

CHAPITRE 3

ANALYSE DES RÉSULTATS ET MODÉLISATION

3.1 Méthodes de mesure

Le protocole expérimental est décrit dans [19] : Nous en rappelons les principaux éléments. Les maquettes ont été construites en utilisant la cuve et le noyau d'un transformateur de 100 kVA. Du papier Kraft isole les spires des enroulements primaires et secondaires. Ces maquettes ont été traitées pour obtenir quatre niveaux d'humidité différents entre 1 et 4% massique dans le papier. Quant à l'huile d'isolation elle est de type Nynas 10CX.

Huit maquettes ont été vieilles à deux températures différentes. Quatre d'entre elles l'ont été à 125 °C, les quatre restantes à 135 °C. Le tableau IV, ci-dessous, résume les conditions de vieillissement de chacune des huit cuves.

Tableau IV

Conditions de vieillissement

Référence	Groupe	Température de Vieillissement	Taux D'humidité
cuve#01	G1	125	1.70 %
cuve#07	G1	125	2.30 %
cuve#09	G1	125	3.30 %
cuve#11	G1	125	1.30 %
cuve#04	G2	135	1.12 %
cuve#06	G2	135	1.97 %
cuve#08	G2	135	3.48 %
cuve#12	G2	135	0.75 %

Régulièrement, des mesures diélectriques ont été prises à la température constante de 25 °C. À chaque séance de mesure, des échantillons d'huile et de papier sont prélevés pour une analyse complète en laboratoire après deux jours de conditionnement à 55 °C.

Le degré de polymérisation est mesuré par viscosimétrie d'une solution de cupryéthylène diamine. Le taux d'humidité est mesuré par une extraction à l'alcool méthylique anhydrique suivi d'une titration de Karl-Fisher.

Le facteur de puissance de l'huile a été mesuré suivant la norme ASTM D924 à 100 °C.

3.1.1 Courant de polarisation dépolariation "PDC"

Des mesures de courant de polarisation/dépolariation, avec une électrode active ont été réalisées sous une tension continue de 1000 V appliquée à l'enroulement haute tension. L'enroulement basse tension et la cuve ont été mis à la terre. De cette façon, les isolations entre les deux enroulements d'une part et entre l'enroulement haute tension et la cuve d'autre part sont testés simultanément. Cependant, en général la première contribution (des deux enroulements) est dominante. L'équipement est bâti autour de l'appareil source-mesure Keithley 237. Les durées de charge et de décharge sont respectivement de 5000 et 2500 secondes.

3.1.2 Mesure en fréquence "FDS"

Les mesures fréquentielles ont été faites en utilisant l'appareil General Electric Programma IDA 200 sous une tension de 200 V rms. Elles sont faites sous deux configurations à une ou deux électrodes actives. La plage de fréquence balayée se situe entre 0.003 et 1000 Hz avec 5 points de mesure par décade.

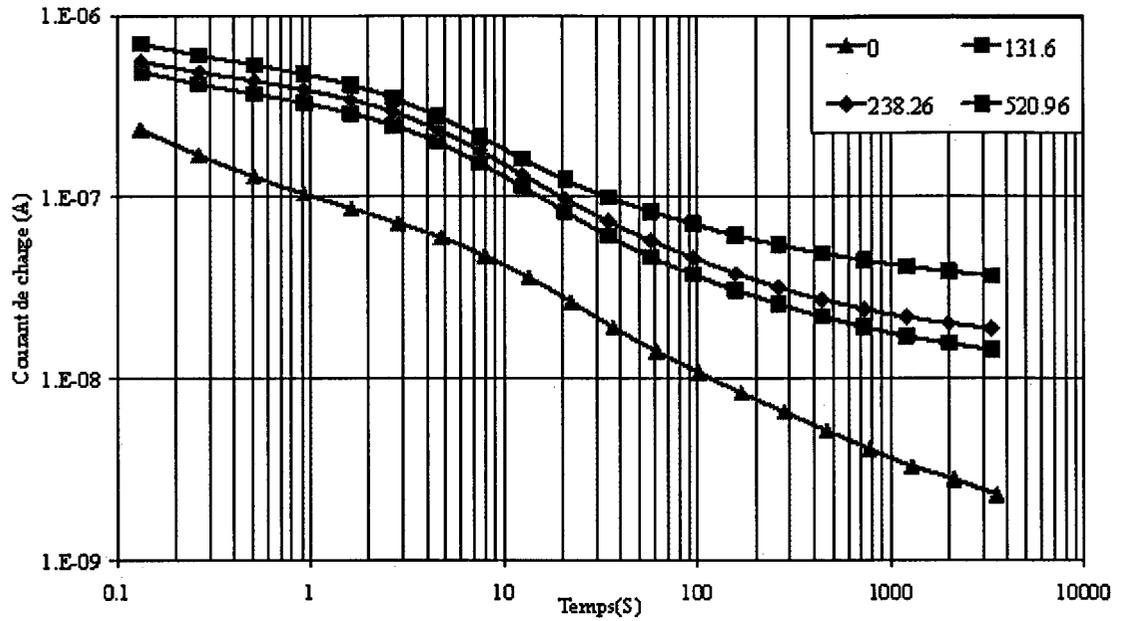
3.2 Résultats expérimentaux des cuves

3.2.1 Sensibilité au vieillissement

3.2.1.1 Résultats temporels "PDC"

Les figures 18 et 19, illustrent le courant de charge et de décharge respectivement pour une cuve sèche (cuve #12) et une cuve humide (cuve #08) pour différents temps de vieillissement en heures.

a)



b)

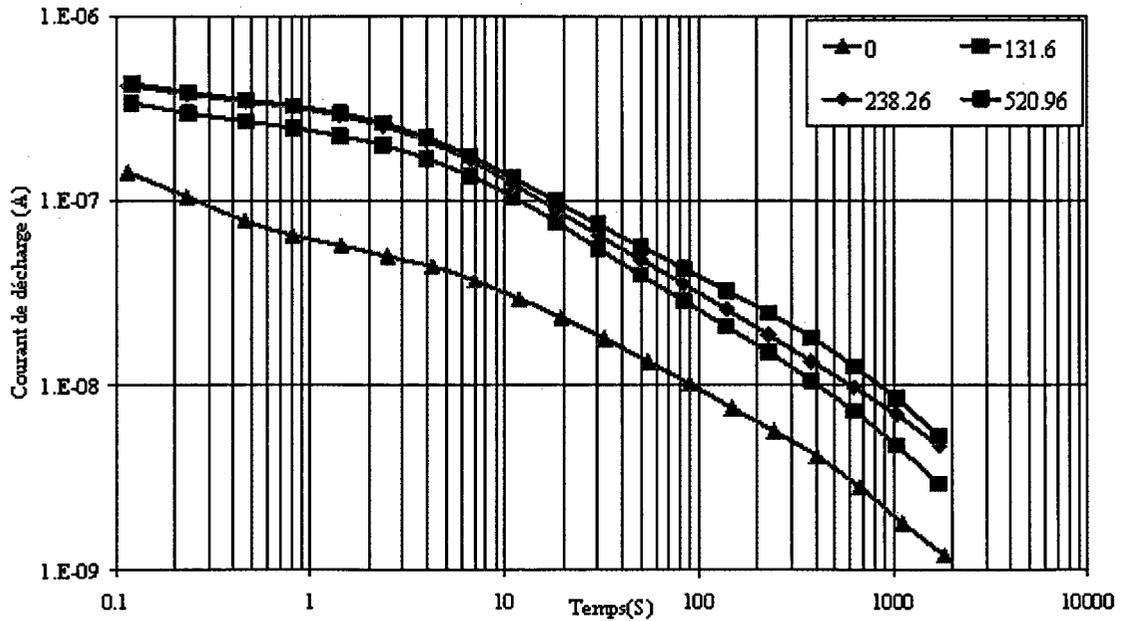


Figure 18 Courant de charge(a) et décharge(b) pour différents temps de vieillissement en heures pour la cuve#12 (0.75 % d'humidité)

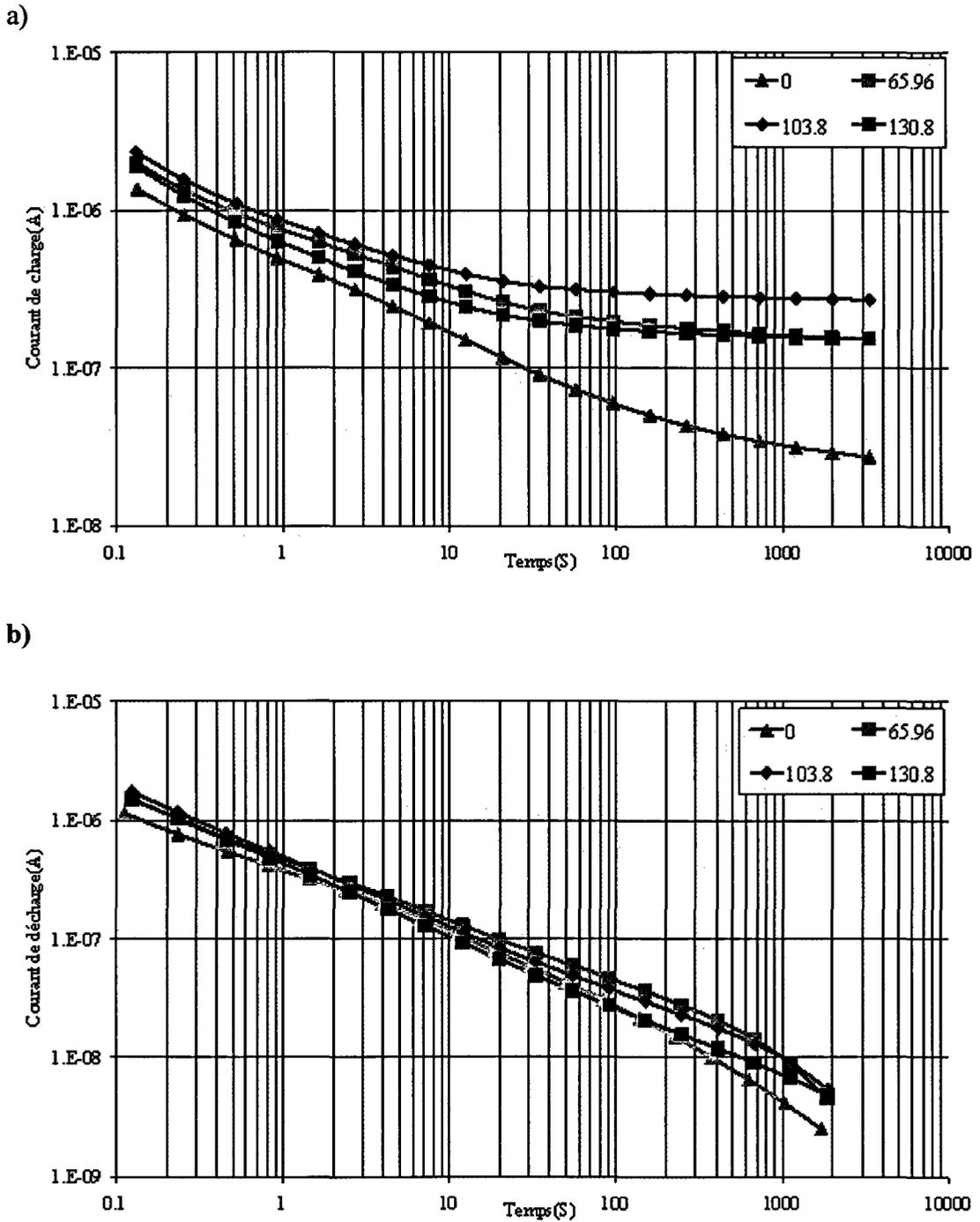


Figure 19 Courant de charge(a) et décharge(b) pour différents temps de vieillissement en heures pour la cuve#08 (3.48 % d'humidité)

3.2.1.2 Résultats fréquentiels "FDS"

Les figures 20 et 21, montrent la tangente de l'angle de perte pour une cuve sèche (cuve #12) et une cuve humide (cuve #08).

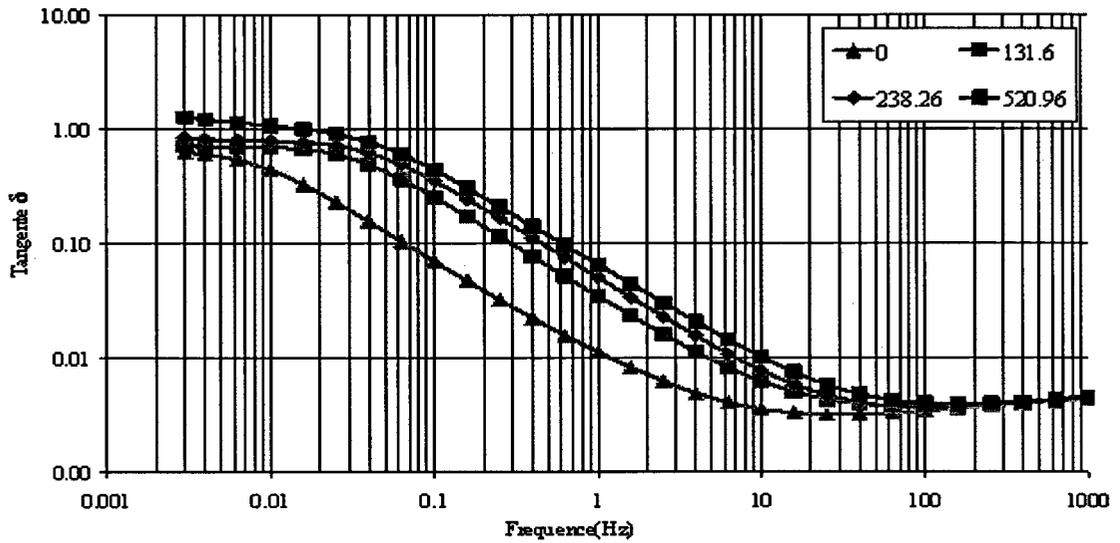


Figure 20 Tangente δ vs fréquence pour la cuve #12 (sèche) à différents temps de vieillissement

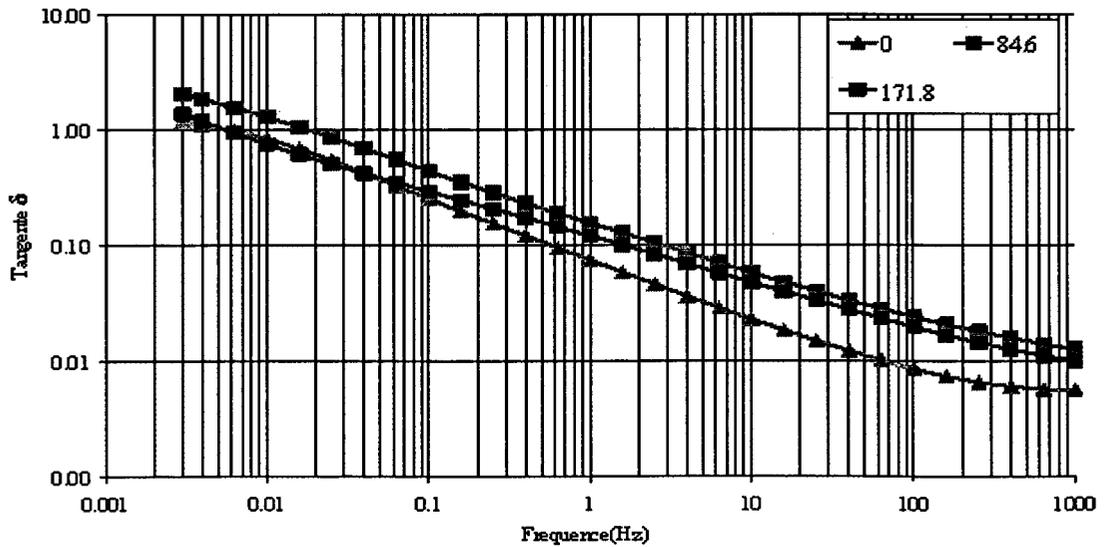


Figure 21 Tangente δ vs fréquence pour la cuve #08 (humide) à différents temps de vieillissement

Les figures 22 et 23, quant à elles, montrent la capacité imaginaire pour une cuve sèche (cuve #12) et une cuve humide (cuve #08).

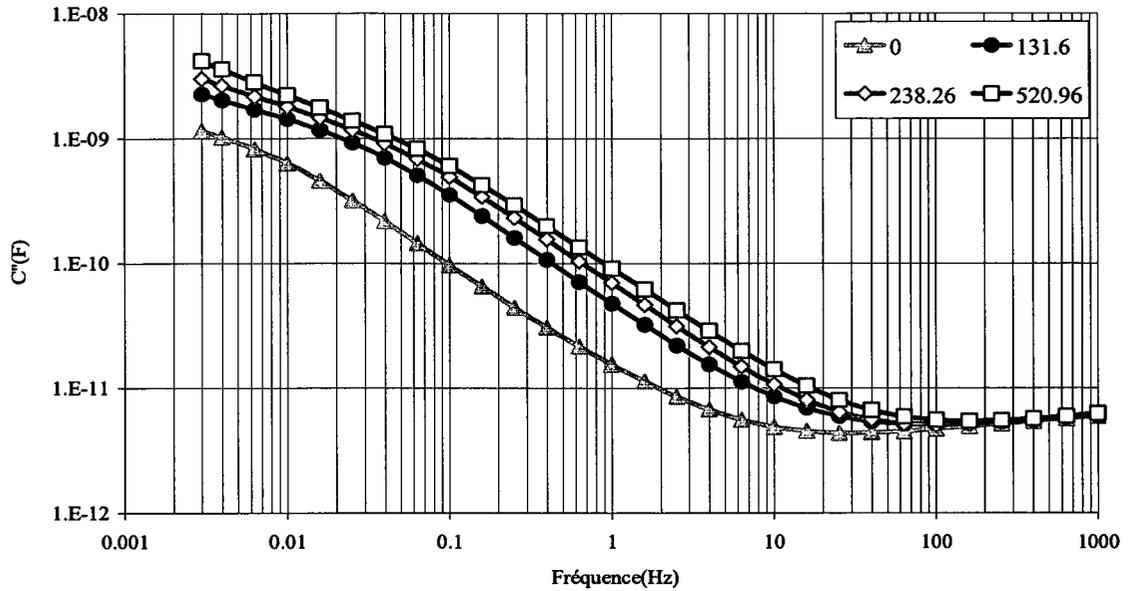


Figure 22 C'' vs fréquence pour la cuve #12 (cuve sèche) à différents temps de vieillissement

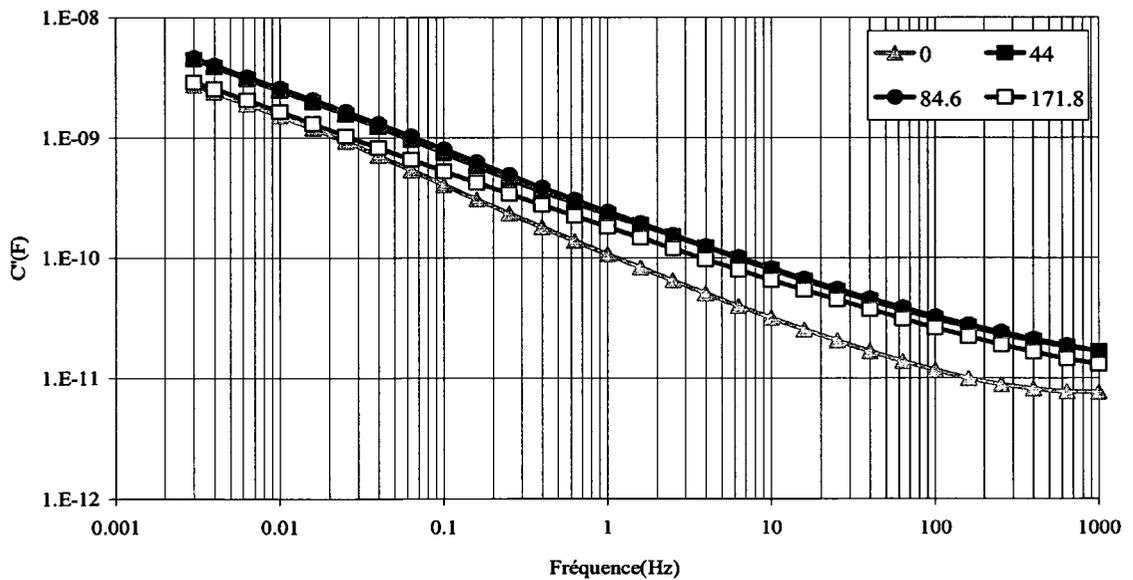


Figure 23 C'' vs fréquence pour la cuve #08 (cuve humide) à différents temps de vieillissement

3.2.1.3 Analyse

Pour la cuve sèche après seulement 130 heures de vieillissement, les figures 18 a) et 18 b) montrent que les courbes de charge et décharge ont grandement changé. Pour le reste du vieillissement, les variations sont moins prononcées. Ces mêmes figures, laissent voir que les variations aux temps courts sont minimales comparativement à celles aux temps longs. Ce qui revient à dire que la conductivité de l'huile varie peu comparativement à celle du papier. La figure 20 montre que les mêmes remarques peuvent s'appliquer à la tangente de l'angle des pertes, en tenant compte toutefois qu'aux temps longs correspondent les basses fréquences et aux temps courts correspondent les hautes fréquences.

