2 Présentation des résultats et discussion

6.7.2.1 Échantillons imprégnés d'huile neuve, mesures après vieillissement

Les résultats des échantillons imprégnés d'huile neuve sont présentés à la Figure 6.7. Cette figure démontre clairement une variation des pertes avec le DP qui se traduit par une diminution des pertes avec la diminution du DP du papier, soit l'inverse de ce qui a été observé sur les maquettes. Excepté pour la mesure de l'échantillon à 200 DP qui est légèrement plus élevée que la mesure du papier neuf.

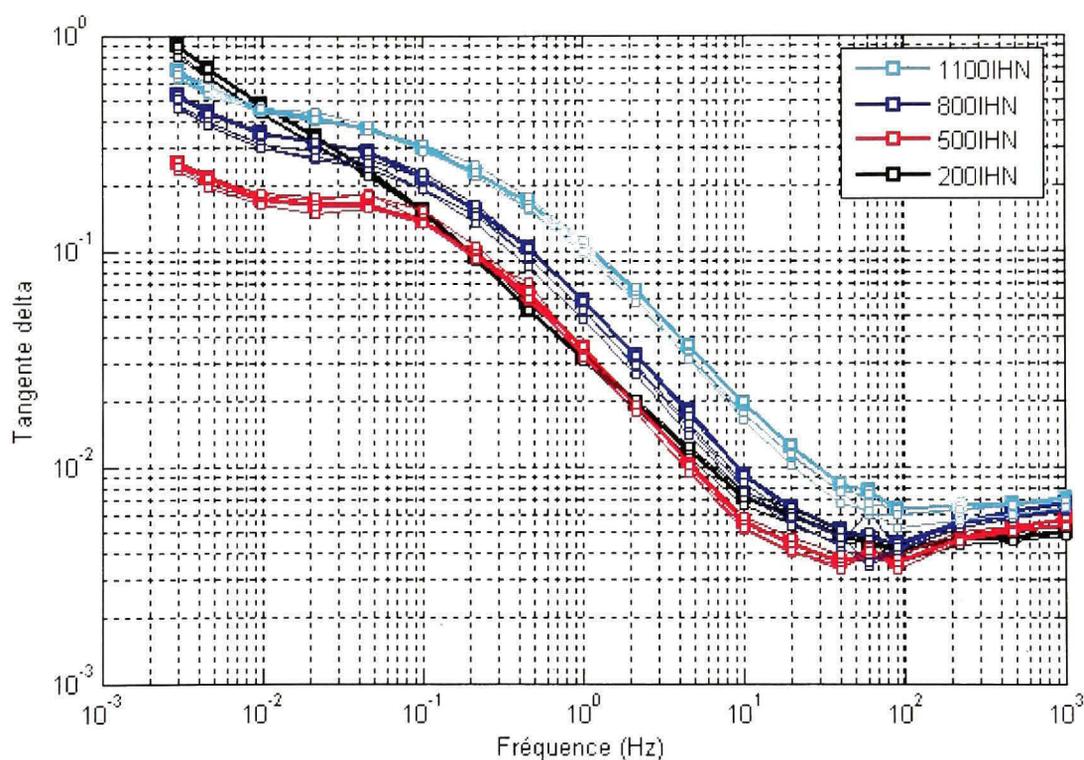


Figure 6.7 *Échantillons imprégnés d'huile neuve, mesures après vieillissement.*

Une des explications de ces résultats est une variation de l'humidité des échantillons due au manque d'étanchéité des bouchons. En effet, plus les échantillons sont chauffés, plus l'humidité contenue dans le papier s'évapore. Avec le délai de 48 heures avant l'ouverture des bouteilles après le vieillissement, on s'assurait que l'humidité contenue dans la bouteille

retournerait dans l'échantillon à la température ambiante. Afin de vérifier cette hypothèse, trois échantillons imprégnés d'huile neuve de chaque DP ont été mis à l'équilibre dans la boîte à gants. Les mesures prises pendant la période de conditionnement, tel qu'illustré à la Figure 6.5, montrent une augmentation des pertes jusqu'à l'équilibre, ce qui représente une augmentation du taux d'humidité. Les mesures ont été reprises et les résultats sont présentés à la section 6.7.2.2.

6.7.2.2 Échantillons imprégnés d'huile neuve après le reconditionnement

Les résultats des mesures prises après l'équilibre en humidité sont présentés à la Figure 6.8. Puisque les échantillons neufs n'ont subi aucun vieillissement, leur taux d'humidité est demeuré constant. Le conditionnement en humidité a eu pour effet de diminuer la variation des pertes avec le DP. Pour les échantillons à 500 DP, la variation des pertes avant et après le reconditionnement est plus importante que celle à 800 DP. On peut donc supposer que les échantillons soumis plus longtemps à une température de 110°C ont subi une plus grande évaporation de l'eau. Cependant, même avec l'augmentation des pertes, la corrélation entre les pertes et le DP demeure la même, soit la diminution des pertes avec la diminution du DP. La différence est cependant plus faible entre les échantillons de DP différents.

Les mesures sur les échantillons à 200 DP présentent des pertes légèrement plus élevées que le papier neuf et il y a absence d'un pic de relaxation. Ces résultats peuvent s'expliquer de deux façons, la présence d'un taux d'humidité plus élevé dans ces échantillons et/ou la présence de produits de dégradation. Il se peut aussi qu'à partir d'un vieillissement avancé, certains produits de dégradation soient présents en plus grande quantité dans le papier et affectent les pertes diélectriques. Si c'était le cas, cette augmentation des pertes ne justifierait pas de s'y attarder puisqu'elle apparaît à un vieillissement très avancé seulement et que la variation n'est pas très grande par rapport au papier neuf.