Au niveau de la représentation graphique des résultats fréquentiels, on avait le choix entre la représentation de la capacité imaginaire, la capacité réelle ou la tangente de l'angle des pertes. Concernant la tangente de l'angle des pertes, si elle est indépendante de la géométrie, il n'en demeure pas moins qu'elle masque les variations quand elles se font dans le même sens. En effet, prenons le cas de la cuve 12. La figure 22 montre que la valeur de la capacité imaginaire aux basses fréquences a doublé après environ 130 heures de vieillissement. D'autre part, la figure 20 montre que la valeur de la tangente pour les basses fréquences a peu changé après la même durée de vieillissement. On en déduirait en se basant sur la figure 20, qu'aucune modification de la permittivité n'a eu lieu. Ce qui représente une conclusion erronée au vu de la figure 22. La capacité réelle, quant à elle offre une courbe moins riche. Seule la capacité imaginaire renferme une variation pertinente. Sur la figure 22, on constate que pour la cuve sèche 12, la valeur de la capacité imaginaire aux basses fréquences a doublé après 130 heures de vieillissement. Les variations se font de manière plus graduelle pour la suite du vieillissement. Pour les hautes fréquences, les figures 20 et 22 nous apprennent que pour la cuve sèche 12, il n'y a pas de changement notable.

Pour la cuve humide, le courant de polarisation aux temps longs et courts change de façon erratique. Sa valeur est supérieure à la valeur d'une cuve sèche dans un rapport de dix. Au niveau de la mesure fréquentielle, les courbes de la figure 21 et figure 23, se présentent comme des droites dans un diagramme log-log. On en déduit donc que $C'' = af^\alpha$.

En résumé pour les cuves sèches, le courant de polarisation aux temps longs est le meilleur indicateur du vieillissement du papier. La capacité imaginaire peut éventuellement renseigner sur le taux d'humidité, puisque pour une cuve humide la courbe semble obéir à une loi de type Curie-von Schweidler.

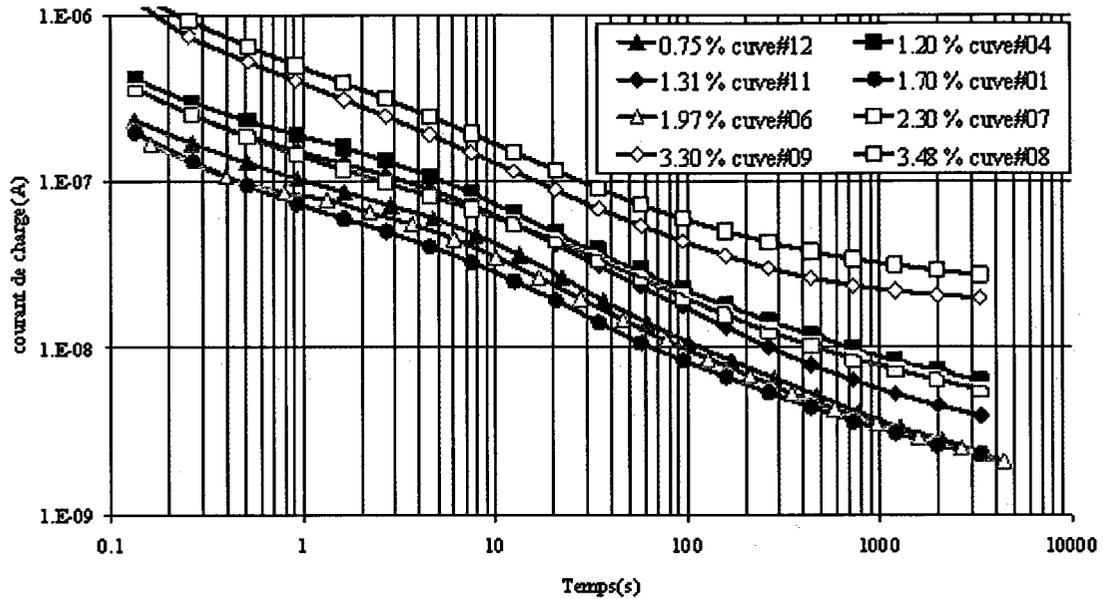
3.2.2 Sensibilité à l'humidité

3.2.2.1 Résultats temporels "PDC"

Les figures 24 a) et 24 b), montrent les courants de charge et de décharge au tout début du vieillissement pour différentes cuves. Ces figures permettent de mettre en évidence le rôle que joue l'humidité sur la réponse diélectrique du complexe papier-huile. L'humidité contribue à une augmentation notable du courant de charge et de décharge. Cette augmentation trouve son origine à deux niveaux. D'une part la grande polarisabilité de la molécule d'eau contribue à augmenter la capacité et donc le courant de charge et de décharge. D'autre part l'eau étant conductrice, elle augmente la conduction directe. Cette augmentation de la conduction se voit aussi dans le courant de charge aux temps longs. En effet après un temps de charge suffisamment long, le courant de conduction directe domine le courant d'absorption. La figure 24 b), montre qu'en début du vieillissement, le courant de décharge des différentes cuves convergent aux temps longs. Par contre, la figure 25 b), montre qu'en fin de vieillissement, le courant de décharge des différentes cuves ne converge plus. On en tire comme

enseignement que les propriétés du papier pour les différentes cuves ont changé différemment en fonction du taux d'humidité de la cuve.

a)



b)

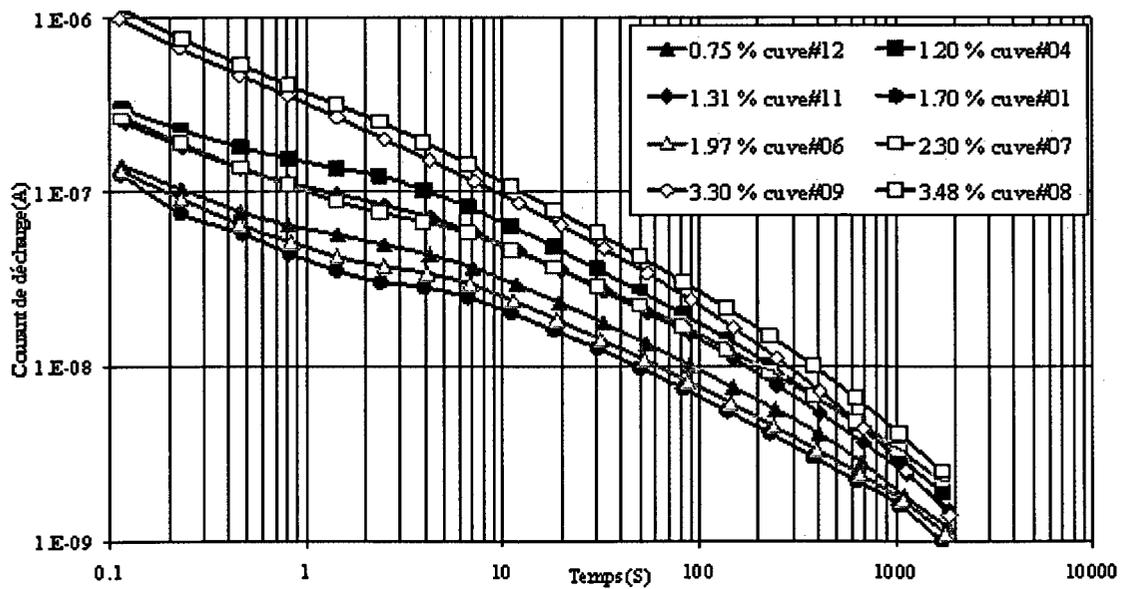


Figure 24 Courant de charge a) et décharge b) vs temps au début de vieillissement pour différentes cuves

Les figures 25 a) et 25 b) ci-dessous, illustrent le courant de charge et de décharge à la fin du vieillissement pour les différentes cuves. Ces figures permettent de mettre en évidence le rôle de l'humidité dans le processus de vieillissement du papier. Les courbes des cuves humides ont vu leur courant de charge augmenter beaucoup plus significativement, signe d'une dégradation plus marquée.

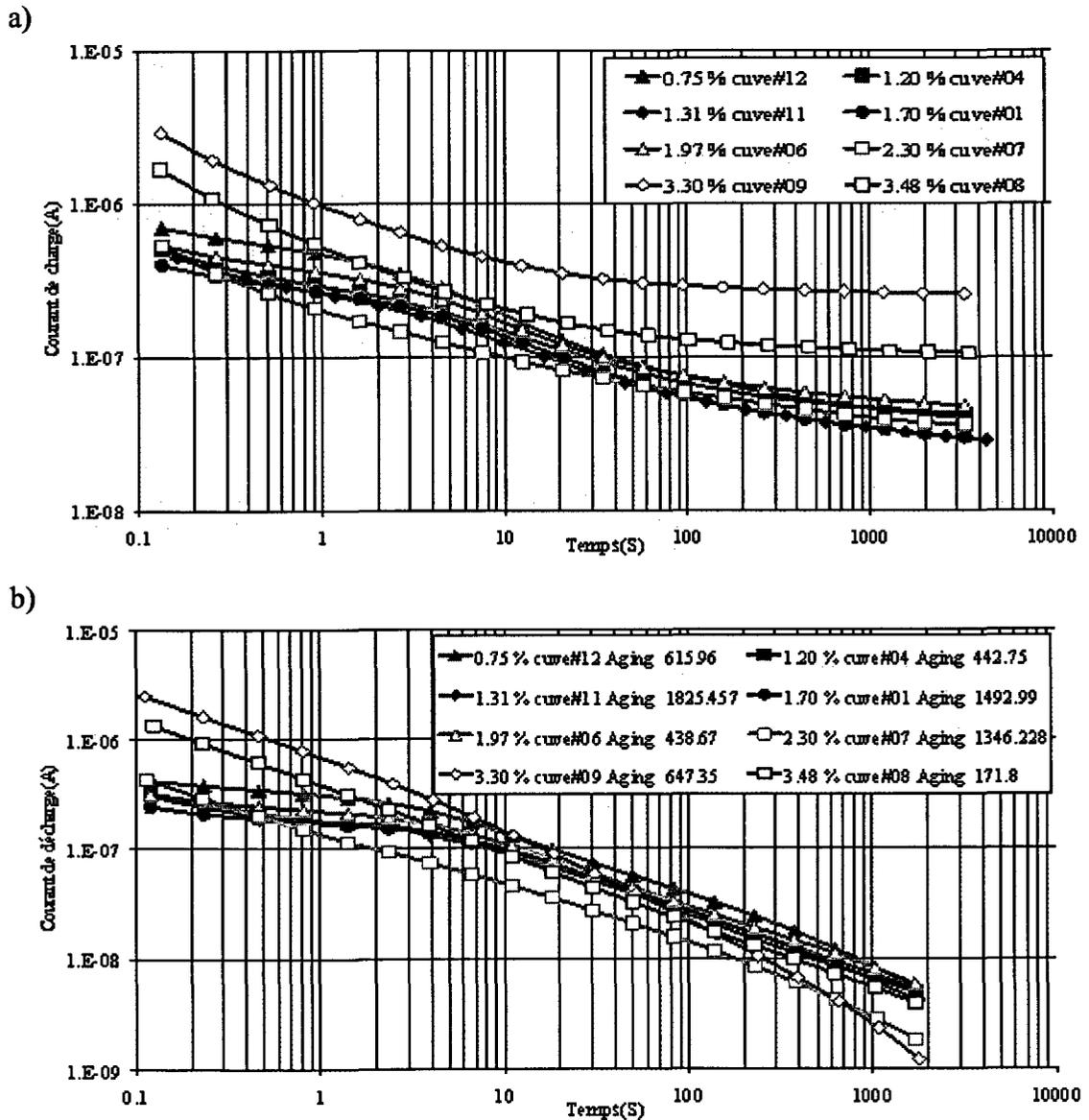


Figure 25 Courant de charge a) et décharge b) vs temps en fin de vieillissement pour différentes cuves

3.2.2.2 Résultats fréquentiels "FDS"

Les figures 26 et 27 illustrent respectivement l'effet de l'humidité et son action sur la modification des paramètres diélectriques du papier.

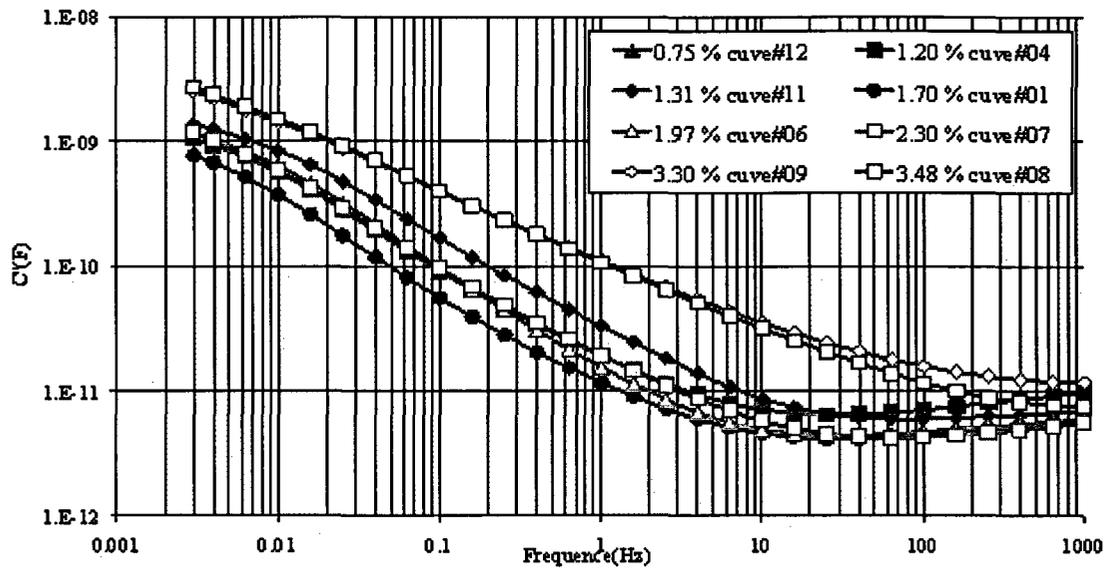


Figure 26 C'' vs fréquence début vieillissement

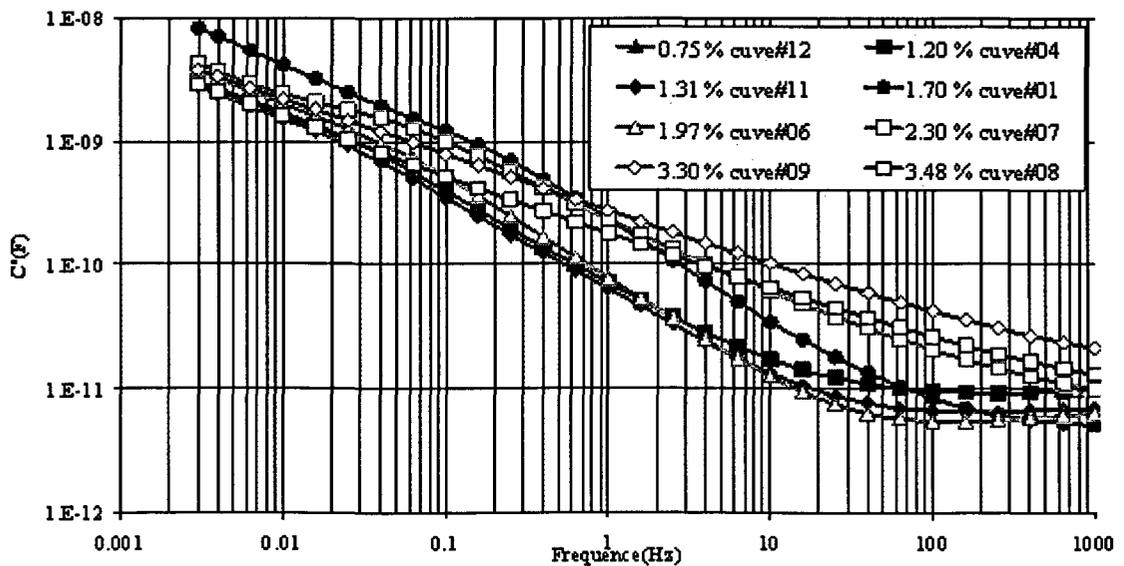


Figure 27 C'' vs fréquence fin vieillissement

3.2.2.3 Analyse

Initialement, avant le vieillissement, on distingue dans la figure 24 a), de façon subtile la présence de deux groupes. Le groupe des cuves humides, dont le taux d'humidité est supérieur à 3 %, et celui des cuves sèches dont le taux d'humidité est inférieur à 3 %. Le groupe des cuves humides présente un courant de polarisation plus élevé que ce soit aux temps longs ou aux temps courts. Ce qui indique que la conductivité augmente significativement avec l'humidité. La figure 25 a), montre qu'à la fin du vieillissement, les deux groupes se sont nettement séparés. Ainsi, si dans le groupe des cuves sèches, les courbes restent groupées, dans le groupe des cuves humides, les écarts se sont amplifiés.

On tire comme conclusion que l'humidité augmente la conductivité du papier notamment grâce à la présence de l'eau dans le papier mais aussi structurellement avec le temps car si en début de vieillissement, le papier asséché retrouve sa conductivité d'origine, il en est tout autrement à la fin du vieillissement comme il sera démontré dans la seconde expérience qui suit.

3.3 Résultats expérimentaux des échantillons de papier des cuves

Ces mesures fréquentielles, ont eu lieu à l'École de Technologie Supérieure dans le laboratoire prévu à cet effet. Les échantillons de papier extraits des différentes cuves, ont été mis dans une chambre climatique à humidité contrôlée. Les conditions atmosphériques de la chambre climatique étaient de $23\text{ °C} \pm 0.5\text{ °C}$ pour la température et de 5% à $\pm 0.5\%$ HR d'humidité relative. Pour garantir des conditions de température constante, on a utilisé un contrôle avec boucle PID (Labview). Sous ces conditions, les essais permettent d'apprécier l'état réel du papier à humidité constante.

La figure 28 montre la chambre climatique à humidité contrôlée. Quant à la figure 29, elle nous montre le système de contrôle avec boucle PID (Labview), ainsi que le système d'acquisition des mesures (Keithley 237) à 250 V.

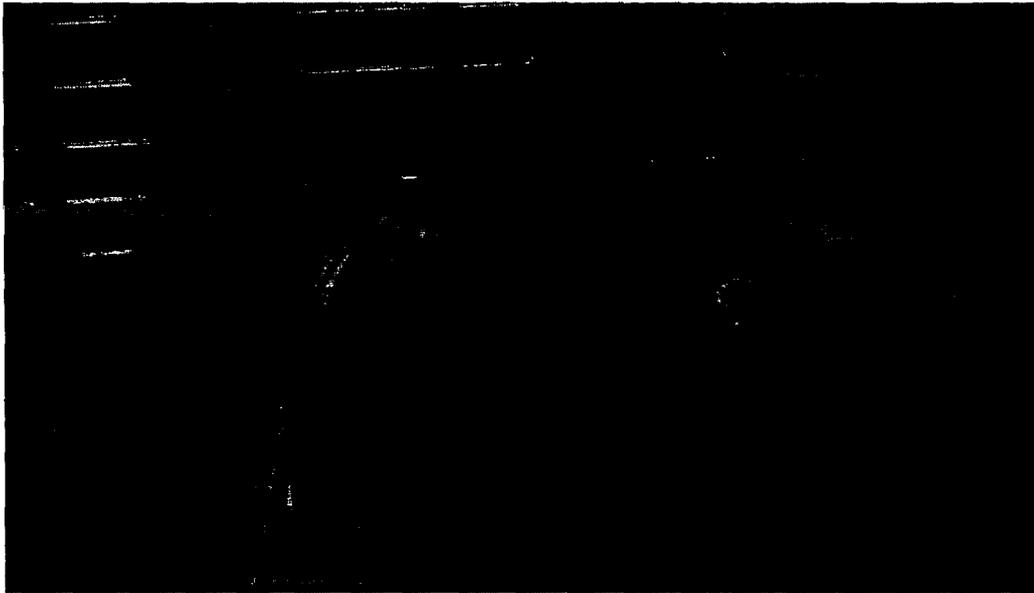


Figure 28 Chambre environnementale



Figure 29 Système d'acquisition des mesures

Les mesures ont été effectuées le 16 avril 2005. La figure 30 illustre les résultats fréquentielles obtenus.

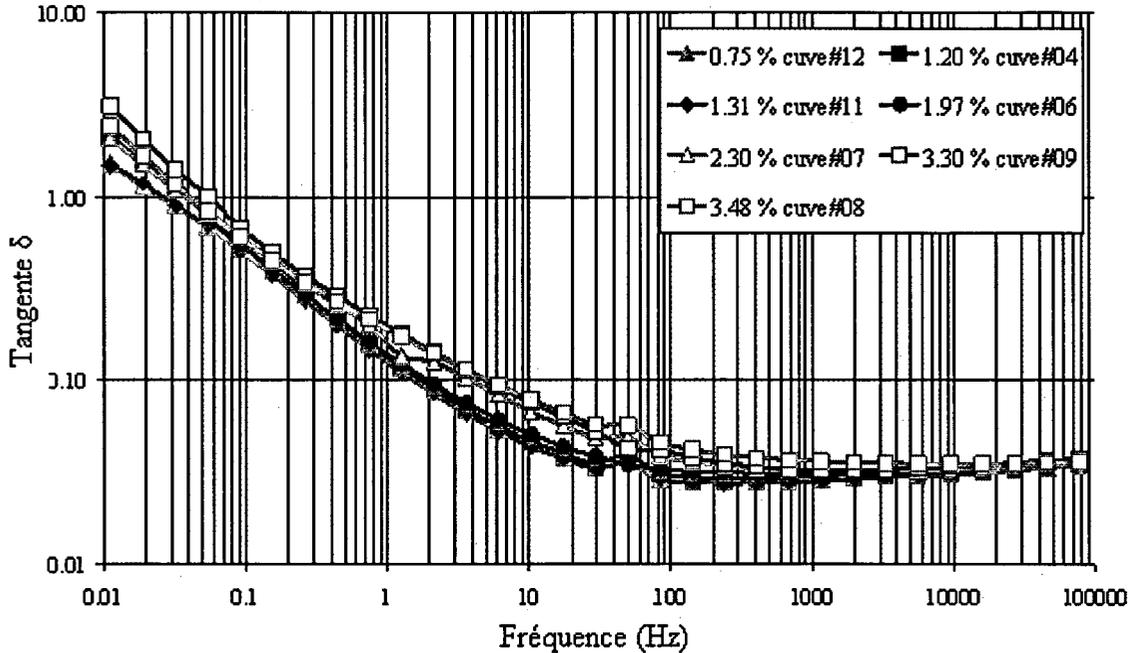


Figure 30 Tangente vs fréquence pour les échantillons de papier imprégné

3.3.1 Analyse

La tangente de l'angle des pertes est une donnée fréquentielle indépendante de la géométrie. D'autre part les échantillons de papier sont sous les mêmes conditions expérimentales. On en déduit que les différences observées proviennent des changements des caractéristiques diélectriques du papier. Ainsi l'on voit sur la figure 30, que la tangente de l'angle des pertes aux basses fréquences, est plus élevée pour les échantillons des cuves humides. Aux hautes fréquences, il n'y a pratiquement différence. Ce qui laisse à croire que la tangente de l'angle des pertes mesurée aux basses fréquences, est un bon indicateur du vieillissement du papier.

3.4 Résultats expérimentaux des échantillons d'huiles neuves et usées

Les figures 31 et 32, montrent respectivement les courants de charge et la capacité imaginaire calculée par la transformée de Hamon du courant de charge.

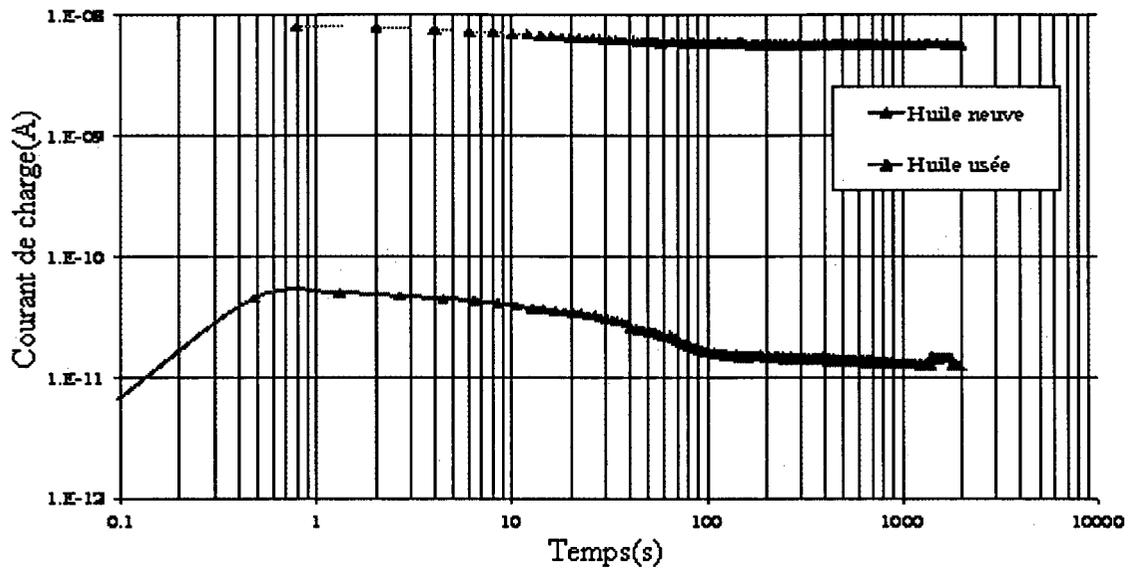


Figure 31 Courant de charge des échantillons d'huile

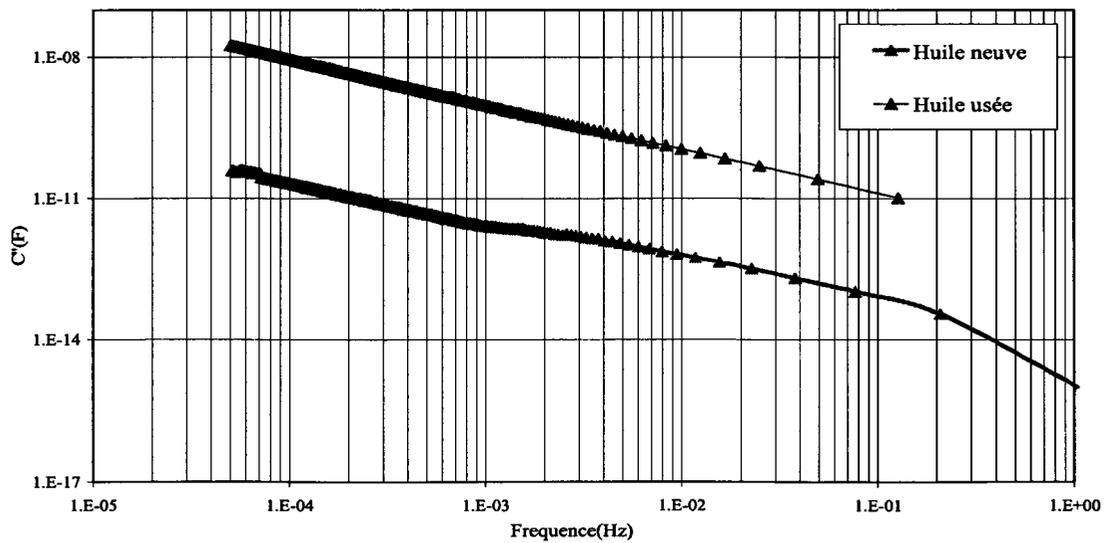


Figure 32 C'' des échantillons d'huile obtenue par transformée de Hamon du courant de charge

3.4.1 Analyse

La figure 31, montre que le courant de charge de l'huile neuve et de l'huile usée est dominé par la conductivité de l'huile. On remarque aussi que la conductivité de l'huile usée a augmentée de façon notable. Cela est sans doute dû aux groupes chimiques polaires qui se forment lors de l'oxydation de l'huile. Autre fait intéressant, pour l'huile neuve, le courant au tout début de la polarisation augmente pendant un certain temps. On peut expliquer en partie ceci, par la présence d'impuretés ioniques qui pendant un certain temps vont se déplacer vers les électrodes. Ce n'est qu'une fois la grande majorité des ions accumulés sur les électrodes, que la contribution du courant électronique reprend son cours normal. La figure 32 donne les capacités imaginaires obtenues à partir des courbes de la figure 31. Comme toutes les modélisations retenues pour l'huile ne mettent en avant que son effet résistif, on en déduit que les résultats des modèles seront assez proches de la réalité.

3.5 Corrélation

L'un de nos grands soucis sera de voir l'évolution de la corrélation entre une courbe expérimentale et le DP du papier dans le temps ou dans les fréquences, et ce pour différentes cuves. Pour donner un caractère plus universel à notre analyse, les résultats à analyser se présentent suivant 4 colonnes, la première contient le temps ou la fréquence, la seconde les cuves, la troisième la variable indépendante et la dernière la variable dépendante à modéliser. Le tri doit se faire suivant la première colonne, suivi de la deuxième et finalement de la troisième colonne. Dans notre architecture les colonnes sont générées par le langage SQL de notre base de données. Quant au traitement, il se fait par Excel étant donné ses grandes fonctionnalités graphiques

3.5.1 Corrélation entre le courant de polarisation et le DP du papier

L'étude vise à rechercher la corrélation entre le courant de polarisation et le DP du papier à un temps de mesure donné. Les temps choisis sont 10, 20, 40, 50, 100, 500, 1000 et 4500 secondes. Comme ces temps ne figurent pas nécessairement dans la courbe expérimentale la première tâche a été de faire une interpolation linéaire entre les deux plus proches valeurs voisines pour en déduire les valeurs désirées. Grâce à notre système d'information ce travail a été fait par une macro sous VBA. Ensuite en utilisant le langage d'interrogation de base de données SQL, on a présenté les informations sous forme de quatre colonnes. La première colonne contient le temps puisque nous souhaitons voir l'évolution de la corrélation pour différents temps. La deuxième colonne identifie la cuve. Enfin les deux dernières colonnes contiennent la variable indépendante et la variable à modéliser. Notre analyseur de corrélation sous Excel, se chargera de générer les graphiques en conséquence. La figure 33 ainsi que le tableau V illustrent les résultats obtenus.

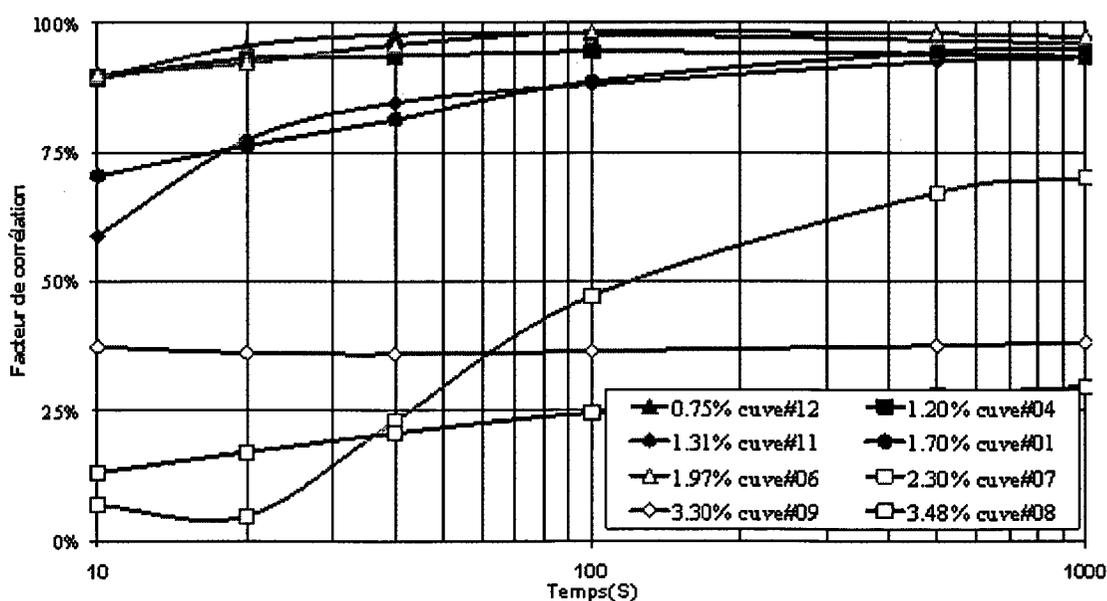


Figure 33 Évolution de la corrélation (Courant de polarisation/DP) en fonction du temps de mesure

Tableau V

Corrélation à 4 500 secondes entre I pol et DP

Référence	Groupe	Taux d'humidité	Coéf. corrélation	Pente de régression (DP/A)	Constante de régression (DP)
cuve#01	G1	1.70 %	94.85 %	-19×10^9	1 026
cuve#07	G1	2.30 %	74.22 %	-11×10^9	954
cuve#09	G1	3.30 %	38.62 %	-36×10^7	646
cuve#11	G1	1.31 %	93.99 %	-24×10^9	1 241
cuve#04	G2	1.20 %	93.42 %	-14×10^9	1 088
cuve#06	G2	1.97 %	96.56 %	-14×10^9	1 027
cuve#08	G2	3.48 %	30.11 %	-72×10^7	707
cuve#12	G2	0.75 %	95.86 %	-15×10^9	1 060

La figure 33, montre que pour les temps longs supérieurs à 100 secondes une corrélation raisonnable peut être trouvée entre le courant mesuré à cet instant et le DP, exception faite des cuves pour lesquelles l'humidité dépasse 2.3 %.

3.5.2 Corrélation entre la tangente de l'angle des pertes et le DP du papier

De façon semblable, on va rechercher la corrélation entre la tangente de l'angle des pertes et le DP du papier à une fréquence donnée. La majorité des fréquences de mesure ont été retenues pour construire l'évolution de la corrélation en fonction de la fréquence. Les résultats obtenus sont consignés dans la figure 34 et le tableau VI.

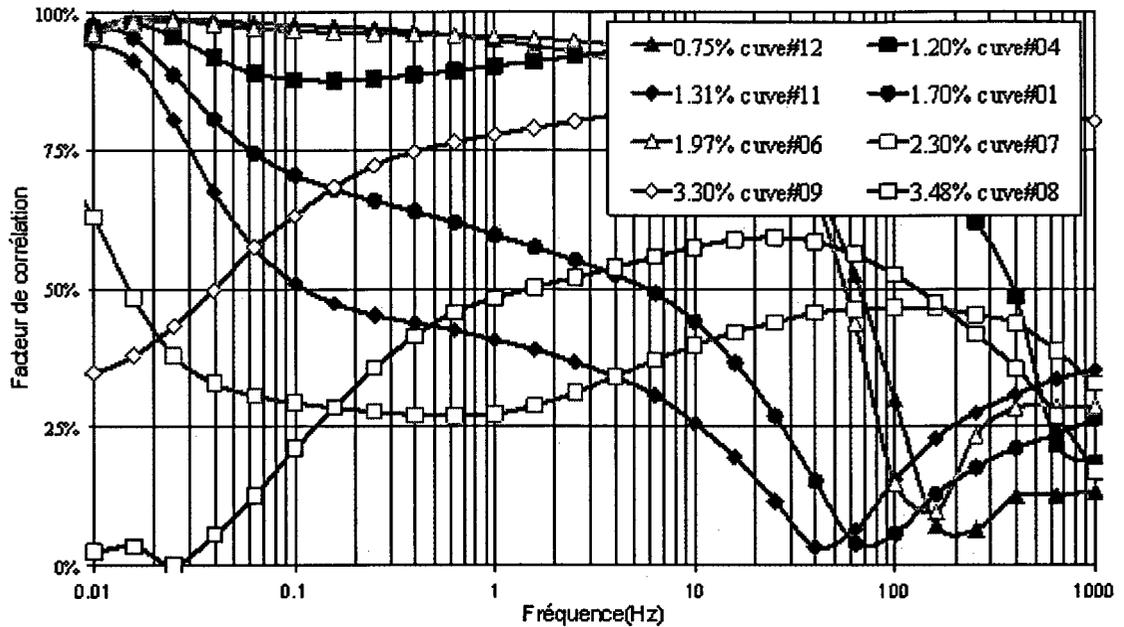


Figure 34 Évolution de la corrélation (Tangente δ/DP) avec la fréquence

Tableau VI

Corrélation à 0.003 Hz entre la tangente de l'angle de perte et le DP du papier

Référence	Groupe	Taux d'humidité	Coéf. corrélation	Pente de régression (DP)	Constante de régression (DP)
cuve#01	G1	1.70 %	85.69 %	-573	1 206
cuve#07	G1	2.30 %	72.21 %	-381	1 089
cuve#09	G1	3.30 %	26.97 %	-147	754
cuve#11	G1	1.31 %	95.72 %	-881	1 535
cuve#04	G2	1.20 %	92.40 %	-453	1 196
cuve#06	G2	1.97 %	90.42 %	-633	1 295
cuve#08	G2	3.48 %	10.34 %	-63	696
cuve#12	G2	0.75 %	89.24 %	-640	1 344

La figure 34, montre que pour les fréquences inférieures à 0.1 Hz, une corrélation raisonnable peut être trouvée entre la tangente de l'angle de perte et le DP du papier,

excepté pour les cuves pour lesquelles l'humidité dépasse 2.3 %. Ce résultat identique qualitativement à celui obtenu dans le domaine temporel, montre la dualité existant entre le domaine temporel et fréquentiel. On en déduit que le modèle qui suppose l'existence d'une équation linéaire entre la cause et l'effet est valable qualitativement.

3.5.3 Corrélation entre le courant de polarisation et le facteur de puissance de l'huile

Quoique d'importance moindre, la recherche d'une relation entre le courant de polarisation et le facteur de puissance de l'huile a fait l'objet d'une étude. La figure 35 et le tableau VII illustrent les résultats obtenus pour des temps d'échantillonnage de 10, 20, 40, 50, 100, 500, 1000 et 4500 secondes.

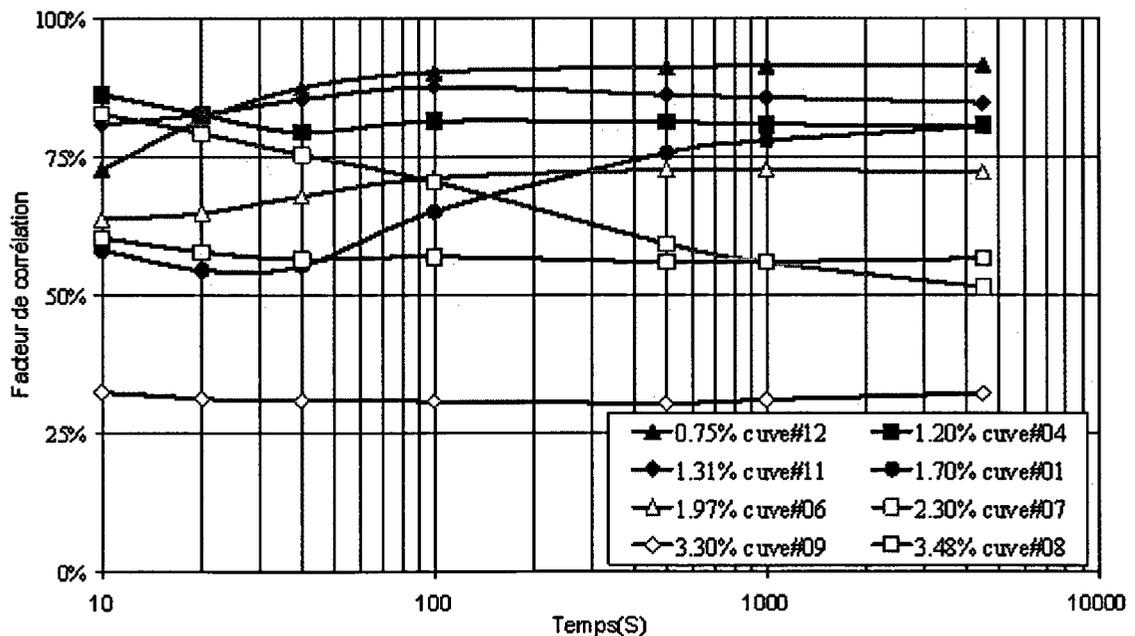


Figure 35 Évolution de la corrélation (Courant de polarisation/Facteur de puissance de l'huile) avec le temps

Tableau VII

Corrélation à 2400 secondes entre courant de polarisation et le facteur de puissance de l'huile

Référence	Groupe	Taux d'humidité	Coéf Corrélation	Pente de Régr. (1/A)	Constante régression
cuve#01	G1	1.70 %	80.50 %	78×10^6	0.36
cuve#07	G1	2.30 %	63.67 %	18×10^6	-0.68
cuve#09	G1	3.30 %	64.80 %	26×10^6	-0.69
cuve#11	G1	1.31 %	67.85 %	34×10^6	-0.59
cuve#04	G2	1.20 %	72.61 %	49×10^6	0.09
cuve#06	G2	1.97 %	72.62 %	52×10^6	0.21
cuve#08	G2	3.48 %	72.17 %	56×10^6	0.36
Cuve412	G2	0.75 %	82.72 %	9×10^6	-0.09

La figure 35, montre que le facteur de corrélation varie très peu en fonction du temps. La corrélation entre le courant de charge et le facteur de puissance de l'huile semble être meilleure pour les cuves sèches aux temps longs. Néanmoins, cette corrélation est moins prononcée que celle obtenue entre le courant de polarisation et le DP du papier. La corrélation est moindre. On y décèle que les modifications intervenus dans les propriétés du papier ont une influence sur le facteur de puissance de l'huile.