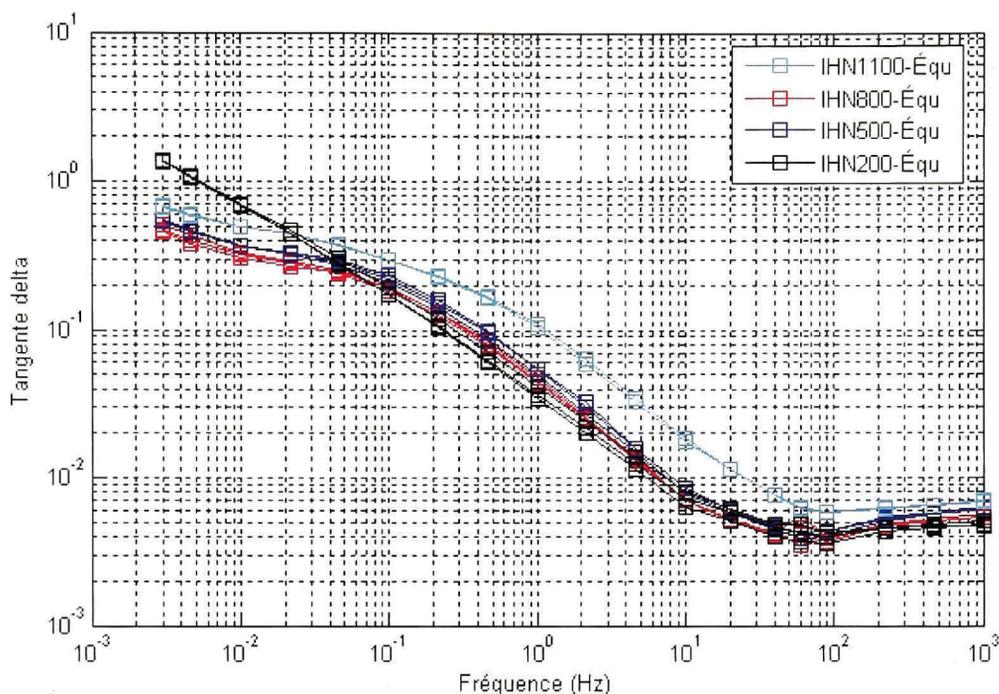


Figure 6.8 *Échantillons imprégnés d'huile neuve, mesures à l'équilibre.*

6.7.2.3 Échantillons imprégnés d'huile vieillie, mesures après vieillissement

Les mesures effectuées sur les échantillons imprégnés d'huile vieillie sont présentées à la Figure 6.9. On observe que les pertes diminuent avec la diminution du DP tout comme pour les échantillons imprégnés d'huile neuve. Cependant la différence est moins grande entre les mesures du papier neuf et celles du papier à 800 DP. Les explications sont présentées à la section 6.7.2.4.

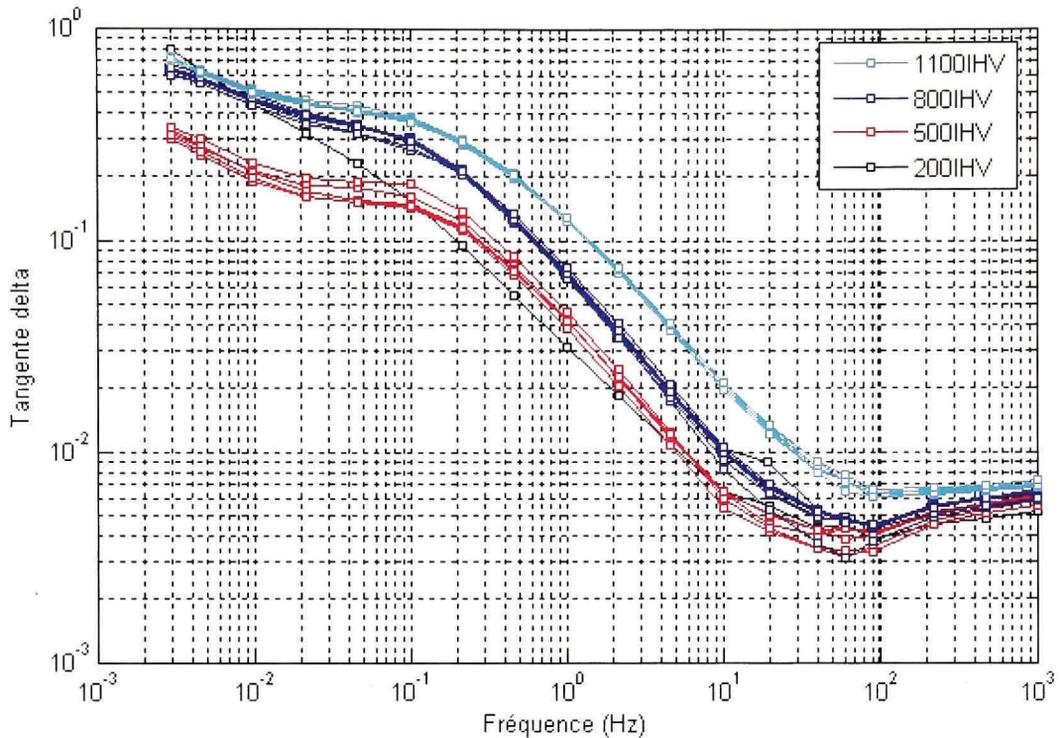


Figure 6.9 *Échantillons imprégnés d'huile vieillie, mesures après vieillissement.*

6.7.2.4 Comparaison entre les échantillons imprégnés d'huile neuve et vieillie

L'effet du vieillissement de l'huile sur les mesures est démontré par la comparaison entre le papier imprégné d'huile vieillie et d'huile neuve. Un exemple de cette différence est illustré à la Figure 6.10 pour les échantillons à 500 DP. On remarque que la mesure des échantillons d'huile vieillie présente des pertes plus élevées. De plus, l'augmentation des pertes est visible sur presque toute la plage de fréquence soit de 10 Hz à 0.003 Hz. Dans la littérature, on considère que la mesure diélectrique à la fréquence de 0.003 Hz est influencée par la conductivité de l'huile, ce qui est confirmé ici.