3.5.4 Corrélation entre Tangente de l'angle des pertes et le facteur de puissance de l'huile

De façon semblable, on va rechercher la corrélation entre la tangente de l'angle des pertes et le facteur de puissance de l'huile. La majorité des fréquences de mesure ont été retenues pour construire l'évolution de la corrélation en fonction de la fréquence. La figure 36 et le tableau VIII reprennent l'essentiel des résultats obtenus.

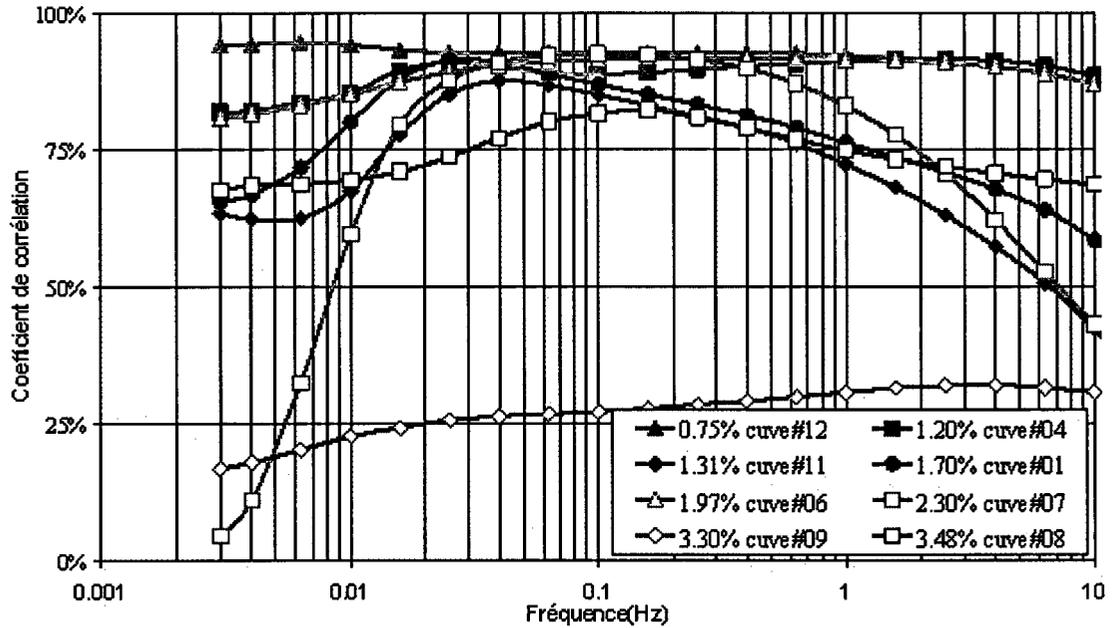


Figure 36 Évolution de la corrélation (Tangente δ /Facteur de puissance de l'huile) avec la fréquence

Tableau VIII

Tableau corrélation tangente à 0.003 Hz et le facteur de puissance de l'huile

Référence	Groupe	Taux d'humidité	Coéf de corrélation	Pente de régression	Constante régression
cuve#01	G1	1.70 %	65.53%	2.31	-0.42
cuve#07	G1	2.30 %	4.42%	0.06	1.10
cuve#09	G1	3.30 %	16.71%	0.02	0.19
cuve#11	G1	1.31 %	63.28%	3.95	-0.87
cuve#04	G2	1.20 %	81.80%	1.66	-0.29
cuve#06	G2	1.97 %	80.60%	3.42	-1.36
cuve#08	G2	3.48 %	67.61%	0.35	-0.08
cuve#12	G2	0.75 %	94.06%	4.67	-2.24

La figure 36, montre que le facteur de corrélation est meilleur aux basses fréquences surtout pour les cuves sèches. Cette corrélation est moins prononcée que celle obtenue entre le courant de polarisation et le DP du papier.

3.6 Normalisation de la température

Des échantillons de papier sec ont fait l'objet d'essais en température à l'ETS. Pour chaque température la courbe expérimentale FDS est enregistrée. La cuve 09 était soumise à la même expérimentation à l'IREQ. Plus tard suivront d'autres expériences sur les cuves 07 et 01. La figure 37, illustre les résultats expérimentaux obtenus pour le papier neuf.

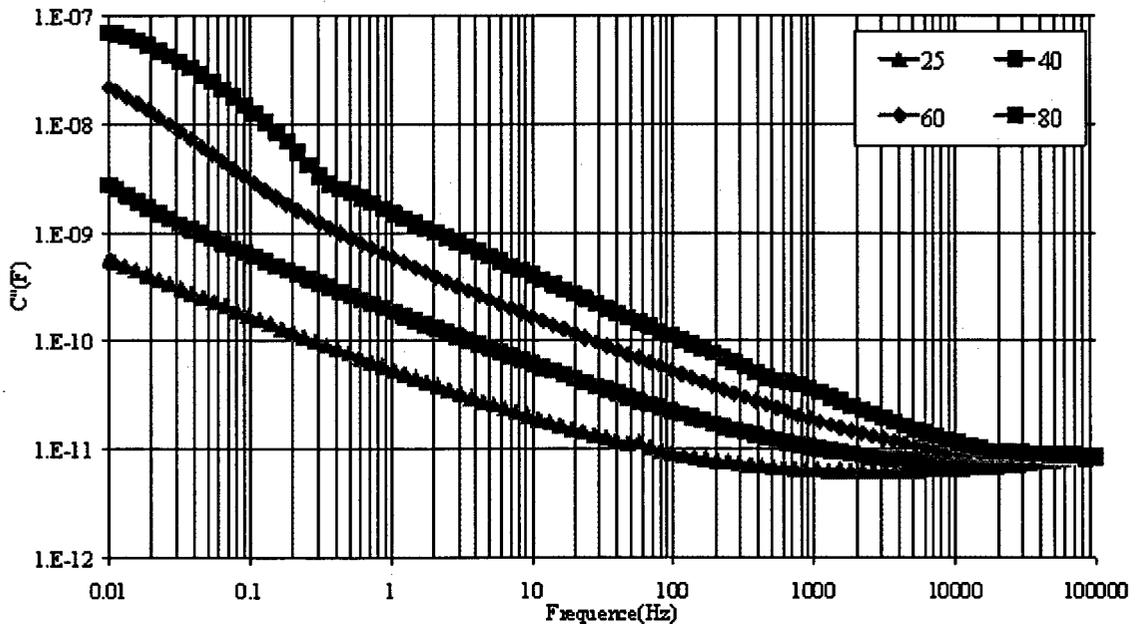


Figure 37 Capacité imaginaire versus fréquence pour différentes températures pour du papier neuf

Dans la figure 37, on constate que l'augmentation de température translate horizontalement la courbe de la capacité imaginaire versus la fréquence. Dans ce qui

suit, on verra la procédure pour obtenir la valeur du facteur de translation pour différentes températures. Dans un second temps, on cherchera à trouver la relation existant entre cette translation et la température.

3.6.1 Recherche de la relation entre le déplacement en fréquence et la température

Nous allons ici décrire la procédure qui permet d'obtenir la relation entre la valeur du facteur de déplacement en fréquence et la tangente de l'angle des pertes. Dans cette expérience la cuve 09 a été portée aux températures 25, 30, 40 et 50 °C. Pour chacune de ces températures, la tangente de l'angle des pertes a été mesurée à différentes fréquences. La figure 38 reprend l'ensemble des résultats. Si l'on choisit 25 °C comme température de référence, alors la courbe expérimentale faite à cette température est appelée courbe maîtresse. La recherche de la relation entre le facteur de déplacement et la température se fera en deux temps. Dans un premier temps, on recherche la valeur du facteur de déplacement pour chacune des températures. Dans un deuxième temps, comme le suggère la théorie, on recherchera une relation exponentielle entre le facteur de déplacement et l'inverse de la température.

3.6.1.1 Recherche du facteur de déplacement en fréquence

Pour effectuer la translation horizontale d'une courbe, il suffit d'ajouter une valeur fixe à la variable indépendante sans changer la valeur de la variable dépendante. Dans notre cas cela revient à ajouter la même valeur fixe à toutes les fréquences sans changer la valeur de la tangente de l'angle des pertes. Pour trouver la valeur du facteur de déplacement, on translate horizontalement la courbe à une température donnée jusqu'à la faire coïncider avec la courbe maîtresse. La figure 38 représente la courbe expérimentale de la tangente de l'angle des pertes à différentes températures pour la cuve 09. On peut ainsi voir la courbe de la tangente de l'angle des pertes à 50 °C traduite

horizontalement, alors qu'elle est sur le point de coïncider avec la courbe maîtresse à 25 °C. On continue ainsi pour chacune des températures.

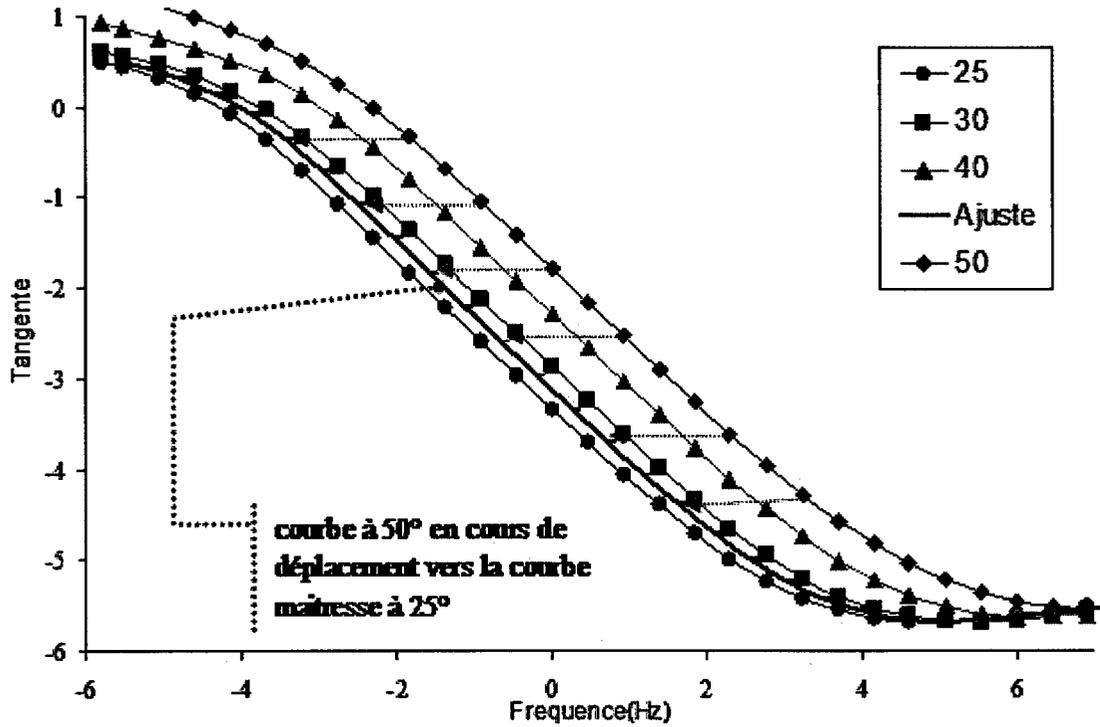


Figure 38 Mise en œuvre de l'ajustement en fréquence

Le tableau IX ci-dessous donne les valeurs des déplacements obtenus pour les trois cuves soumises à l'étude ainsi que pour l'échantillon de papier neuf.

Tableau IX

Déplacement en fréquence par rapport à la courbe maitresse à 25°C

Cuve	Température(C)	$1000/(T+273)$ (1/Kelvin)	Ln(déplacement) (Hz)
Papier neuf	25	3.36	0.00
	40	3.19	5.70
	60	3.00	10.60
	80	2.83	14.29
Cuve#09	25	3.36	0.00
	30	3.30	0.80
	40	3.19	1.99
	50	3.10	3.15
Cuve#01	25	3.36	0.00
	30	3.30	0.47
	40	3.19	1.13
	50	3.10	1.79
Cuve#07	25	3.36	0.00
	30	3.30	0.47
	40	3.19	1.55
	50	3.10	2.58

3.6.1.2 Recherche de la relation entre le déplacement en fréquence et la température

On s'attend, d'après la théorie, à trouver une relation exponentielle entre le déplacement et l'inverse de la température exprimée en Kelvin. Cela revient à rechercher une relation linéaire entre le logarithme de ces deux grandeurs. Dans la figure 39, on a représenté la relation entre le logarithme du déplacement et le logarithme de $1000/T$ pour les cuves 01,07, 09 et l'échantillon de papier.

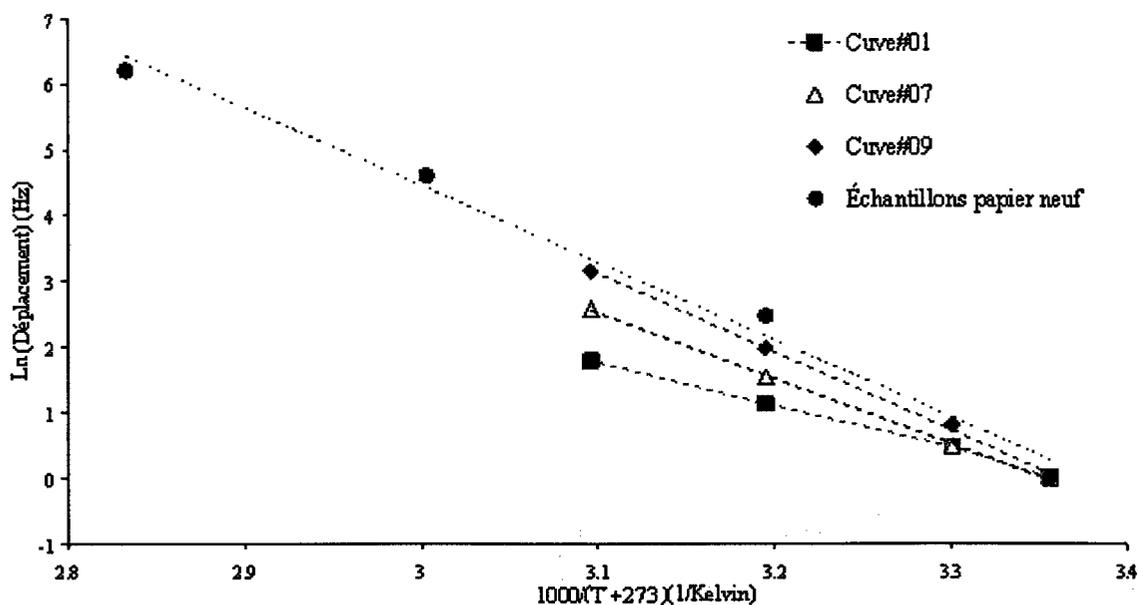


Figure 39 $1000/(T+273)$ vs $\ln(\text{déplacement})$ pour # cuves

On voit clairement l'existence de la relation exponentielle entre l'inverse de la température et le déplacement. Hormis la cuve 01, la relation semble être pratiquement identique pour le restant des cuves et l'échantillon de papier neuf. Le tableau X ci-dessous, illustre les coefficients de régression obtenus.

Tableau X

Tableau récapitulatif de la corrélation

Référence	Groupe	Taux Humidité	Coef Corrélation	Pente de régression (Kelvin)	Constante de régression (Hz)
Cuve#01	G1	1.7 %	99 %	-6.78	22.80
Cuve#07	G1	2.3 %	99 %	-10.01	33.55
Cuve#09	G1	3.3 %	98 %	-11.98	40
Papier neuf		3.3 %	99 %	-11.76	40

Comme confirmé par le tableau X, la relation est identique pour le papier neuf et les cuves 07 et 09. On en tire comme première conclusion que le facteur de déplacement en fréquence est indépendant de la géométrie. On peut aussi avancer que parmi tous les matériaux constituant la cuve, le papier reste l'élément dominant dans la détermination de la valeur du déplacement.

3.6.2 Exploitation de la relation

Si nous choisissons les coefficients de la cuve 09 comme déplacement, et la température de 25 °C comme température de référence. Alors le déplacement en fréquence pour se ramener d'une courbe mesurée à la température T à la courbe maîtresse de 25 °C est donnée par :

$$\ln(\text{déplac}(T)) = \frac{11\,980}{T+273} - 40 \quad (3.1)$$

À partir d'une courbe obtenue à T °C , la courbe maîtresse est obtenue par translation horizontale. Cela revient à laisser inchangée la valeur de la donnée mesurée, et à ajouter au logarithme de la fréquence le logarithme du déplacement telle que calculée par (3.1) pour la température T °C.

La figure 40, regroupe sur un même schéma la capacité mesurée à différentes températures ainsi que la courbe obtenue par le déplacement en fréquence. On voit clairement que les courbes issues du déplacement pour chaque température sont proches de la courbe maîtresse.

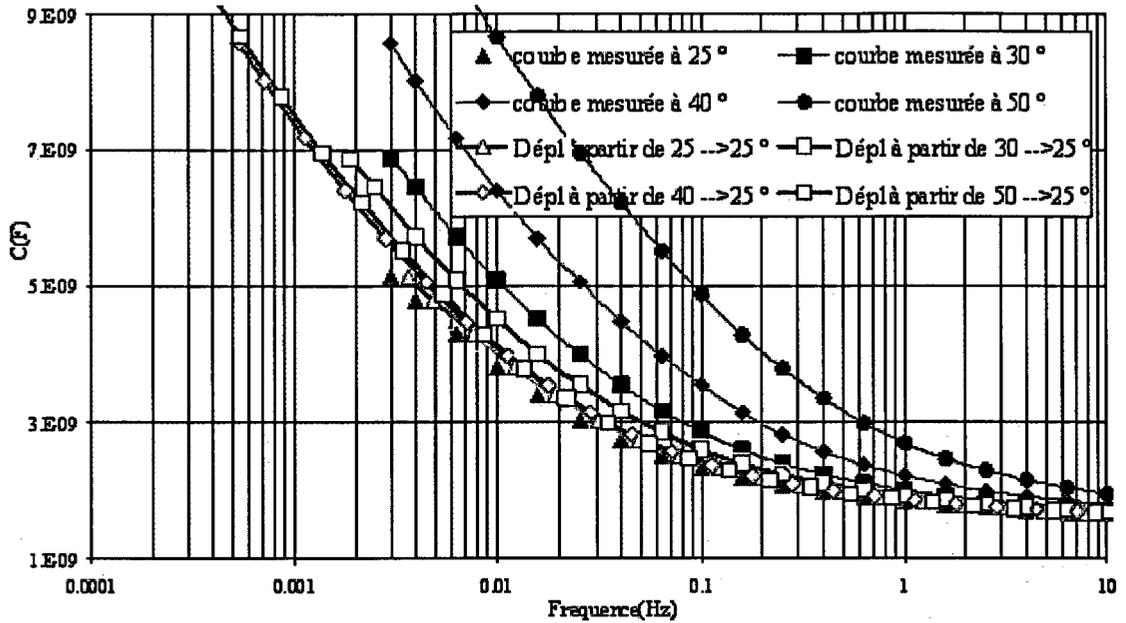


Figure 40 Déplacement en fréquence de la capacité vs fréquence cuve#09

3.7 Évaluation de l'influence de l'humidité

La figure 41, donne les courbes isothermes extraites des courbes isothermes de P.J. Griffin et J.D. Christie, et le relevé expérimental de la quantité d'eau dans l'huile pour différents taux d'humidité.

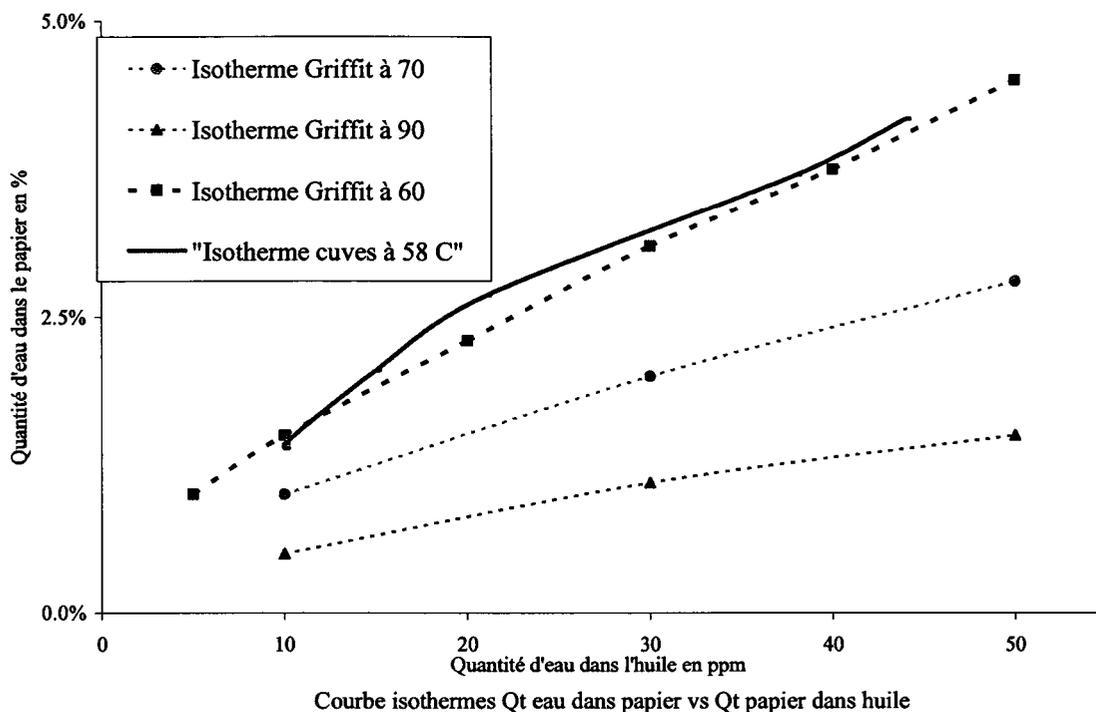


Figure 41 Courbe isothermes Qt eau dans papier vs Qt eau dans huile

L'on constate que la courbe issue des expériences s'approche de la courbe isotherme de P.J. Griffin et J.D. Christie à 60 °C, tout en restant supérieur ce qui laisse supposer que les mesures d'eau dans l'huile ont été faites à une température légèrement inférieure à 60 °C. Effectivement, la température à laquelle le contenu d'eau dans l'huile a été mesuré est de 58 °C. En conséquence lorsqu'on est à l'équilibre thermique, les courbes isothermes permettent de quantifier la relation existant entre la quantité d'eau dans le papier et celle contenue de l'huile. Les courbes isothermes de P.J. Griffin et J.D. Christie semblent donner de bons résultats.

3.8 Modèles

3.8.1 Circuits R en série avec (G//C)

La modélisation "Circuits R en série avec (G//C)", se rencontre lorsqu'on schématise le transformateur par une barrière d'huile de résistance R_h en série avec l'ensemble papier imprégné d'huile représenté par une résistance R_p en parallèle avec une capacité C_p . Comme montré au chapitre précédent, il faut alors calculer le rapport :

$$C^* = \frac{Y}{i\omega} \quad (3.2)$$

Désignons par C' la partie réelle de C^* et par C'' sa partie imaginaire et posons que $\tau = R_h C_0$; $G = \frac{1}{R_p}$; $b = \frac{R_h}{R_p}$. On obtient, comme énoncé au chapitre précédent, les

relations suivantes dans le domaine fréquentiel :

$$C' = C_p \frac{1}{(1 + \tau^2 \omega^2)} \quad (3.3)$$

$$C'' = G \frac{\left(1 + \frac{\tau^2}{b} \omega^2\right)}{\omega(\tau^2 \omega^2 + 1)} \quad (3.4)$$

$$\operatorname{tg}(\delta) = \frac{C''}{C'} = \frac{G}{C_p} \frac{\left(1 + \frac{\tau^2}{b} \omega^2\right)}{\omega} \quad (3.5)$$

Pour implémenter ces relations nous allons écrire directement la formule (3.2) dans le logiciel mathématique MATLAB.

3.8.1.1 Sensibilité de la capacité imaginaire

Les trois figures 42, 43 et 44, illustrent le comportement de la capacité imaginaire lorsque la résistivité du papier, la résistivité de l'huile et la capacité du papier varient.

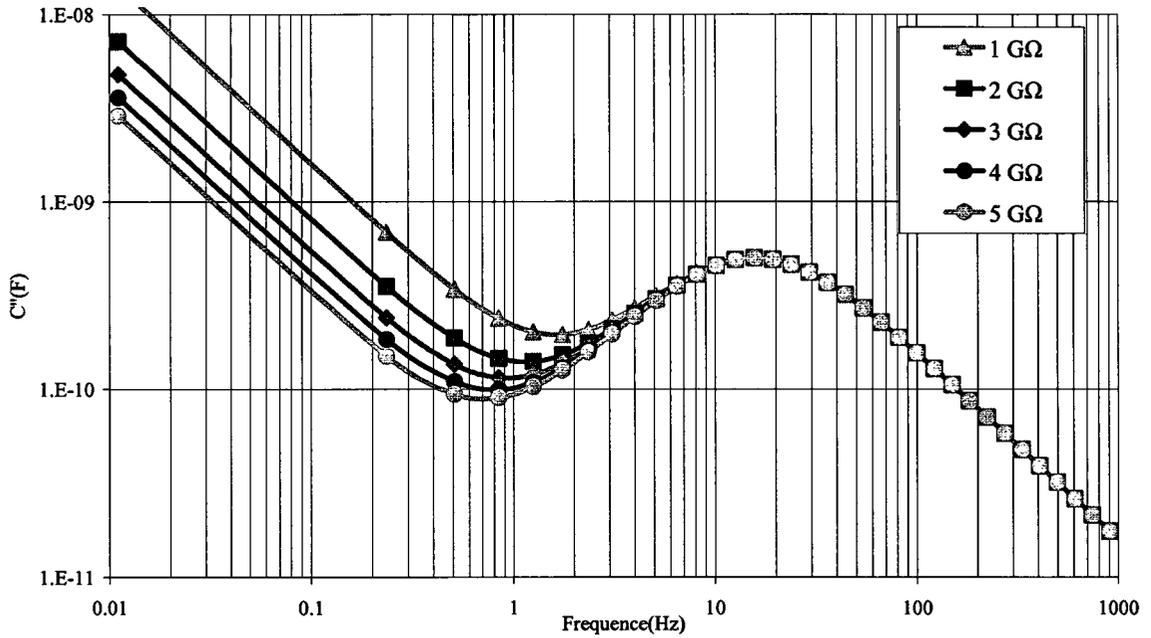


Figure 42 Évolution C'' fonction de R_p

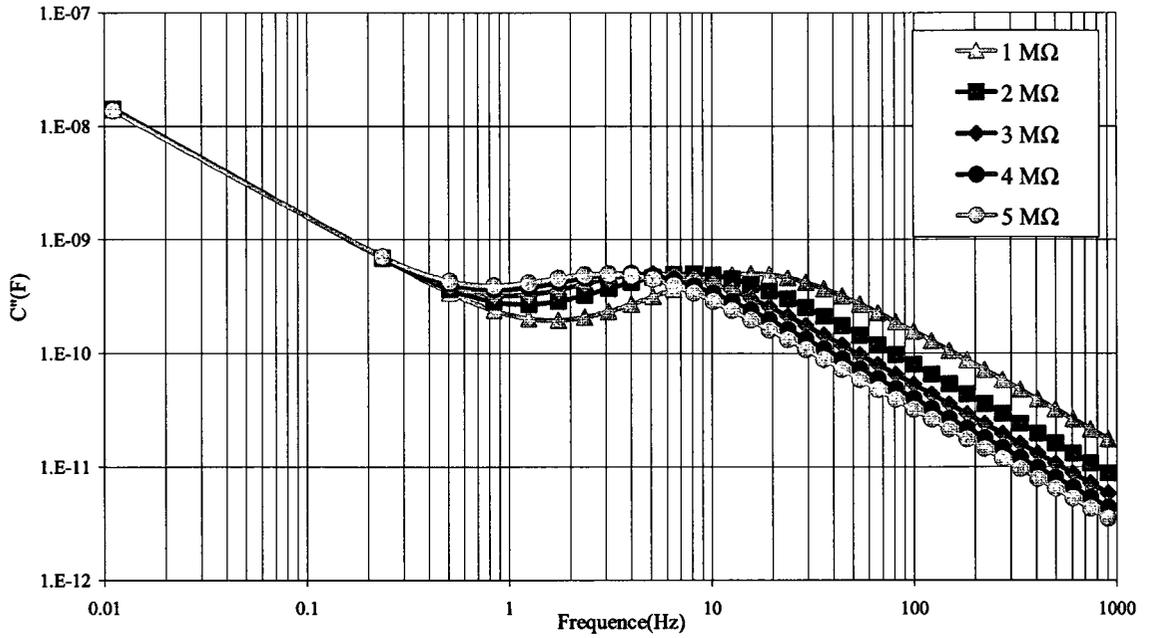


Figure 43 Évolution C'' fonction de R_h

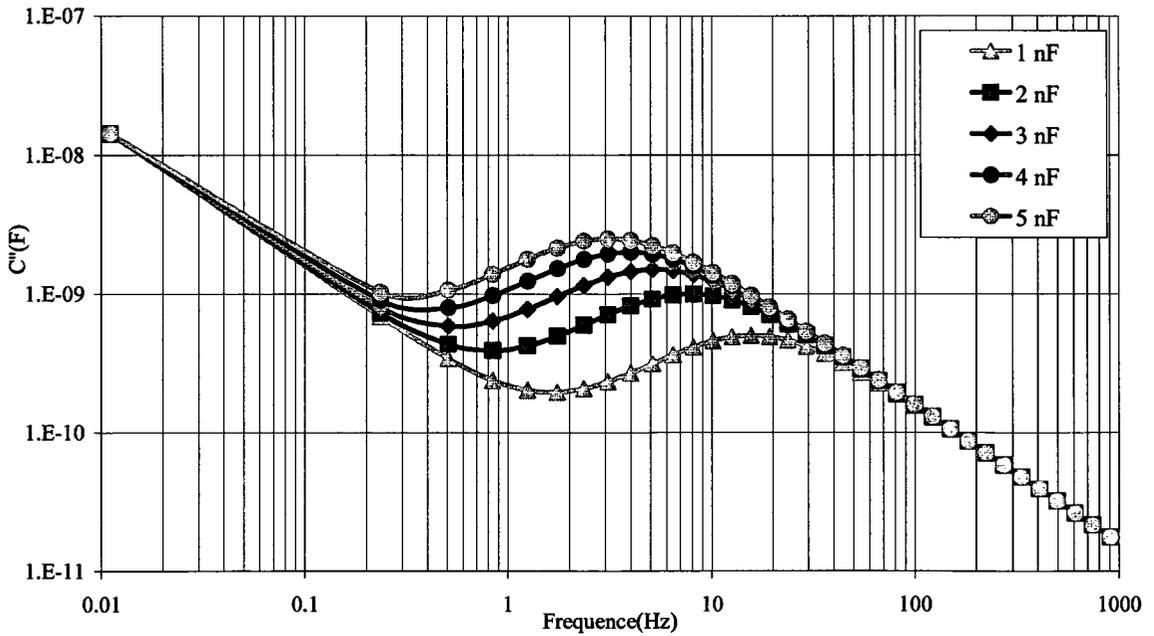


Figure 44 Évolution C'' fonction de C_p

3.8.1.2 Sensibilité de la capacité réelle

De façon similaire, les trois figures 45, 46 et 47, illustrent le comportement de la capacité réelle lorsque la résistivité du papier, de l'huile et la capacité du papier varient.

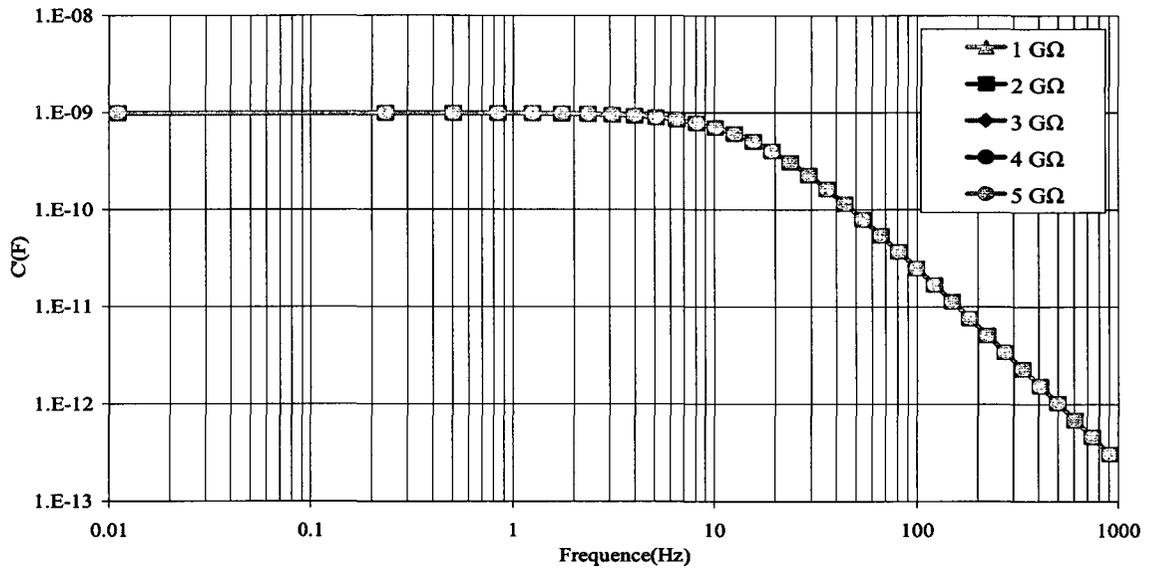


Figure 45 Évolution C' fonction de R_p

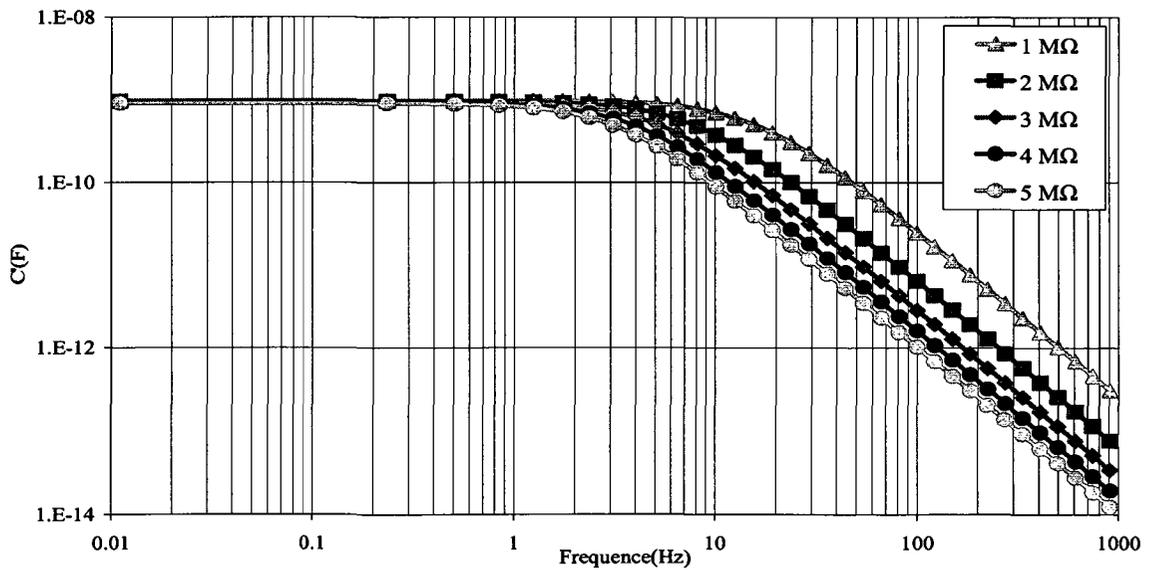


Figure 46 Évolution C' fonction de R_h

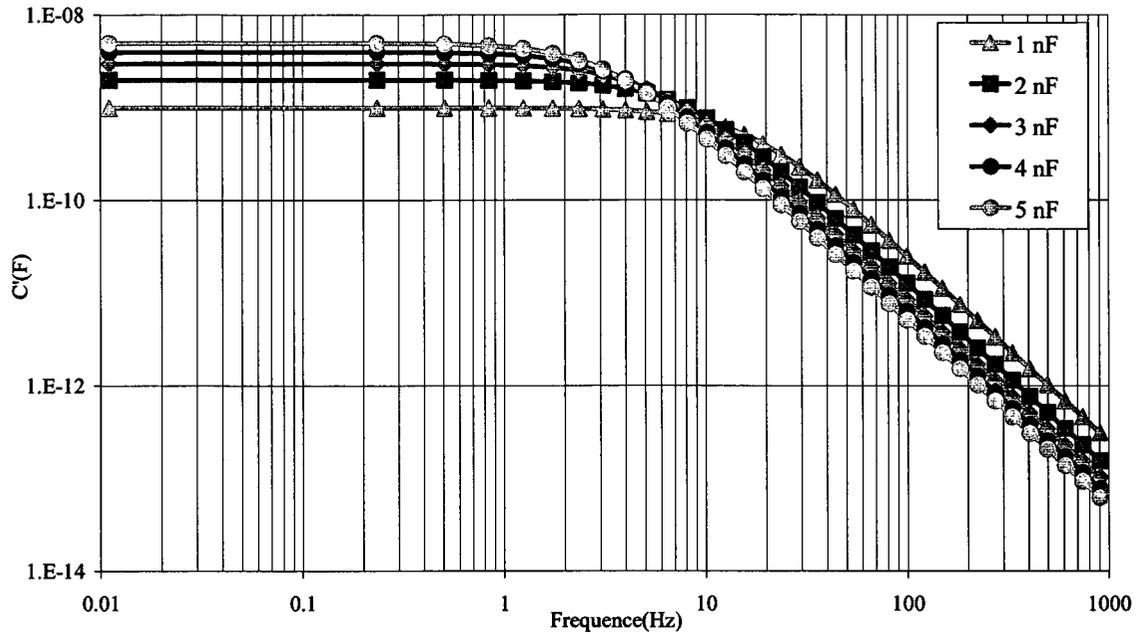


Figure 47 Évolution C' fonction de C_p

3.8.1.3 Sensibilité du courant

Le phaseur du courant de polarisation I , obéit à la relation suivante dans le domaine des fréquences :

$$I = \hat{j}\omega C^* U \quad (3.6)$$

où I, U, C^* désignent respectivement le phaseur courant, le phaseur tension et la capacité complexe.

Pour se ramener au domaine temporel à peu de frais, on peut utiliser la relation de Hamon (2 65) :

$$C^*(f) = \frac{i(0.1/f)}{2\pi fU} \quad (3.7)$$

où i désigne le courant dans le domaine du temps.

Posons que $t = 0.1/f$, il s'ensuit que :

$$i(t) = C^* (0.1/t) \omega U \quad (3.8)$$

Les trois figures 48, 49 et 50, dévoilent le comportement du courant lorsque la résistivité du papier, la résistivité de l'huile et la capacité du papier varient.