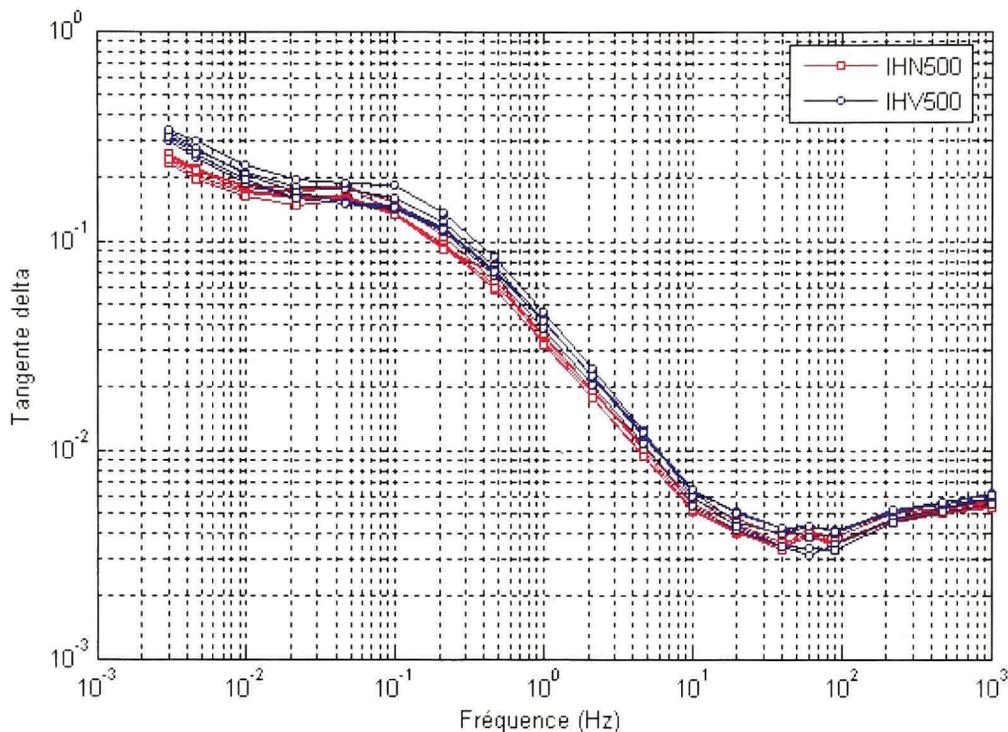


Figure 6.10 *Échantillons imprégnés d'huile neuve et d'huile vieillie pour la mesure à 500 DP.*

La Figure 6.11 montre la différence entre les échantillons imprégnés d'huile neuve et vieillie avec une mesure moyenne représentant chaque groupe de DP. On note que l'huile influence les mesures sur presque toute la plage de fréquence pour tous les échantillons. La différence de l'amplitude des pertes diélectriques pour les échantillons de 500 et 1100 de DP, entre 0.1 et 0.01Hz s'atténue simplement due à la présence du pic de relaxation.

Le Tableau 6.6 présente le pourcentage d'écart à la fréquence de 0.003Hz entre les échantillons imprégnés d'huile neuve et d'huile vieillie, calculé pour chaque DP. Les DP de 1100, 800 et 500 présentent des écarts de 9.2, 29.7 et 30.2% respectivement tandis que le papier vieilli à 200 DP présente un pourcentage d'écart de seulement 2.2%, ce qui peut être considéré comme négligeable puisque cette valeur s'approche de la précision des mesures (voir Tableau 6.4).

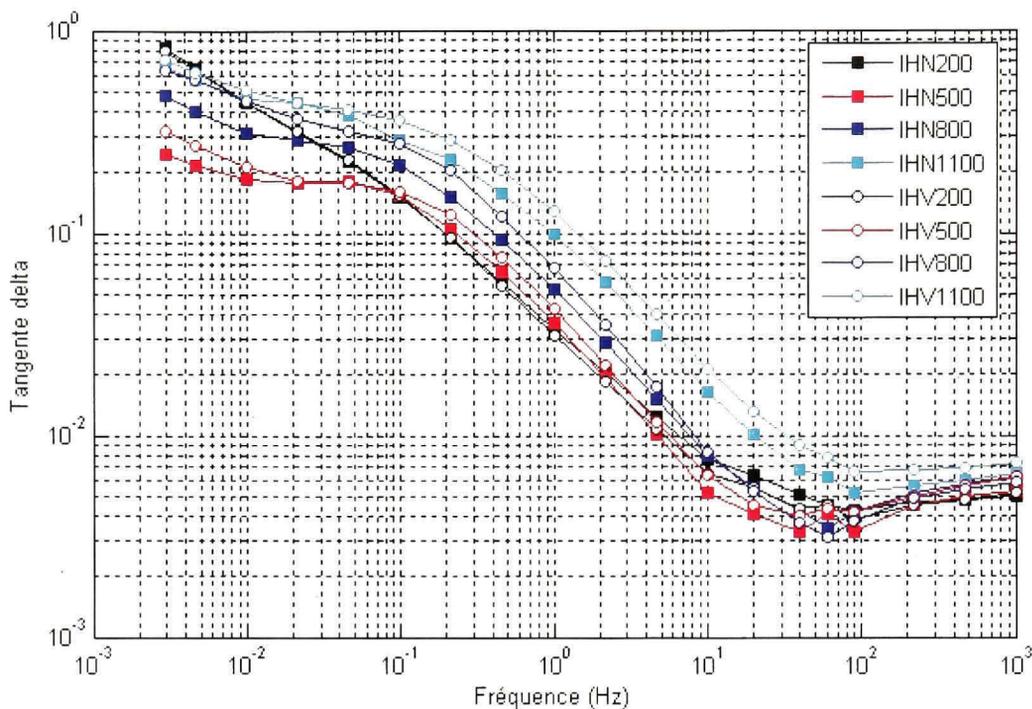


Figure 6.11 Comparaison des échantillons imprégnés d'huile neuve et vieille pour tous les DP à partir d'une mesure moyenne.

Tableau 6.6

Écarts entre les valeurs de la $\tan \delta$ à 0.003Hz entre les échantillons imprégnés d'huile neuve et d'huile vieillie

Nom de l'échantillon	moyenne	Écart entre les valeurs moyennes	Pourcentage d'écart p/r à IHN (%)
IHN1100	0.6553	0.0604	9.2
IHV1100	0.7157		
IHN800	0.4879	0.1450	29.7
IHV800	0.6329		
IHN500	0.2479	0.0749	30.2
IHV500	0.3228		
IHN200	0.8104	-0.0176	-2.2
IHV200	0.7928		

L'absence de différences des pertes entre les échantillons à 200 DP imprégnés d'huile neuve et d'huile vieillie semble montrer que le taux d'humidité est assez élevé pour masquer le vieillissement de l'huile. Cependant, cette interprétation ne peut être confirmée puisque le taux d'humidité exact dans les échantillons n'est pas connu. Si on attribuait la forme de la courbe à une augmentation des produits de dégradation, alors les résultats pourraient s'expliquer dans le sens où les produits de dégradation du papier sont assez élevés pour masquer l'effet du vieillissement de l'huile. Comme dans la première interprétation, ce n'est qu'une hypothèse puisqu'aucune mesure des produits de dégradation du papier n'a été effectuée.

6.7.3 Conclusion

À partir des mesures effectuées sur les échantillons vieillis sans imprégnation, on observe que :

- Les pertes diélectriques diminuent légèrement avec le vieillissement du papier (diminution du DP).
- Les pertes diélectriques augmentent avec le vieillissement de l'huile (comparaison huile vieillie-huile neuve).
- L'influence de l'huile sur la mesure diélectrique est visible de 0.003 Hz à 10 Hz pour les mesures prises sur la plage de fréquences de 0.003 à 1 kHz.