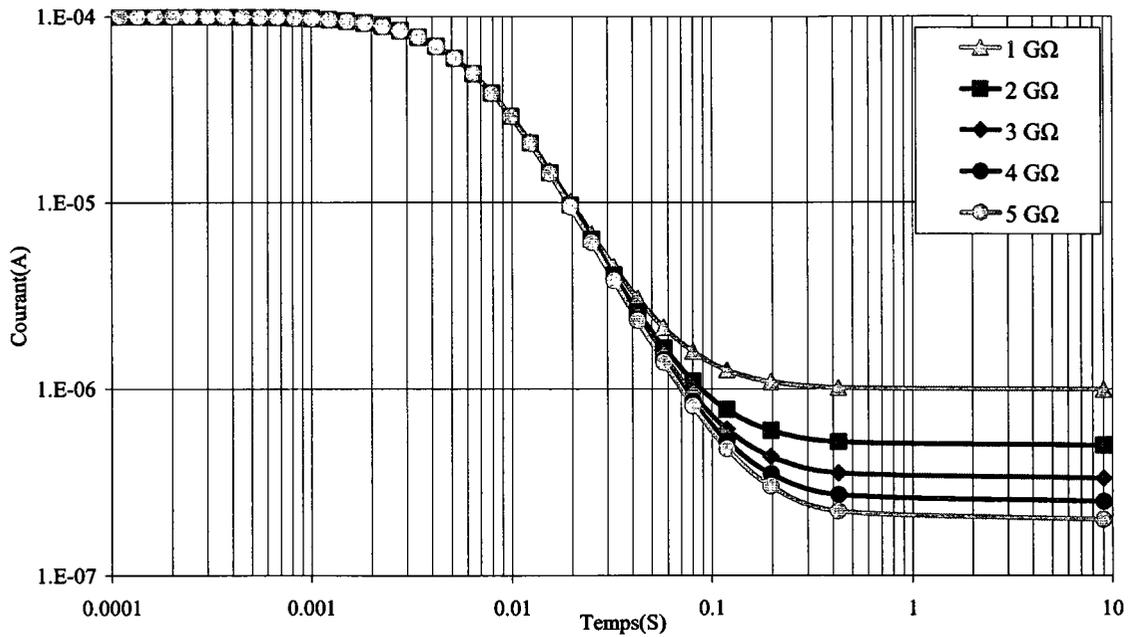


Figure 48 Évolution du courant en fonction de R_p

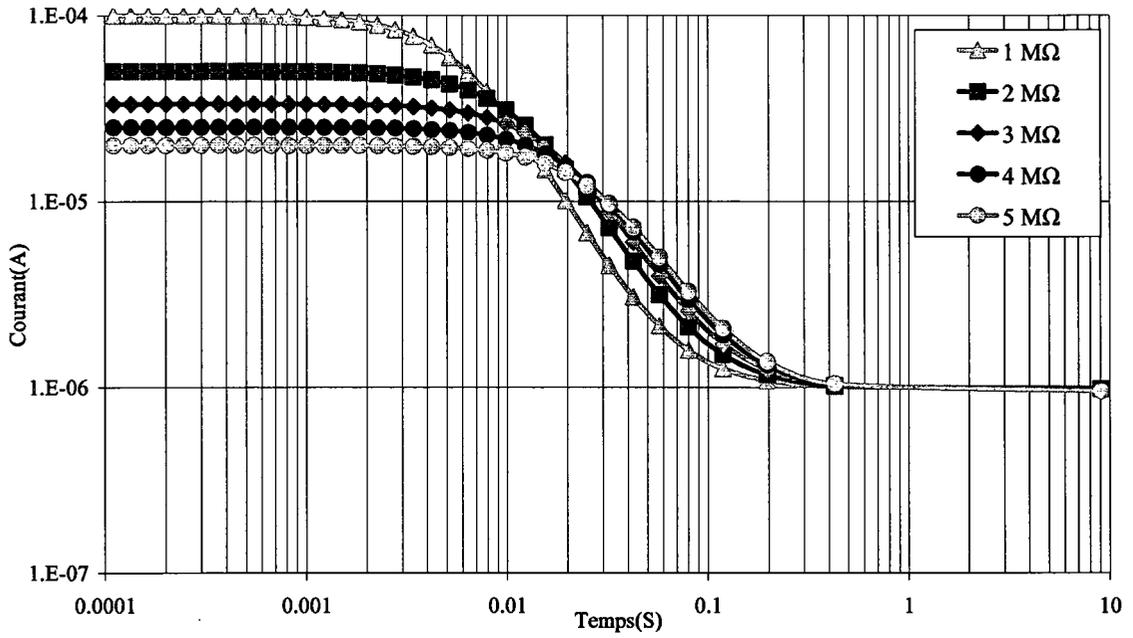


Figure 49 Évolution du courant en fonction de R_h

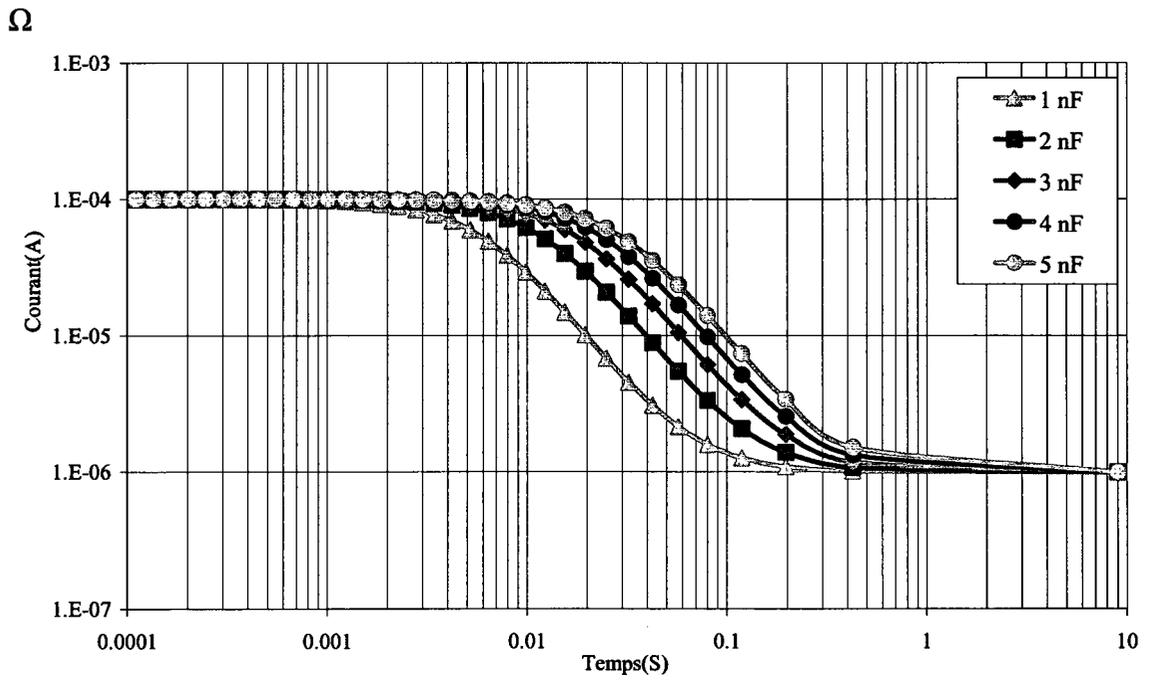


Figure 50 Évolution du courant en fonction de C_p

3.8.1.4 Analyse des résultats

Un tel modèle est loin de reproduire la réalité. Son principal intérêt réside dans les enseignements qualitatifs que nous pouvons en tirer. Commençons par analyser l'influence des paramètres R_h , R_p et C sur le courant. La figure 48, montre que la variation du paramètre R_p modifie la valeur du courant pour les temps longs. Alors que dans la figure 49, la variation du paramètre R_h a des répercussions sur la valeur du courant pour les temps courts et une légère modification pour les temps moyens, tandis que la figure 50 informe que la variation du paramètre C a une influence sur le courant pour les temps moyens. Ceci montre que l'un des intérêts de la méthode temporelle est que les modifications de la conductivité du papier, de celle de l'huile et de la capacité du papier se manifestent à des plages temporelles différentes. Les figures 42, 43 et 44 montrent respectivement la sensibilité de la capacité imaginaire aux variations des paramètres R_h , R_p et C . On aboutit aux mêmes conclusions que précédemment en tenant compte qu'aux temps longs correspondent les basses fréquences et aux temps courts correspondent les hautes fréquences. On remarque aussi dans la figure 43 que la variation du paramètre R_h modifie la fréquence où se produit le pic de relaxation sans changer la valeur de C . Il en va tout autrement dans la figure 44 où la modification du paramètre C a pour effet de modifier la fréquence où se produit la relaxation et la valeur de C . La figure 45 montre que la capacité réelle est insensible aux variations du paramètre R_p . La figure 46 montre que la variation du paramètre R_h influe aux hautes fréquences.

Pour résumer, on peut avancer que les changements du courant aux temps courts sont dûs aux changements de la résistivité de l'huile. Les changements de la courbe de courant aux temps longs sont dus au changement de la résistivité du papier. Quand aux changements dans la capacité du papier, ils se manifestent aux temps médians, avec en prime un changement notable dans la position et l'amplitude du pic de relaxation dans les mesures fréquentielles.

3.8.2 Circuits RC en parallèle "régression par morceaux"

Le modèle revient à faire une régression de la courbe expérimentale avec une somme finie d'exponentielles décroissantes. Cette régression est non linéaire et l'on doit utiliser un algorithme d'optimisation pour déterminer les paramètres qui permettent la meilleure correspondance entre la courbe expérimentale et la courbe paramétrique. Cependant on peut remarquer que les exponentielles ayant des constantes assez différentes, elles ne peuvent que très peu se chevaucher. Ainsi dans chaque portion de la courbe expérimentale une seule exponentielle est active, ce qui nous permet de faire une régression linéaire par morceaux sur chaque partie de la courbe. L'algorithme que nous avons développé fait une régression à reculons et opère comme décrit ci-dessous.

On commence par obtenir le courant de conduction en faisant la différence entre le courant de charge et le courant de décharge. Le courant de conduction est donné par la valeur de cette différence aux temps longs. En considérant la relation entre le logarithme du courant au logarithme du temps, on se ramène à un problème de régression linéaire. On soustrait le courant de conduction tel qu'obtenu précédemment. On cherche un intervalle de temps tel que sa borne supérieure soit la borne inférieure de l'intervalle précédent et tel que sa borne inférieure soit celle pour laquelle le coefficient de corrélation pour une régression linéaire est maximum. Ce faisant on peut déterminer les coefficients de l'exponentielle. L'expression de la régression obtenue est alors déduite de la courbe. Le processus reprend avec l'intervalle suivant et ainsi de proche en proche, on remonte vers les temps courts. À cause de la particularité de "chevauchement minime" des exponentielles décroissantes, l'ajustement fait à une étape donnée n'influencera pas beaucoup les ajustements antérieurs. Les résultats obtenus sont très prometteurs.

L'autre intérêt de cet ajustement est la possibilité de trouver la réponse fréquentielle à partir d'un simple calcul analytique. En vertu de la linéarité de l'intégrale, le problème revient à trouver la réponse fréquentielle de chaque exponentielle et à en faire la somme. La partie réelle de la transformée de Fourier est donnée par :

$$C'(\omega) = \int_0^{\infty} b \exp(at) \cos(\omega t) dt = b \frac{a}{a^2 + \omega^2} \quad (3.9)$$

La partie imaginaire est donnée elle par :

$$C''(\omega) = \int_0^{\infty} b \exp(at) \sin(\omega t) dt = b \frac{\omega}{a^2 + \omega^2} \quad (3.10)$$

Ce qui donne la relation suivante :

$$C'(\omega) = \left(\sum_{i=1}^6 b_i \frac{a}{a_i^2 + \omega^2} \right) + C'_{1000\text{hz}} \quad (3.11)$$

$$C''(\omega) = \left(\sum_{i=1}^6 b_i \frac{\omega}{a_i^2 + \omega^2} \right) \quad (3.12)$$

Nous avons ajouté C à 1000 Hz pour approcher la valeur C à l'infini du modèle. Pour avoir une idée de l'erreur entre la courbe paramétrique et la courbe expérimentale, on a calculé celle-ci pour chacune des 87 expériences par la formule suivante :

$$Erreur = \frac{\sum_t |CP(t) - M(t)|}{\sum_t |M(t)|} \quad (3.13)$$

CP(t) désigne la courbe paramétrique, M(t) désigne la courbe mesurée et t désigne le temps de mesure ou de calcul.

Pour segmenter l'erreur, on a compté le nombre d'expériences pour lesquelles l'erreur était de 1%, 2%,.... . Le résultat de cette classification est consigné sur la figure 51.

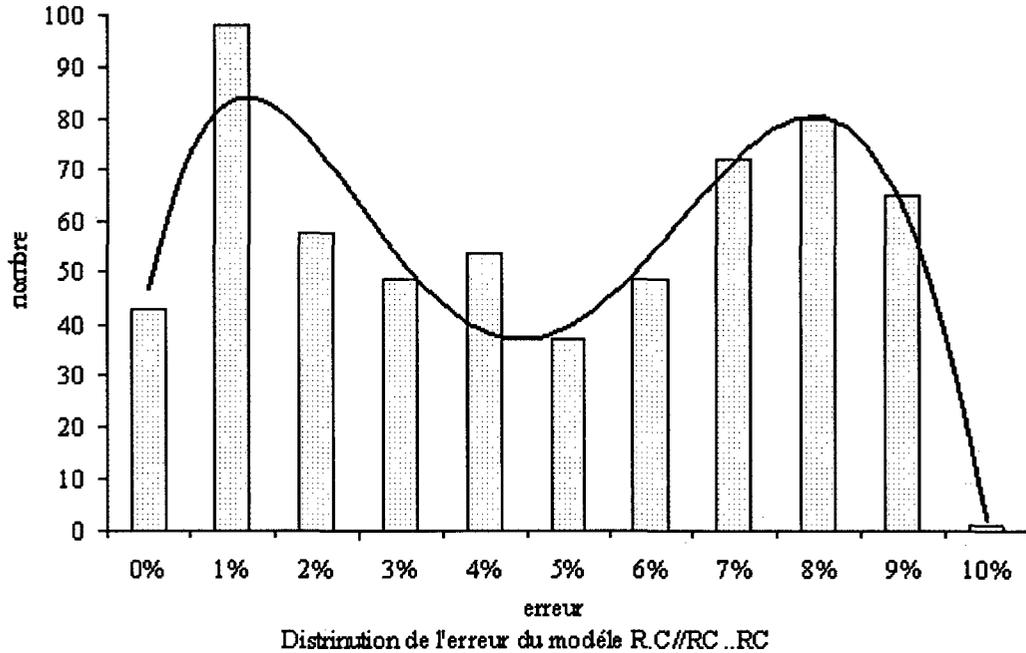


Figure 51 Distribution de l'erreur

Les résultats montrent que l'erreur moyenne se situe aux alentours de 9 % avec un écart type de 7 %.

3.8.3 Circuits RC en parallèle "Ajustement Gauss Newton"

Cette partie consistait à implémenter l'algorithme de Gauss Newton. À cause de la quantité de calculs symboliques et numériques, on a utilisé Matlab. L'absence d'interface entre Matlab et le logiciel de base de données Access, a fait qu'on n'a pu développer une solution intégrée. On a du opérer en trois étapes. La première a été l'importation des données dans un fichier de travail de Matlab. Ensuite le programme d'optimisation a été lancé avec comme paramètre le nombre d'itérations maximum et la précision souhaitée. En dernier lieu la matrice des résultats est intégrée dans notre base de données. Comme on peut le voir sur la figure 52, la courbe analytique est identique à

la courbe expérimentale. Ceci montre que l'ajustement est excellent et il peut atteindre une précision de 1 %. On se gardera cependant de rechercher une telle précision, car elle serait sûrement inférieure au pourcentage d'erreur commis par les conditions d'expérimentation. Le programme d'ajustement a été lancé avec une précision cible de 2 %, et 98 % des courbes on pu être modélisées avec cette précision.

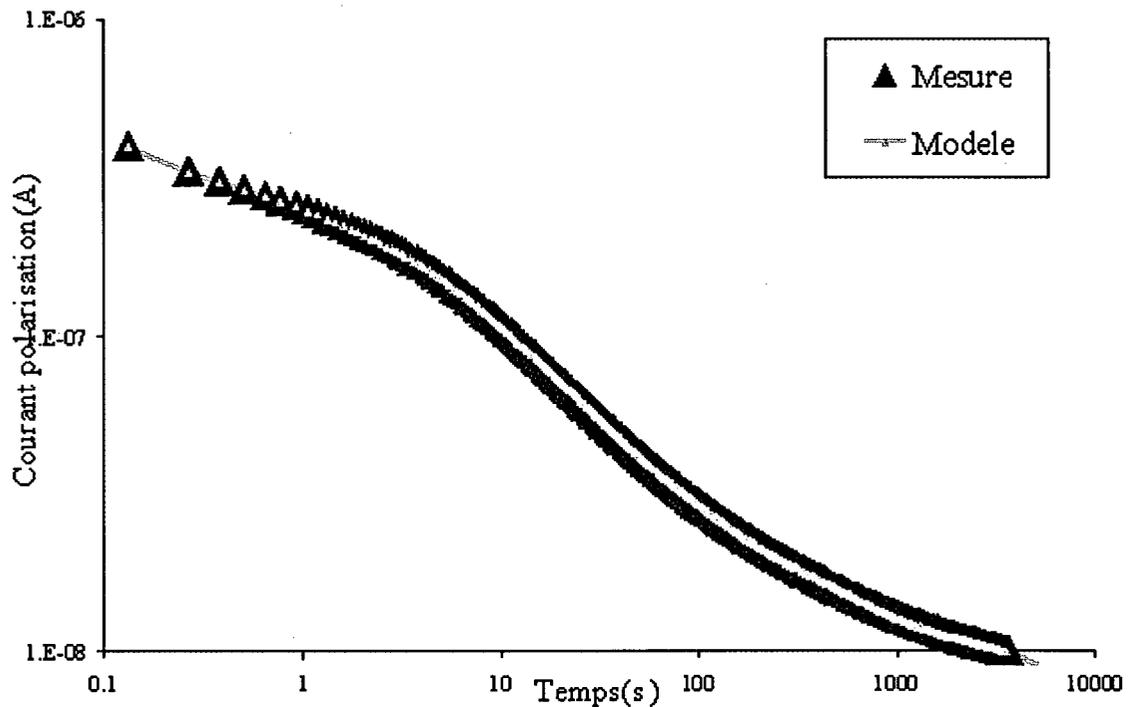


Figure 52 Ajustement par plusieurs exponentielles

3.8.4 Modèle XY

Le modèle a été mise en œuvre pour calculer la permittivité du papier au tout début du vieillissement et à sa fin et ce pour toutes les cuves, soit les 28 courbes expérimentales. Pour chacune des 29 fréquences présentes dans une courbe, il est nécessaire de résoudre une équation du second degré pour trouver la permittivité du papier. Ce qui donne un total de 800 équations à résoudre (28 x 29). Étant donné ce grand nombre d'équations à

résoudre, il était plus judicieux d'utiliser un outil de résolution approprié tel que Matlab. Pour le transfert des données entre Matlab et notre base de données et Excel on a tout simplement utilisé l'outil "couper coller". Les résultats du modèle sont sauvegardés dans l'espace de travail de Matlab.

Le modèle XY peut être schématisé en trois grandes étapes

- Évaluer la permittivité relative de l'ensemble du composé huile papier
- Calculer la capacité géométrique
- Déduire la permittivité du papier.

3.8.4.1 Permittivité relative de l'ensemble

Dans un premier temps, on utilise la loi des mélanges appelée aussi limite supérieure Wiener [16], pour calculer la permittivité du papier :

$$\varepsilon^*_{papier} = \varepsilon^*_{papier_sec} (1 - Tx_h) + \varepsilon^*_{eau} .Tx_h \quad (3.14)$$

En remplaçant les permittivités du papier sec et de l'eau par leurs valeurs respectives 4.5 et 80 on obtient après simplification :

$$\varepsilon'_{papier} (1000 \text{ Hz}) \square 4.5 + 74.5.Tx_h \quad (3.15)$$

où Tx_h est la fraction volumique d'eau.

Dans un deuxième temps on utilise la formule suivante :

$$\varepsilon^*(\omega, T) = Y\varepsilon^*_{papier} + \frac{1-Y}{\frac{1-X}{\varepsilon^*_{Oil}} + \frac{X}{\varepsilon^*_{papier}}} \quad (3.16)$$

Dans laquelle X et Y expriment respectivement la quantité relative de séparateur et de barrière. Pour notre modèle, X et Y se situait à 12 et 20 % respectivement.

Comme les mesures expérimentales le confirment, à hautes fréquences la permittivité complexe de chaque matériau est égale à peu de chose près à sa partie réelle. Pour le papier la permittivité est donnée par (3.15), celle de l'huile est de 2,2. On obtient alors à partir des relations (3.15) et (3.16), les équations suivantes :

$$\varepsilon'_{\text{papier}}(1000 \text{ Hz}) = \varepsilon^*_{\text{papier}}(1000 \text{ Hz}) = 4.5 + 74.5t_{\text{hum}} \quad (3.17)$$

$$\varepsilon'(1000 \text{ Hz}) = \varepsilon^*(1000 \text{ Hz}) = 0.2\varepsilon'_{\text{papier}}(1000 \text{ Hz}) + \frac{0.8}{\frac{0.88}{2.2} + \frac{0.12}{\varepsilon'_{\text{papier}}(1000 \text{ Hz})}} \quad (3.18)$$

Il s'ensuit que la seule connaissance du taux d'humidité devrait donner la permittivité relative de l'ensemble à fréquence élevée.

3.8.4.2 Capacité géométrique

La capacité géométrique C_0 est donnée par la formule suivante :

$$C_0 = \frac{C}{\varepsilon_r} \quad (3.19)$$

où ε_r désigne la permittivité relative.

Si nous considérons la fréquence 1000 Hertz comme étant une haute fréquence, alors les relations (3.17) et (3.18) donnent la permittivité relative de l'ensemble. On déduit la capacité géométrique exprimée par la relation suivante :

$$C_0 = \frac{C_{1000\text{Hz}}}{\varepsilon'} \quad (3.20)$$

Si l'on envisage de généraliser la relation (3.20) pour les transformateurs réels, il est important que ce calcul se fasse dès la mise en service du transformateur, une fois que la migration d'humidité du papier vers l'huile ait cessé. On invoquera deux raisons à cela.

En premier lieu, c'est lors de la mise en service du transformateur que le papier et l'huile sont les plus conformes au modèle idéal. En second lieu, tous les transformateurs sont mis en service dans les mêmes conditions, ce qui confère une certaine consistance à la méthode. Les capacités géométriques obtenues devraient en toute logique être les mêmes pour toutes les cuves, mais comme le montre le graphe 52, on note une certaine dispersion.

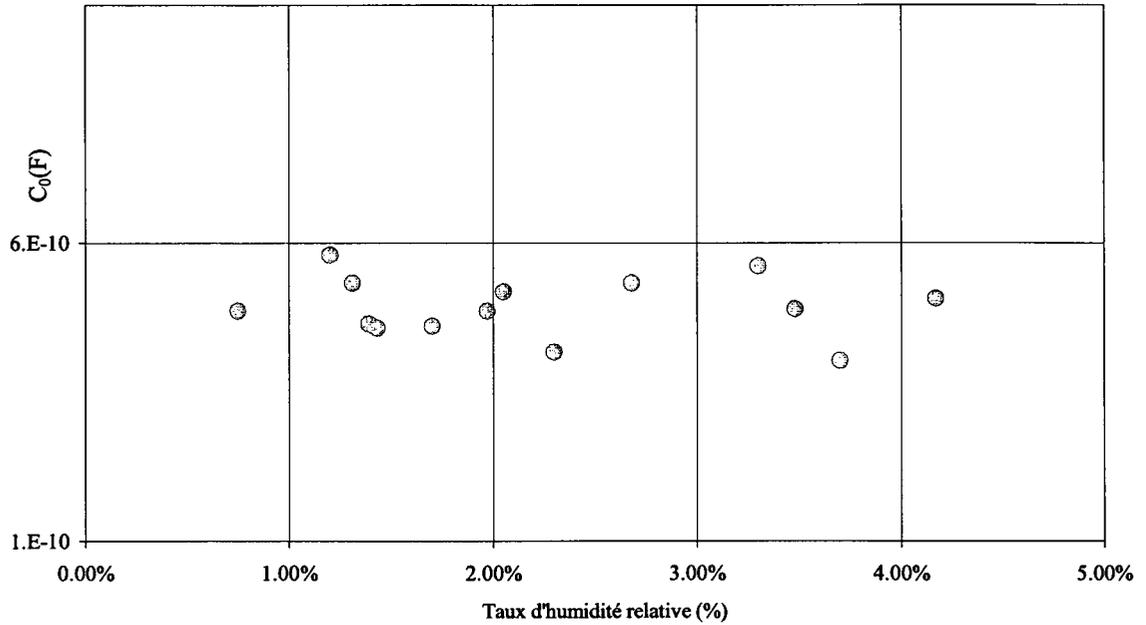


Figure 53 Évolution de C_0 en fonction de l'humidité des cuves

3.8.4.3 Permittivité du papier

Rappelons d'abord la formule pour le calcul de ε^* .

$$\varepsilon^* = Y\varepsilon_{\text{papier}}^* + \frac{1-Y}{\frac{1-X}{\varepsilon_{\text{oil}}^*} + \frac{X}{\varepsilon_{\text{papier}}^*}} \quad (3.21)$$

Connaissant C_0 , ε^* est déduit de la courbe expérimentale fréquentielle par division par C_0 . Nous connaissons aussi le modèle qui donne la permittivité de l'huile. On peut déduire à partir de (3.21) la permittivité du papier. Après calcul et simplification il vient que :

$$Y(1-X)\varepsilon_p^{*2} + ((YX+1-Y)\varepsilon_h^* - (1-X)\varepsilon^*)\varepsilon_p^* - X\varepsilon_h^*\varepsilon^* = 0 \quad (3.22)$$

Il s'agit d'une équation du second ordre en ε_p^* . Les paramètres X et Y sont à définir par l'utilisateur. ε_h^* est donnée par un modèle connu. Quant à ε^* , elle est obtenue à partir de la courbe expérimentale. Pour que les résultats ne soient pas biaisés, il faut mesurer le taux d'humidité par une méthode indépendante.

Les figures 54 et 55, illustrent la permittivité imaginaire du papier issue de la méthode ci-dessus respectivement en début et en fin de vieillissement.

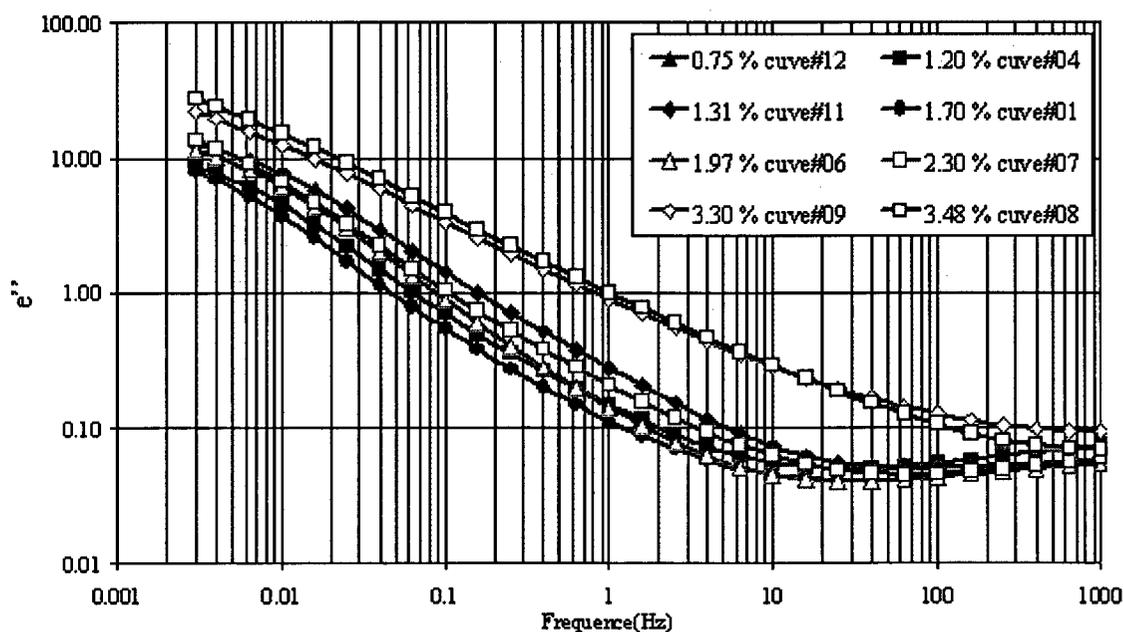


Figure 54 ε_p'' calculée au début du vieillissement

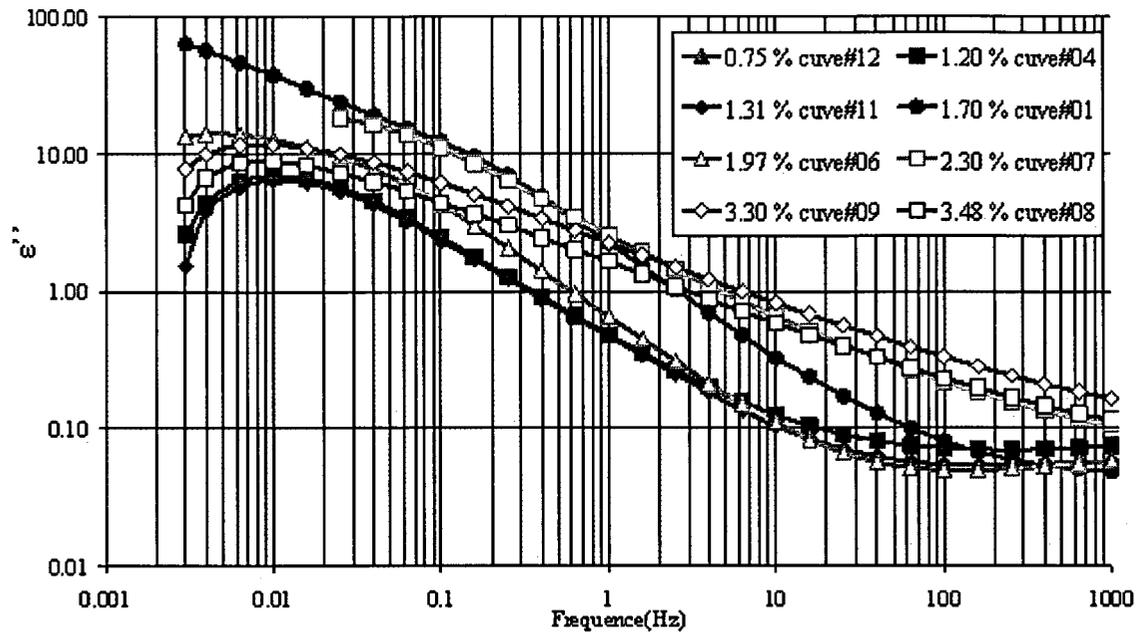


Figure 55 ϵ_p'' calculée en fin de vieillissement

À la figure 54, on est en début de vieillissement. Seul l'effet de l'humidité des cuves entre en jeu, et l'on voit nettement se détacher les courbes des cuves 08 et 09 du reste des cuves. Les courbes de la figure 55 sont plus difficiles à analyser. Toutes les cuves n'ont pas accumulé les mêmes temps de vieillissement et ne sont pas soumises à la même température de vieillissement. Néanmoins, on voit encore une fois se détacher les cuves 08 et 09 auxquelles vient s'ajouter la cuve 07. Le restant des autres cuves exhibe un pic de relaxation aux alentours de la fréquence 0.01 Hz. La seule exception est la cuve 01 qui malgré son taux d'humidité bas, se comporte comme une cuve humide.

3.8.4.4 Validation des résultats

Nous disposons des mesures fréquentielles effectuées sous humidité constante sur les échantillons de papier extraits des cuves. On peut donc effectuer la comparaison entre la courbe expérimentale, sur ces échantillons avec celles du papier telles que déduites par la procédure ci-dessus. En toute logique les deux courbes devraient être assez proches.

Les figures 56 et 57 illustrent cette comparaison qui à première vue semble raisonnablement satisfaisante. Ceci permet de valider les approximations faites pour le calcul de la permittivité relative et de la capacité géométrique des cuves ainsi que celles faites pour le calcul de la permittivité relative du papier.

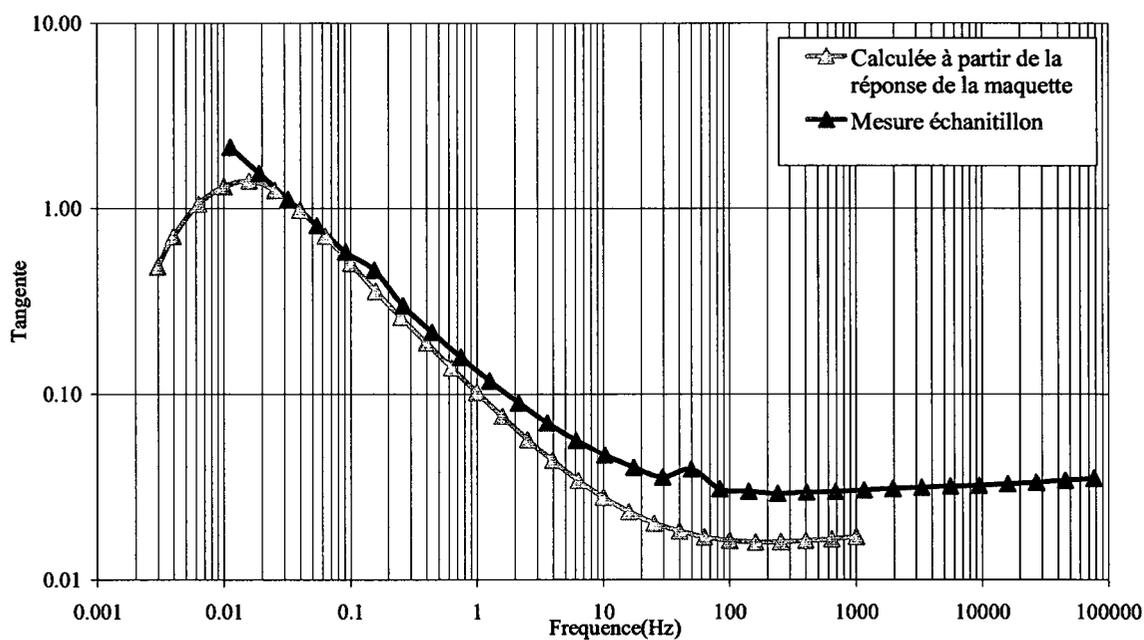


Figure 56 Comparaison de la tangente δ calculée par le modèle XY et celle mesurée. L'échantillon provient d'une cuve sèche

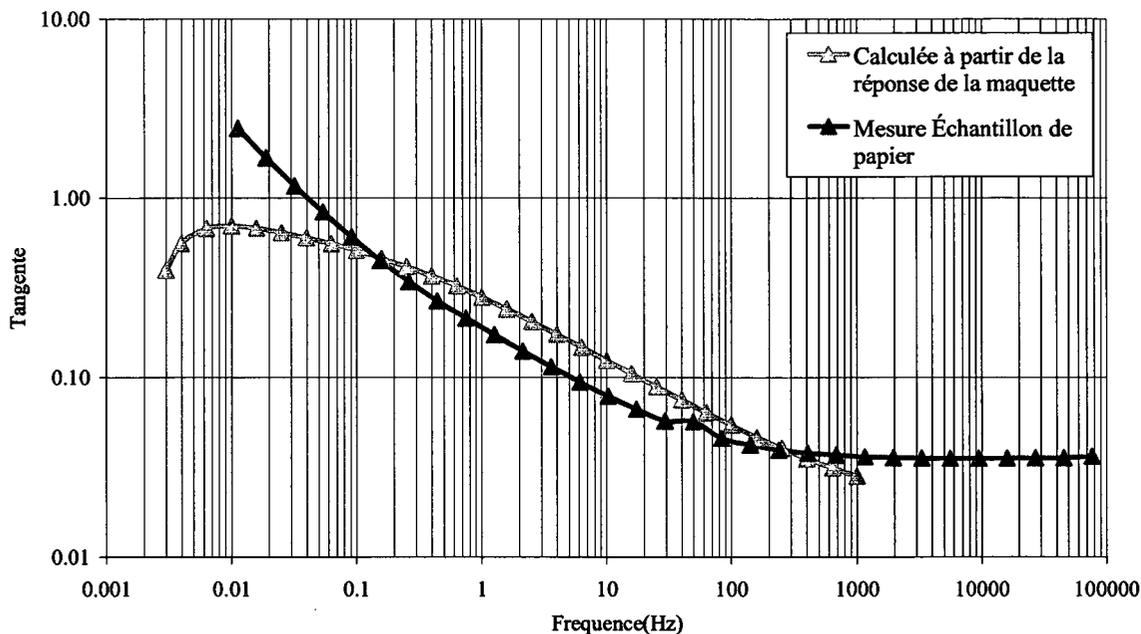


Figure 57 Comparaison de la tangente δ calculée par le modèle XY et celle mesurée. L'échantillon provient d'une cuve humide

Le choix de la tangente de l'angle des pertes comme critère de comparaison vient de la difficulté à obtenir la capacité géométrique des échantillons de papier. En effet, la tangente de l'angle des pertes a ceci de particulier que le caractère géométrique est présent à peu près de la même façon dans la capacité imaginaire et la capacité réelle et conséquemment se simplifie lors du rapport de ces deux grandeurs.

3.9 Validité de la transformée de Fourier obtenue analytiquement

Pour définir la capacité imaginaire, nous disposons de deux méthodes analytiques qui sont :

- La transformée de Fourier de la courbe paramétrique en exponentielles décroissantes des données temporelles.
- La transformée de Hamon des données temporelles.

Nous disposons aussi des mesures expérimentales fréquentielles comme critère de comparaison. Dans ce qui suit, nous allons voir successivement comment obtenir la capacité imaginaire et réelle pour chacune des deux méthodes analytiques ci dessus. Les mesures fréquentielles donnent comme résultat le module de la capacité complexe et la tangente de l'angle des pertes. Il est nécessaire d'avoir recours à quelques relations trigonométriques pour en déduire la capacité réelle et la capacité imaginaire.

3.9.1 Courbe paramétrique en exponentielles décroissantes

Les capacités imaginaire et réelle sont données par la transformé de Fourier de la courbe paramétrique. Celle-ci étant la somme d'exponentielles décroissantes, il suffit de calculer la transformée de Fourier pour la forme générique suivante :

$$I(t) = \exp(-a \cdot x + b) \quad (3.23)$$

où a et b sont des constantes réelles positives et t désigne la variable temps en secondes.

Par définition de la transformée de Fourier, les partie réelle et imaginaire sont données respectivement par :

$$I'(\omega) = \int_0^{\infty} \exp(-a \cdot x + b) \cos(\omega t) dt = \frac{a \exp(-b)}{a^2 + \omega^2} \quad (3.24)$$

$$I''(\omega) = \int_0^{\infty} \exp(-a \cdot x + b) \sin(\omega t) dt = \frac{\omega \exp(-b)}{a^2 + \omega^2} \quad (3.25)$$

où a et b sont des constantes réelles positives et f désigne la fréquence en Hertz.

L'expression analytique pour une somme d'exponentielles décroissantes est donnée par :

$$I(t) = \sum_{i=1}^n \exp(-a_i \cdot x + b_i) \quad (3.26)$$

Par linéarité de la transformée de Fourier et en tenant compte de la capacité à l'infini on obtient :

$$C'(\omega) = \frac{1}{U} \sum_i \frac{a_i \exp(-b_i)}{a_i^2 + \omega^2} + C'_{\text{inf}} \quad (3.27)$$

$$C''(\omega) = \frac{1}{U} \sum_i \frac{\omega a_i \exp(-b_i)}{a_i^2 + \omega^2} \quad (3.28)$$

où a et b sont des réels positifs et U désigne la tension. C'_{inf} désigne la capacité réelle aux hautes fréquences.

3.9.2 Transformée de Hamon

Comme explicité dans le chapitre précédent, la transformée de Hamon permet de calculer la capacité complexe à partir des données temporelles via la formule suivante :

$$C^*(\omega) = \frac{i(0.1/t)}{2\pi fU} \quad (3.29)$$

où C^* désigne la capacité complexe, I(t) le courant et U la tension.

La transformée de Hamon ne permet pas de calculer la capacité réelle.

3.9.3 Mesures fréquentielles

L'appareil de mesure était configuré de telle sorte à ce qu'il génère un fichier donnant le module de la capacité complexe et la tangente de l'angle des pertes en fonction de la fréquence. Pour déduire les capacités réelle et imaginaire à partir des deux mesures précédentes, nous opérons comme suit :

On cherchera à travers les formules trigonométriques usuelles à exprimer le cosinus et le sinus en fonction de la tangente.

$$\begin{aligned} \cos(\delta)^2 + \sin(\delta)^2 = 1 &\Leftrightarrow \underbrace{\frac{\cos(\delta)^2}{\cos(\delta)^2}}_1 + \underbrace{\frac{\sin(\delta)^2}{\cos(\delta)^2}}_{\text{tg}(\delta)^2} = \frac{1}{\cos(\delta)^2} \\ \cos(\delta) &= \frac{1}{\sqrt{1 + \text{tg}(\delta)^2}} \\ \sin(\delta) = \text{tg}(\delta) \cos(\delta) &= \frac{\text{tg}(\delta)}{\sqrt{1 + \text{tg}(\delta)^2}} \end{aligned} \quad (3.30)$$

En utilisant les résultats trigonométriques de (3.30) ainsi que les définitions de la capacité réelle et imaginaire on obtient :

$$\begin{aligned} C' = C \cos(\delta) &= C \frac{1}{\sqrt{1 + \text{tg}(\delta)^2}} \\ C'' = C \sin(\delta) &= C \frac{\text{tg}(\delta)}{\sqrt{1 + \text{tg}(\delta)^2}} \end{aligned} \quad (3.31)$$

3.9.4 Comparaison avec la capacité complexe

Grâce à notre module d'automatisation, on a pu effectuer une comparaison exhaustive des deux méthodes analytiques avec les mesures réelles pour les 87 courbes fréquentielles et temporelles. Nous limiterons les résultats à deux cuves, une sèche et une humide, au début et à la fin du vieillissement.

Les figures 58 et 59 donnent les courbes de la capacité imaginaire pour une cuve sèche pour chacune des trois méthodes en début et en fin de vieillissement. On peut constater que la courbe analytique est très proche de la courbe expérimentale en fin de vieillissement. Les figures 60 et 61 donnent les mêmes informations pour une cuve humide. Cependant pour la cuve humide, on remarque les oscillations de l'approximation analytique, signe d'une insuffisance au niveau de la modélisation pour les cuves humides.