La variation des pertes diélectriques diminuant avec la diminution du DP peut être produites par deux phénomènes :

- La perte d'humidité dans les échantillons suite au vieillissement. Ceci a été confirmé en partie puisque la mise à l'équilibre avec l'humidité a permis de réduire la variation des pertes diélectriques.
- La diminution de la longueur des chaînes de cellulose produite par le vieillissement. La diminution du DP peut se traduire par une diminution de la conductivité.

Il est clair que si des produits de dégradation ont été créés par le vieillissement du papier ceux-ci n'ont pas contribué à augmenter les pertes. Il est possible que certains de ces produits volatils se soit évaporés durant le vieillissement.

6.8 Deuxième volet de l'expérimentation : Échantillons vieillis avec imprégnation

À la lumière des résultats obtenus précédemment, il a été convenu d'effectuer un vieillissement d'échantillons imprégnés d'huile. Aussi, pour vérifier si les résultats seraient semblables à ceux des maquettes, un groupe a été imprégné avec l'huile Luminol Tri et un groupe avec l'huile Nynas 10CX.

Le premier volet de l'expérimentation a démontré que la démarche expérimentale assurait la reproductibilité des mesures dans un premier temps et que les échantillons nécessitaient un reconditionnement en humidité après le vieillissement dans un deuxième temps. C'est pourquoi les mesures ont été effectuées seulement sur deux ou trois échantillons de chaque groupe et seulement après le reconditionnement en humidité.

Il est cependant important de noter qu'il n'y a pas eu d'échantillonnage pour la mesure du DP pendant le vieillissement du à manque de disponibilité de l'équipement de mesure. Ceci a été une erreur puisqu'une partie des échantillons n'est pas représentatif du vieillissement. Cependant, il est quand même possible de tirer des conclusions importantes.

6.8.1 Mesure

Les paramètres des mesures sont les mêmes que pour l'expérimentation précédente à l'exception de la plage de fréquence. Toutes les mesures ont été faites de 0.001 Hz à 1 kHz au lieu de 0.003 Hz à 1 kHz. De plus, une mesure par groupe de DP a été effectuée jusqu'à 0.0001 Hz afin d'obtenir une plus grande compréhension des pertes en basses fréquences. Les paramètres de mesure sont présentés au Tableau 6.7.

Tableau 6.7

Caractéristiques de la mesure en fréquence

Caractéristiques	
Appareil	IDA 200
Tension d'application	10 V RMS
Plage de fréquences	0.0001 à 1kHz

Tableau 6.8

Temps de vieillissement des échantillons sur cavalier

Nom de l'échantillon	Huile d'imprégnation	DP théorique	Temps de vieillissement (jours)	DP* atteint 1 ^{ère} mesure	DP atteint 2 ^{ème} mesure
IHN800	Nitro 10CX	800	14	807	810
IHN500	Nitro 10CX	500	42	498	432
IHN200	Nitro 10CX	200	162	182	183
ECX800	Nitro 10CX	800	15	731	ND
ECX600	Nitro 10CX	600	43	786	ND
ECX200	Nitro 10CX	400	66	580	ND
LUM800	Luminol Tri	800	20	747	672
LUM600	Luminol Tri	600	46	655	ND
LUM200	Luminol Tri	400	70	608	716

*L'erreur de la mesure du DP est de l'ordre de ± 40

Comme mentionné précédemment, les mesures du DP ont montré peu de différence entre chaque groupe d'échantillons bien que le temps de vieillissement ait été semblable à celui du premier volet. Le temps de vieillissement relié à chaque groupe de DP est présenté au Tableau 6.8. On remarque que la mesure du DP après 43 heures de vieillissement est plus élevée que la mesure à 15 heures de vieillissement pour les échantillons imprégnés d'huile

Nitro 10CX. Les résultats de la mesure du DP peuvent être le résultat d'une variation de la température des fours mais aussi sont tributaires de l'erreur générée par l'appareil de mesure.

6.8.2 Présentation des résultats et discussion

6.8.2.1 Échantillons imprégnés d'huile Nynas Nitro 10CX

Les résultats pour les échantillons vieillis avec l'huile d'imprégnation Nitro 10CX sont présentés à la Figure 6.12. On remarque que la reproductibilité des mesures n'est pas aussi précise que pour le premier volet. Le manque d'adhérence de l'électrode de cuivre sur le papier imprégné est la principale raison de cette différence mais une mauvaise imprégnation peut aussi causer des variations de la mesure.

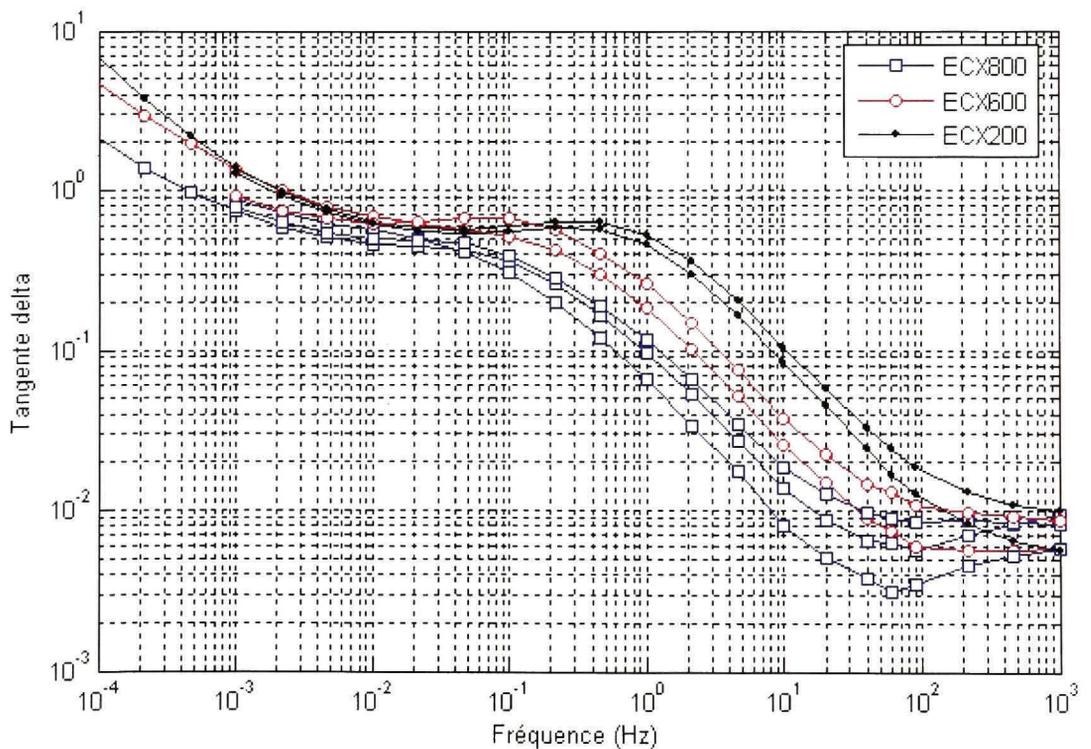


Figure 6.12 Échantillons de papier imprégnés d'huile Nitro 10CX.

Malgré le manque de précision des mesures de DP, on remarque une augmentation des pertes sur presque toute la plage de fréquences et la présence du pic de relaxation qui se déplace avec le vieillissement de l'huile. Rappelons que le même effet a été observé sur les maquettes. Ce pic de relaxation qui se déplace représente la variation de la conductivité de l'huile. On peut attribuer la variation des pertes diélectriques au vieillissement de l'huile.

6.8.2.2 Échantillons imprégnés d'huile Luminol Tri

Malgré un vieillissement semblable aux échantillons imprégnés d'huile Nitro 10CX, les mesures des échantillons imprégnés d'huile Luminol Tri présentent très peu de variations des pertes sur toute la plage des fréquences tel qu'illustré à la Figure 6.13. On peut remarquer que l'huile n'a pas subi de vieillissement marqué comme l'huile Nitro 10CX. L'écart entre les mesures est principalement dû à la reproductibilité de la mesure plutôt qu'au vieillissement de l'huile. On remarque un faible pic de relaxation dû à la faible conductivité de l'huile et le peu de variation des pertes à la fréquence de 0.0001 Hz.

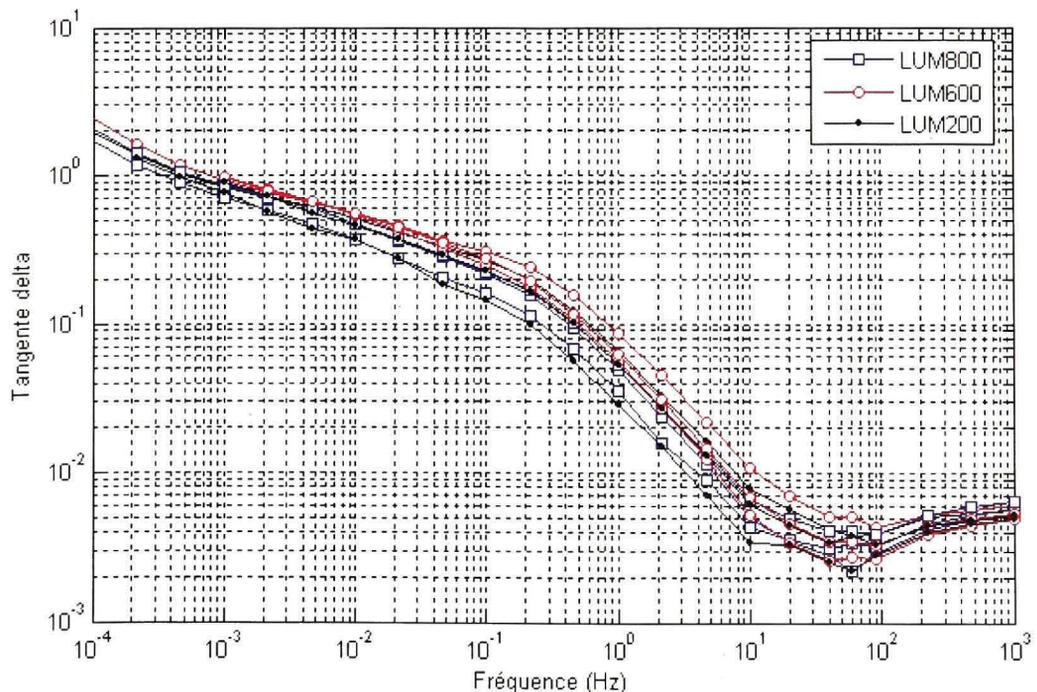


Figure 6.13 Échantillons de papier imprégnés d'huile Luminol Tri.

6.8.2.3 Comparaison des échantillons imprégnés d'huile Luminol Tri et Nitro 10CX

L'interprétation des résultats est possible seulement avec la comparaison des deux groupes de mesures illustrée à la Figure 6.14. On remarque que les pertes des échantillons imprégnés d'huile Luminol sont inférieures ou égales à la mesure représentant le moins de pertes pour les échantillons d'huile Nitro 10CX. Par ces résultats on peut conclure que l'ensemble de la mesure en fréquence est dominée par la mesure d'huile, même en basses fréquences.

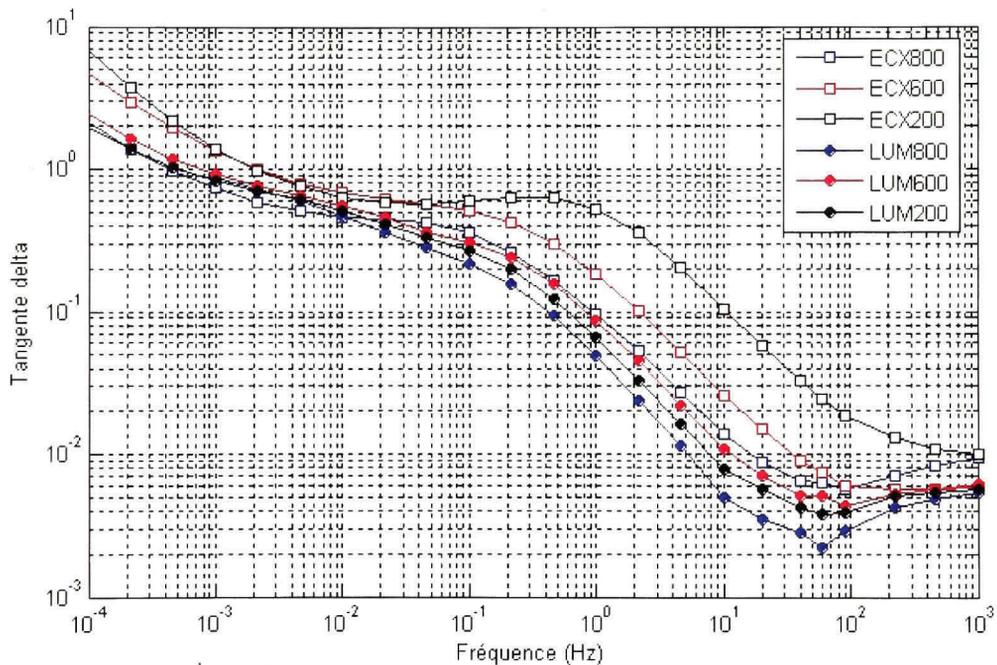


Figure 6.14 Comparaison entre les échantillons imprégnés d'huile Luminol et Nitro 10CX.

6.9 Conclusion

Les mesures sur les échantillons vieillis avec l'huile d'imprégnation ont permis de constater les points suivants :

- L'huile d'imprégnation influence la mesure diélectrique sur toute la plage de fréquence.

- 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'a pas permis de vérifier cette influence à des DP inférieurs à 600.
- Le type d'huile utilisé influence les mesures diélectriques.
- Le vieillissement d'une huile s'oxydant facilement contribue à l'augmentation des pertes diélectriques jusqu'à la fréquence d'au moins 0.0001Hz sur le papier imprégné.

Une étude plus poussée est nécessaire afin de clarifier le rôle des produits de dégradation du papier et de l'huile.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif visé par cette étude est de séparer l'influence du vieillissement du papier de l'influence de l'humidité et du vieillissement de l'huile sur les mesures diélectriques. Dans le cas où il y aurait une corrélation du vieillissement du papier avec les mesures diélectriques, une application utilisable sur le terrain pourrait être développée. Pour cette application, il s'avérerait nécessaire de vérifier et de modéliser la dépendance à la température des mesures diélectriques.

L'ensemble des mesures diélectriques réalisées dans le cadre de ce mémoire mène aux conclusions suivantes :

Même si une corrélation apparente existe entre l'augmentation des pertes à basse fréquence et le vieillissement du papier mesuré par le degré de polymérisation sur la plupart des cuves mesurées, d'autres mesures mettent sérieusement en doute que cet effet soit lié au vieillissement du papier lui-même.

- Les cuves vieilles en présence d'huile Luminol, malgré la chute importante du DP, ne montrent pas d'augmentation significative des pertes à basses fréquences pendant le vieillissement.
- Les mesures réalisées sur les échantillons d'enroulement vieillis sans huile et imprégnés par de l'huile neuve après le vieillissement ne révèlent **aucune augmentation** des pertes en fonction du vieillissement (on peut même noter une diminution).

Il apparaît donc que les produits générés par la dégradation du papier et/ou la réduction des chaînes de cellulose n'entraînent pas une augmentation mesurable des pertes du papier. Sans l'avoir démontré formellement nous pensons que l'apparente corrélation observée provient d'un vieillissement simultané de l'huile et que les produits de dégradation de l'huile en migrant vers le papier contribuent à augmenter les pertes en produisant une corrélation

apparente avec la dégradation du papier. Cette hypothèse explique l'observation selon laquelle aucune corrélation n'a été observée avec l'huile Luminol.

Comme conclusion générale et suite aux mesures réalisées dans le cadre du projet complexe papier-huile, les mesures diélectriques ne sont pas sensibles comme telles au vieillissement du papier et ne pourront pas être utilisées comme outil de diagnostic sur le terrain afin de déterminer l'état de dégradation du papier d'isolation. Leur sensibilité au vieillissement de l'huile à elle seule ne constitue pas une raison suffisante pour procéder à leur implantation dans le réseau.

- La dépendance à la température du complexe papier/huile suit une loi d'Arrhenius qui peut être modélisée afin de permettre la normalisation de mesures prises à différentes températures. Cette loi a été vérifiée pour des températures variant entre 10°C et 50°C et s'applique pour des taux d'humidité inférieur à 3.3%.

La modélisation de la permittivité du papier basée sur le modèle XY de l'isolation des transformateurs de puissance permet d'améliorer la corrélation avec le DP en éliminant l'influence de la conductivité de l'huile et permet une amélioration de la corrélation pour des taux moyens d'humidité du papier. Cette étude est un apport important à la communauté scientifique quant à la compréhension de la dépendance au vieillissement du papier des mesures diélectriques.

Pour une meilleure compréhension de la nature et du comportement des produits de dégradation de l'huile et du papier sur les mesures diélectriques, une étude reprenant le même principe que celle-ci, sur des échantillons d'enroulement, permettrait d'obtenir un portrait plus complet. Des recommandations basées sur les connaissances acquises au cours de cette expérience sont présentées à la prochaine section.

RECOMMANDATIONS

Les premières mesures effectuées sur le système d'isolation papier/huile des maquettes de transformateurs ont révélées une corrélation entre le DP et les mesures diélectriques à des taux d'humidité du papier inférieurs à 2.3 %. Les premières mesures sur les échantillons de papier ont permis de clarifier la dépendance du DP aux mesures diélectriques, à savoir qu'il n'y a pas de corrélation. La deuxième partie des mesures sur les échantillons de papier imprégné d'huile Nitro 10CX et Luminol Tri ont montré une corrélation avec le DP du papier pour ceux imprégnés d'huile Nynas 10CX mais cette corrélation semble être le résultat de l'influence de l'huile. L'interprétation des résultats est difficile dû au nombre limité d'échantillons vieillis pour l'huile Luminol Tri.

Une étude axée sur les mesures des échantillons papier et d'échantillons d'huile permettraient de compléter cette étude et de confirmer ce qui a déjà été étudié. Les points à étudier sont les suivants :

Effectuer des mesure en laboratoire sur :

- L'humidité du papier;
- Le degré de polymérisation (DP);
- L'acidité du papier;
- La caractérisation de l'huile.

Vérifier le rôle de l'humidité en fonction du vieillissement sur les mesures diélectriques comme étape préliminaire.

(Linhjell, Gafvert et Lundgaard, 2004) observent que l'humidité amplifie l'effet du vieillissement sur les mesures diélectriques. Des mesures préliminaires devraient être effectuées sur des échantillons vieillis à différents degrés de vieillissement et à différents taux d'humidité. Les taux d'humidité des échantillons devraient varier de 0.7 et 2.5% d'humidité du papier qui représente le taux habituellement présent dans l'isolation des

transformateurs de puissance. Le choix du taux d'humidité pour les mesures devrait être déterminé en fonction de ces résultats.

Éviter d'utiliser des mesures sur de l'huile et du papier neufs dans l'interprétation des résultats.

Les mesures diélectriques du papier imprégné d'huile sont fortement modifiées après la première étape du vieillissement (Yao et Saha, 2002). Il se peut que cette modification soit attribuée à l'huile. Afin d'éviter d'obtenir des résultats pouvant biaiser la corrélation, il serait préférable de vieillir l'huile ou le papier, selon le cas, de quelques jours avant la première mesure.

Vérifier le rôle des produits polaires générés par la dégradation du papier et de l'huile sur les mesures diélectriques.

Les mesures effectuées sur les échantillons de papier vieillis sans imprégnation ont démontré que le DP n'a pas d'influence sur les pertes diélectriques sinon celle de les diminuer. Seuls les produits de dégradation du papier et/ou de l'huile pourraient contribuer à l'augmentation des pertes diélectriques. C'est ce qui a été démontré à la dernière partie de l'expérimentation sur les échantillons de papier.

Vérifier le rôle du vieillissement du papier et de l'huile.

Les mesures sur les échantillons de papier vieillis avec imprégnation démontrent des pertes diélectriques plus élevées, et ce pour des DP plus élevés, comparativement au papier vieilli sans imprégnation. Est-ce que l'huile et le papier interagissent ensemble et accélèrent leur vieillissement propre? Des échantillons d'huile témoin devraient être vieillis en même temps que le papier imprégné d'huile. Des mesures diélectriques ainsi qu'une caractérisation de l'huile devraient être effectuées sur l'huile d'imprégnation et sur l'huile témoin. Une mesure de la conductivité de l'huile est aussi nécessaire pour l'interprétation de la mesure d'huile.

Utiliser une huile résistante à l'oxydation comme l'huile Luminol Tri et la comparer avec une huile ordinaire.

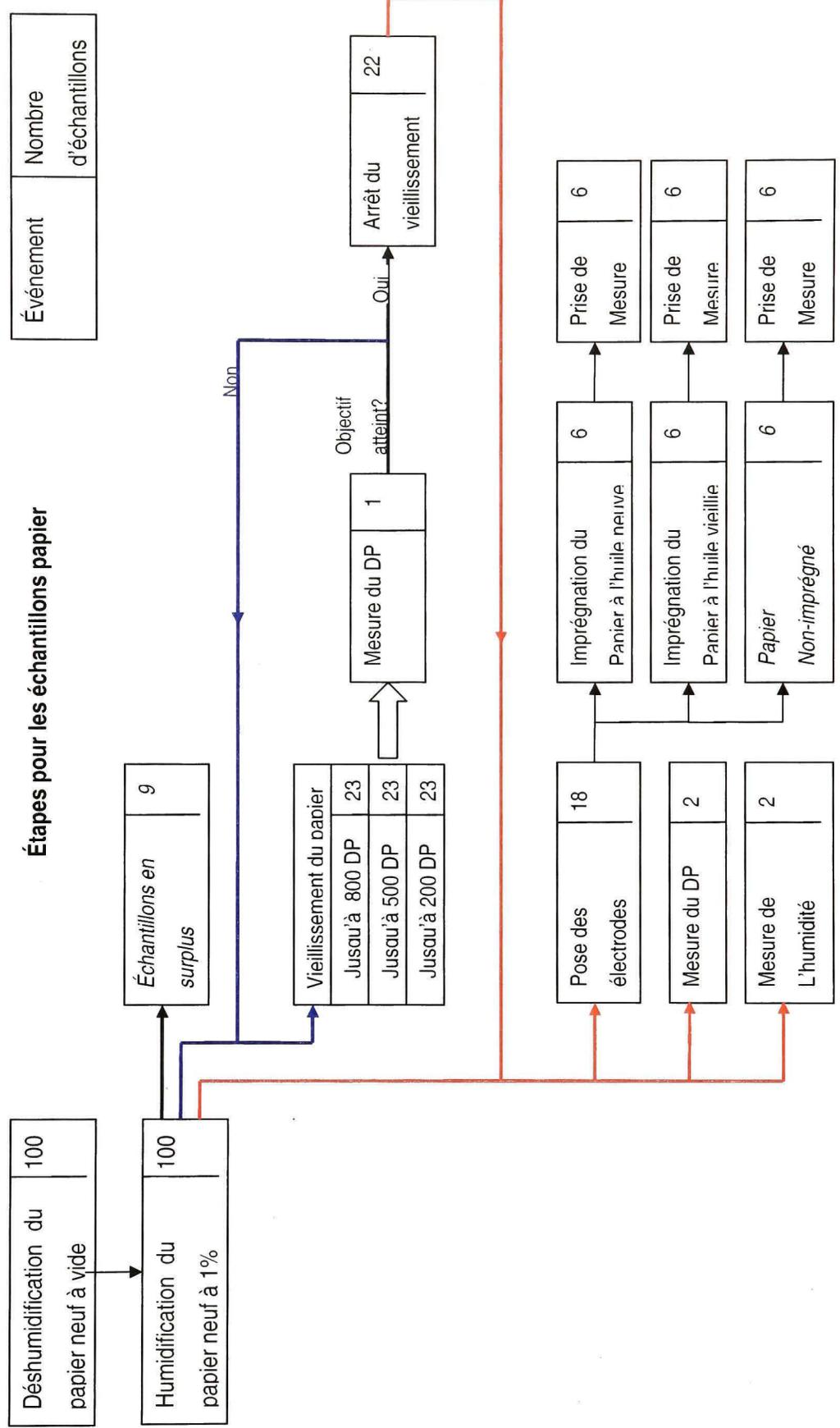
Le fait d'utiliser une huile peu oxydante très peu telle l'huile Luminol Tri est un moyen de séparer l'effet du vieillissement de l'huile de celui du papier puisque l'huile peu oxydante vieillit moins rapidement que le papier. On s'attend donc à ce que les produits de vieillissement proviennent principalement du papier et non de l'huile. C'est ce qui a été démontré à la section 6.8. Cependant, l'étude s'est limitée à des échantillons ayant un DP jusqu'à 600. Cette étude pourrait être prolongée jusqu'à des DP de 200.

Finalement il serait important d'effectuer un vieillissement sur des échantillons sans imprégnation afin de confirmer les résultats obtenus dans le 1^{er} volet de l'expérimentation.

ANNEXE I

ORGANIGRAMME DE L'EXPÉRIMENTATION

Organigramme de l'expérimentation



BIBLIOGRAPHIE

- Darveniza, M., T K Saha, D.J.T. Hill et T.T. 1992. « Assessment of Insulation in Aged Power Transformers and the Correlation Between the Electrical and Chemical Properties ». In *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)* (18-21 octobre 1992).
- Densley, R.J., et B K Gupta. 2001. « Effect of Temperature on Sensitivity of Diagnostic Tests on Oil-Impregnated Paper Insulation ». In *IEEE Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, EEIC* (16-18 October 2001).
- Du, Y, A V Mamishev, B C Lesieutre et M Zahn. 1998. « Measurement of Moisture Diffusion as a Function of Temperature and Moisture concentration in Transformer Pressboard ». In *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (25-28 October 1998). Massachusetts.
- Du, Y, M Zahn, N. Altamirano, M. Sarda, A V Mamishev et B C Lesieutre. 2002. « Moisture and Temperature Effects on the Dielectric Spectrum of Transformer Pressboard ». In *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)* (2002).
- Du, Y, M Zahn, B C Lesieutre, A V Mamishev et S R Lindgren. 1999. « Moisture Equilibrium in Transformer Paper-Oil Systems ». *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 15, n° 1 (Janvier 1999), p. 11-20.
- Gafvert, U. 2005. « Influence of Geometric Structure and Material Properties on Dielectric Frequency Response of Composite Oil Cellulose Insulation ». In *International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)* (5-9 June 2005). Vol. 1, p. 73-76.
- Gielniak, J, C Ekanayake, K Walczak, A Graczkowski et S M Gubanski. 2005. « Dielectric Responses of New and Aged transformer Pressboard in Dry and Wet States ». In *International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)* (June 5-9 2005). Vol. 2, p. 386-389.
- Giselbrecht, D., et T Leibfried. 2007. « Modelling of Oil-Paper Insulation Layers in the Frequency Domain with Cole-Cole-Functions (Part II) ». In *International Conference on Solid Dielectrics* (8-13 July 2007).
- Hamon, B.V. 1952. « An Approximate Method for Deducing Dielectric Loss Factor from Direct-Current Measurements ». *Proc. IEE*, Vol.99, pp. 151-155, (1952).

- Hassan, G. 2006. « Utilisation de la Réponse Diélectrique pour le Diagnostic des Transformateurs de Puissance ». Mémoire, Montréal, École de Technologie Supérieure, 139 p.
- Hassan, Omar, H Borsi, E Gockenbach, E.M. Aboelzahab et M I Gilany. 2003. « Diagnostic of Insulation Condition of Oil-Impregnated Paper Insulation Systems with Return Voltage Measurements ». In *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)* (2003).
- Hassan, Omar, A A Shyegani, H Borsi, E Gockenbach, M Abu-Elzahab et M I Gilany. 2004. « Detection of Oil-Pressboard Insulation Aging with Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain Measurements ». In *Conference on Solid Dielectrics* (5-9 juillet 2004). Vol. 2, p. 665-668. Toulouse, France.
- IDA 200 User's Manual* 2002. Sweden: Programma Electric , 142 p.
- Jonscher, A.K. 1983. *Dielectric relaxation in solids*, 1983. London.
- Kozlovskis, A., et J. Rozenkrons. 1998. « Temperature Dependence of Return Voltage Characteristics ». In *IEEE International Conference on Power System Technology, ICPST*, 1998. Vol. 1, p. 132-135.
- Kuchler, A, F. Hullmandel, K. Bohm, N. Koch, C. Krause, C. Neumann, K. Loppach et J.-J Alff. 2006. « Condition Assessment of Aged Transformer Bushing Insulations ». In *CIGRE* (2006). Paris.
- Linhjell, D., U Gafvert et L.E. Lundgaard. 2004. « Dielectric Response of Oil-Impregnated Paper Insulation Variation with Humidity and Ageing Level ». In *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)* (17-20 October 2004).
- Linhjell, D., L. Lundgaard et U Gafvert. 2005. « Dielectric Response of Oil-Impregnated Cellulose from 0.1 mHz to 3 MHz ». In *IEEE Conference on Dielectric Liquids* (26 June - 1 July 2005).
- Linhjell, D., L. Lundgaard et U Gafvert. 2007. « Dielectric Response of Mineral Oil Impregnated Cellulose and the Impact of Aging ». In *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 14, n° 1 (February 2007), p. 156-169.
- McMurray, John, et Robert C. Fay. 2001. *Chemistry*, Prentice Hall. Upper Saddle River, 1068 p.
- Noirhomme, B, E David, H Garbi, M C Lessard et R Boissonneault. 2005. « Application of Dielectric Response Techniques for the Condition Assessment of Power Transformers ». In *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (2005).

- Poovamma, P.K., Sudhindra. A., K. Mallikarjuanappa et T.R. Afzal Ahamad. 2007. « Evaluation of Transformer Insulation by Frequency Domain Technique ». In *IEEE International Conference on Solid Dielectrics* (July 8-13).
- Saha, T K, M. Darveniza, D.J.T. Hill, z.T. Yao et G. Yeung. 1998. « Application des Spectres de Polarisation Interfaciale à l'Évaluation de l'État de l'Isolation des Transformateurs Électriques Vieillissants ». In *CIGRE* (1998). Paris.
- Saha, T K, M. Darveniza et Z.T. Yao. 1999. « Field Experience with Return Voltage Measurements for Assessing Insulation Condition in Transformers and its comparaison with Accelerated Aged Insulation Samples ». In *International Symposium on High-Voltage Engineering*, Vol. No 487, (22-27 August).
- Saha, T K, et P Purkait. 2005. « Impact of the Condition of Oil on the Polarisation based Diagnostics for Assessing the Condition of Transformers Insulation ». In *Power Engineering Society General Meeting* (2005). p. 1881-1886.
- Shayegani Akmal, A A, Omar Hassan, H Borsi, E Gockenbach et H Mohseni. 2004. « PDC Measurement Evaluation on Oil-Pressboard Samples ». In *International Conference on Solid Dielectrics* (2004). Vol. 1, p. 51-54. Toulouse, France.
- Sheiretov, Y, et M Zahn. 1993. « A Study of the temperature and Moisture Dependant Dielectric Properties of Oil-Impregnated Pressboard ». In *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (17-20 octobre 1993). 1993. Pocono Manor, PA, USA.
- Sheiretov, Y, et M Zahn. 1995. « Dielectrometry Measurements of Moisture Dynamics in Oil-impregnated Pressboard ». In *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 2, n° 3 (1995), p. 329-351.
- Yao, z.T., et T K Saha. 2002. « Separation of Ageing and Moisture Impacts on Transformer Insulation Degradation by Polarisation Measurements ». In *CIGRE* (2002). Paris.
- Yew, J.H., T K Saha et A. J. Thomas. 2006. « Impact of Temperature on the Frequency Domain Dielectric Spectroscopy for the Diagnosis of Power Transformer Insulation ». In *IEEE Power Engineering Society General Meeting (PES)* (18-22 June 2006).