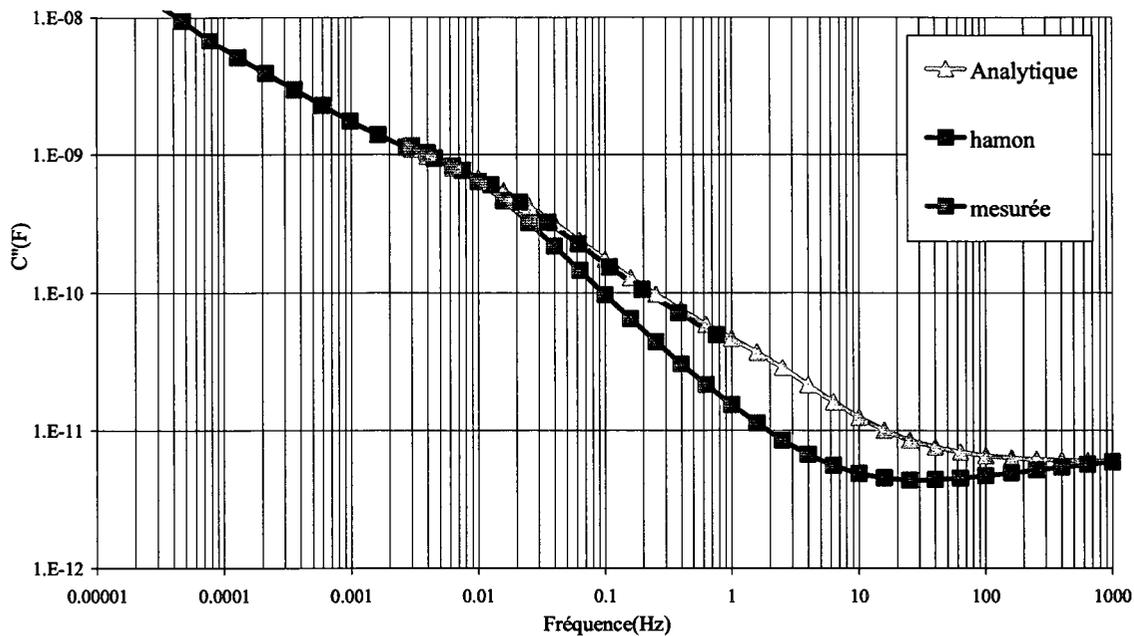


Figure 58 C'' en début de vieillissement pour une cuve sèche

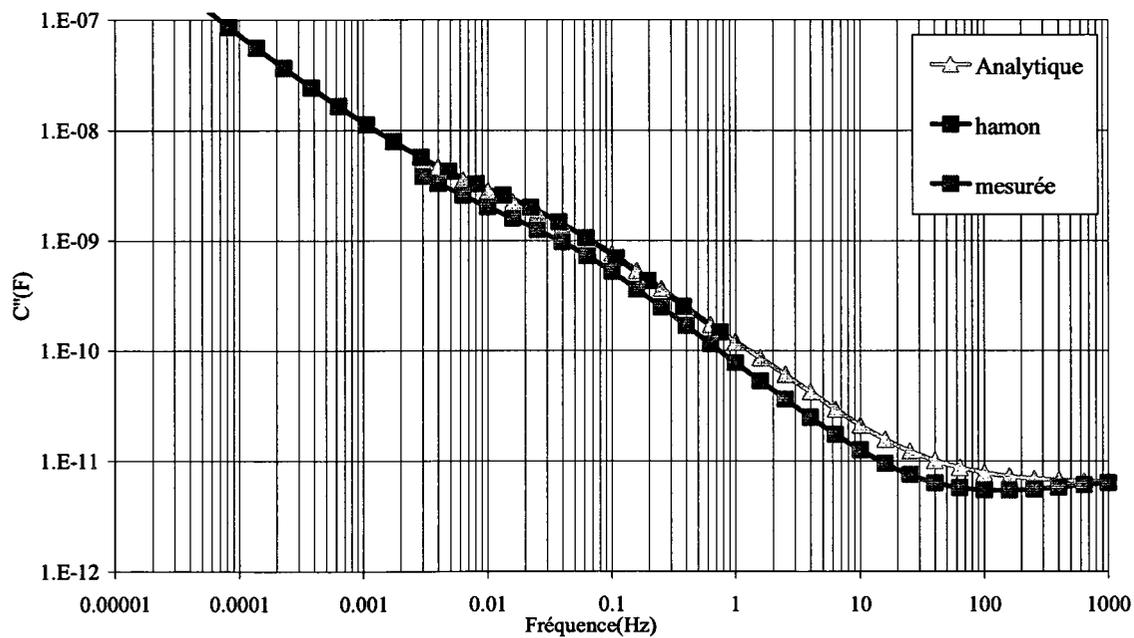


Figure 59 C'' en fin de vieillissement pour une cuve sèche

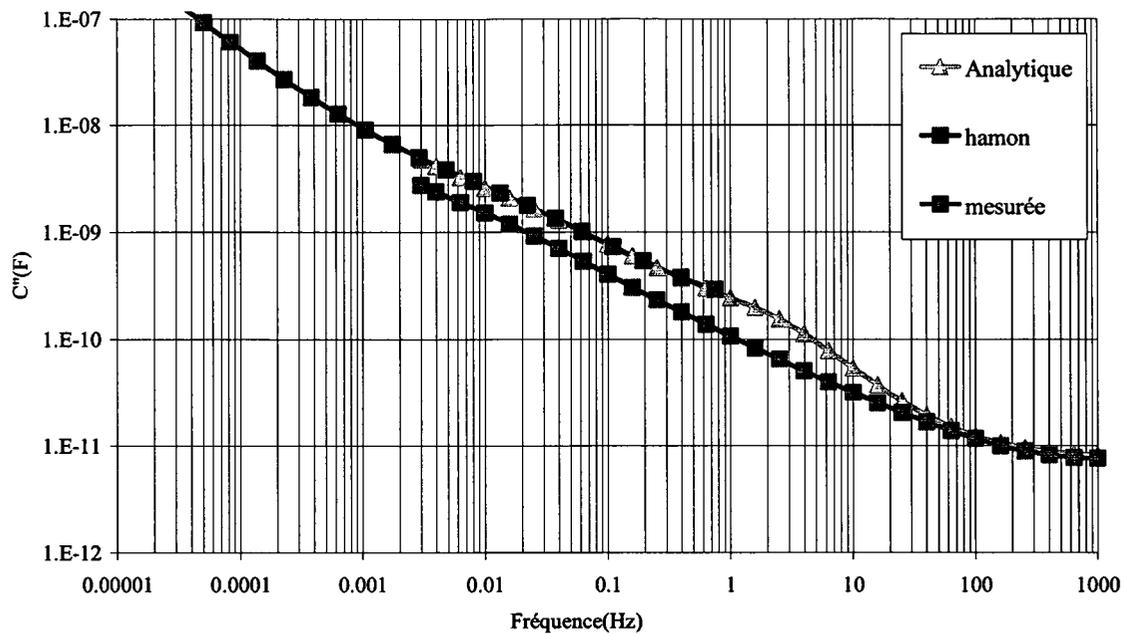


Figure 60 C'' en début de vieillissement pour une cuve humide

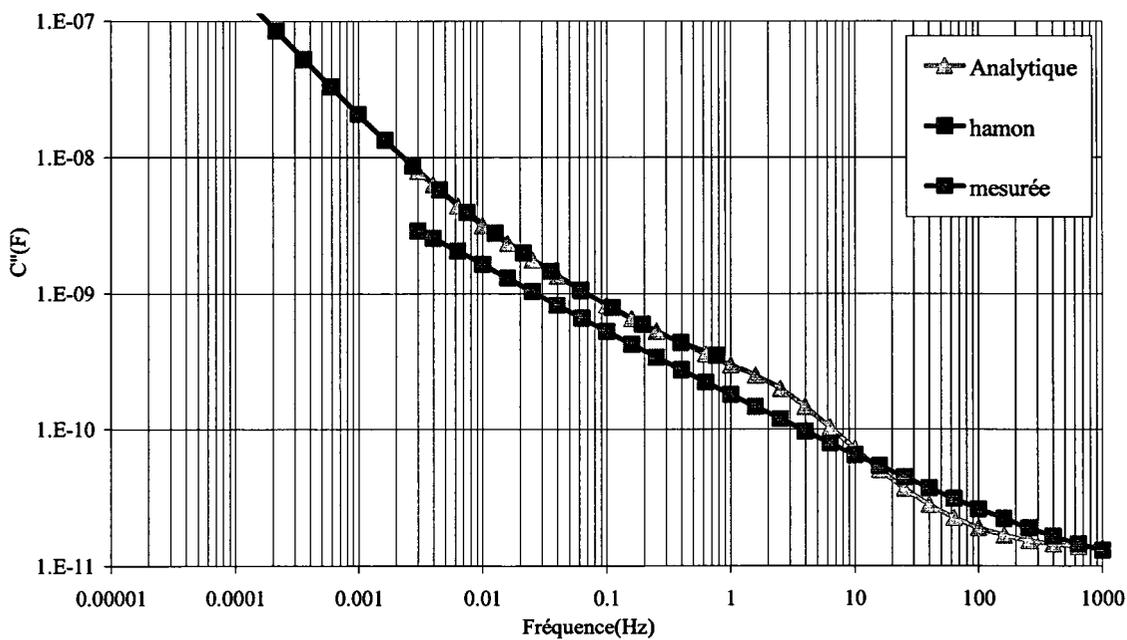


Figure 61 C'' en fin de vieillissement pour une cuve humide

3.9.5 Comparaison avec la capacité réelle

Le même travail de comparaison peut être fait pour la capacité réelle. La capacité réelle pour la courbe paramétrique est donnée par l'équation (3.27). Alors que l'on ne dispose pas d'un analogue de la formule de Hamon pour le calcul de la capacité réelle. Nous nous limitons donc à la comparaison des mesures expérimentales à la formule paramétrique. La figure 62 est un exemple du résultat de la comparaison.

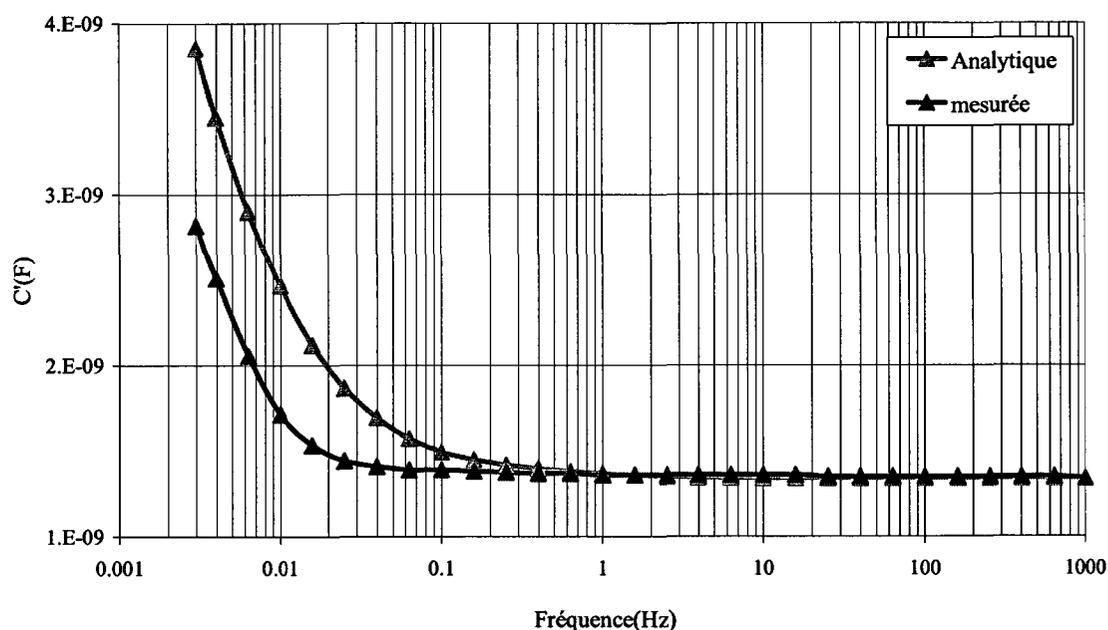


Figure 62 C' expérimentale et analytique pour une cuve sèche

3.9.6 Analyse

On peut voir au travers de cette comparaison que la transformé de Fourier de la courbe paramétrique est très semblable à la transformée de Hamon dans la plage de validité de cette dernière. De plus, elle offre une bonne approximation pour toutes les autres fréquences. Elle permet en outre de trouver aussi bien la capacité complexe que réelle. Ce qui nous porte à dire que la méthode analytique remplace avantageusement la

transformée de Hamon, lorsqu'on peut approcher la courbe expérimentale temporelle par une somme d'exponentielles décroissantes.

3.10 Résultats

3.10.1 Réalisation des objectifs

3.10.1.1 Relation entre vieillissement et la mesure diélectrique

Ce premier objectif a été atteint dans une certaine mesure. La figure 63 a) montrent la corrélation entre le degré de polymérisation et le courant de charge à 2 500 secondes. Une corrélation raisonnable existe, excepté pour les cuves humides (07, 08 et 09). Pour des raisons de clarté seulement quatre cuves ont été représentées. Une corrélation moindre existe aussi entre le degré de polymérisation et la tangente de l'angle des pertes mesuré à 0.003 Hz. Les tableaux V et VI donnent les coefficients de la corrélation obtenue et il apparaît clairement que les coefficients de régression dépendent de la cuve ce qui diminue la portée universelle de la relation.

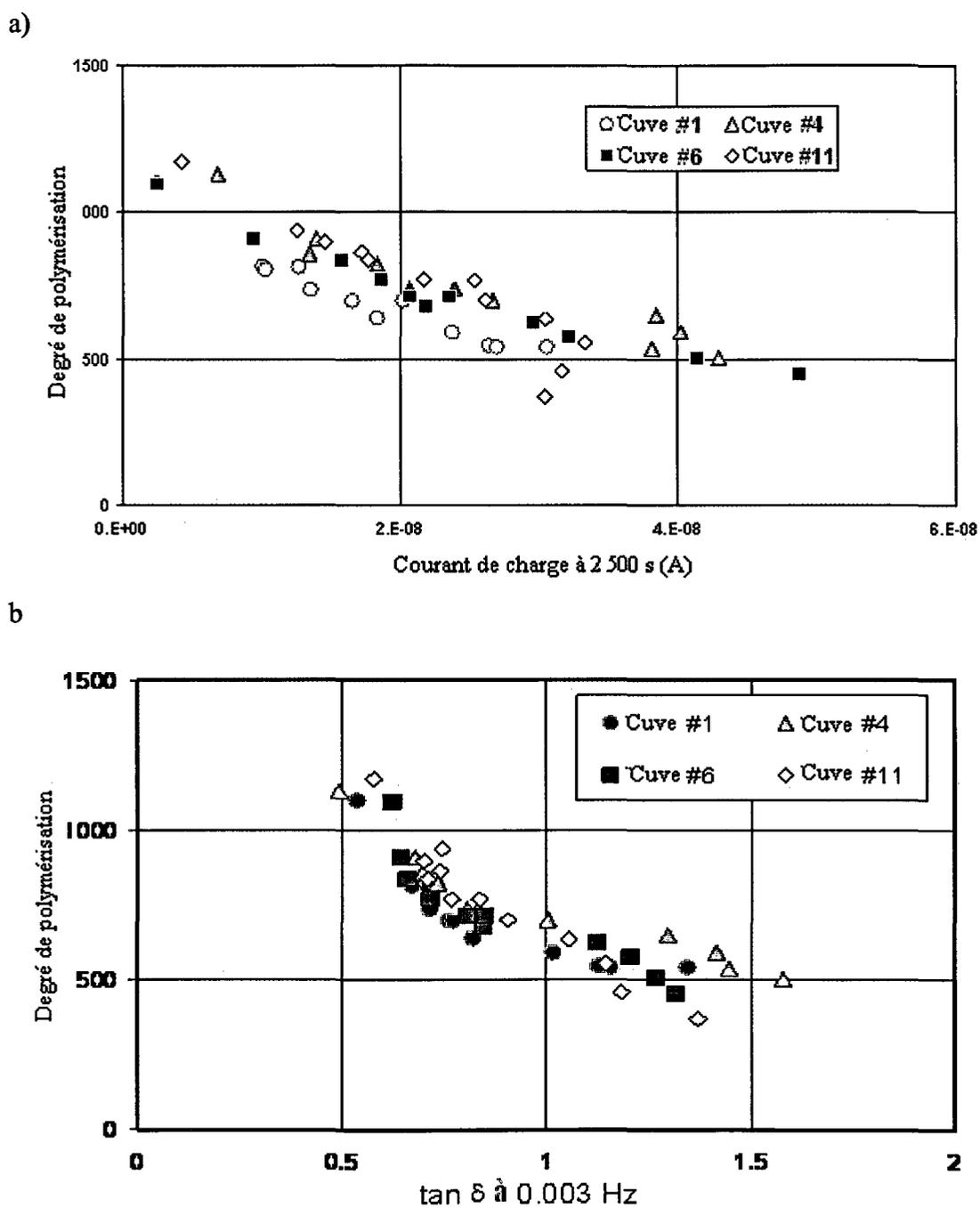


Figure 63 Corrélation entre le degré de polymérisation et a) le courant de charge à 2 500 s et b) Tangente δ à 0.003 Hz.

3.10.1.2 Indépendance vis-à-vis de la température

À partir des essais effectués à différentes températures, on a montré que les courbes fréquentielles obéissent à un comportement de type Arrhenius. Et de ce fait, la courbe maîtresse à une température de 25 °C, est déduite de la courbe mesurée à une température T par un déplacement en fréquence. Les expériences ont permis de lier le déplacement à la température via la relation suivante :

$$\ln(\text{deplac}) = \frac{11\,980}{T+273} - 40 \quad (3.32)$$

Les constantes 11.980 et 40 sont les constantes de régression pour la cuve 09 tirées du tableau X. La variable T désigne la température en degrés Celsius.

3.10.1.3 Indépendance vis-à-vis de l'humidité

La courbe isotherme à 58 °C mettant en relation l'humidité dans le papier versus l'humidité dans l'huile se rapproche de la courbe isotherme établie par Griffit et Christie. On a donc un moyen de déduire l'humidité du papier à partir de celle de l'huile lorsqu'on est à l'équilibre thermique.

3.10.1.4 Indépendance vis-à-vis de la géométrie

La capacité géométrique C_0 d'une cuve est obtenue par les relations suivantes :

$$\varepsilon'_{\text{papier}}(hf) = \varepsilon^*_{\text{papier}}(hf) = 4.5 + 75.5t_{\text{hum}} \quad (3.33)$$

$$\varepsilon'(hf) = \varepsilon^*(hf) = \frac{Y}{\varepsilon'_{\text{papier}}} + \frac{1-Y}{\frac{1-X}{2.2} + \frac{X}{\varepsilon'_{\text{papier}}}} \quad (3.34)$$

$$C_0 = \frac{C_{1000 \text{ Hz}}}{\varepsilon'} \quad (3.35)$$

où t_{hum} , désigne le taux d'humidité de la cuve et C_{1000hz} désigne la capacité mesurée à 1 000 Hertz.

On recommande de calculer la capacité géométrique avant la mise en service du transformateur et après la phase d'absorption de l'humidité de l'huile lors de la première mise en service.

3.10.2 Modèles

3.10.2.1 Circuits R en série avec (G//C)

Les courbes obtenues sont loin de décrire la réalité et ne permettent pas de modéliser adéquatement les mesures temporelles et fréquentielles. Néanmoins, un tel modèle permet de comprendre et d'analyser le comportement qualitatif de l'ensemble d'un transformateur au fur et à mesure que ses caractéristiques diélectriques changent.

3.10.2.2 Circuits RC en parallèle

Ce modèle s'est avéré d'un point de vue analytique pleinement adapté aux courbes expérimentales temporelles. Son taux d'ajustement peut atteindre des niveaux d'erreur aussi bas que 1.5 % et ce pour 98 % des courbes en notre possession soit environ 80 courbes. La procédure d'ajustement basée sur les techniques d'optimisation est facile à implémenter avec les outils dont nous disposons. La transformée de Fourier peut être obtenue analytiquement, et ce pour toute fréquence ce qui fait de cette méthode un excellent substitut à l'approximation de Hamon, lorsque les moyens techniques le

permettent. Ajoutons en outre que l'on peut ainsi obtenir la capacité réelle à partir des mesures temporelles.

3.10.2.3 Modèle XY

Dans ce modèle, les équations pour prendre en compte l'humidité et celles permettant le calcul de la capacité géométrique sont utilisées. La validation montre que les courbes issues du modèle et les courbes expérimentales sont assez proches. On en déduit aussi que les approximations et relations pour le calcul de l'influence de l'humidité sur le papier et le calcul de la capacité géométrique sont conséquentes.

3.10.3 Équivalence mesures temporelles et fréquentielles

La procédure a consisté à comparer la transformée de Hamon, la transformée de Fourier obtenues par calcul analytique et la courbe expérimentale. Cette approche a été étendue de manière exhaustive sur la totalité des mesures. Les figures 58, 59, 60 et 61 illustrent la qualité des résultats obtenus. On y voit clairement que la courbe analytique épouse parfaitement la courbe de la Transformée de Hamon et reste assez proche de la courbe expérimentale. Cette équivalence est une condition nécessaire pour affirmer le comportement linéaire des cuves.

3.11 Conclusion et perspectives

3.11.1 Les cuves sèches

De façon générale ces cuves se prêtent bien à la modélisation aussi bien analytique que par les modèles orientés physique. Les grandes lois qui régissent la température et la diffusion de l'humidité sont respectées dans leur ensemble. Quant à la corrélation entre

le degré de polymérisation et les grandeurs diélectriques, elle est claire. Cependant on note que toutes les relations obtenues dépendent de la cuve d'une façon que nous n'avons pu jusqu'ici élucider étant donné le peu de cuves dont nous disposions. La détermination de l'humidité reste une grande préoccupation, car elle intervient dans bon nombre de relations fondamentales.

3.11.2 Les cuves humides

Ces cuves présentent un côté erratique et aléatoire. Mis à part la loi sur la température, toutes les autres corrélations et relations ne sont pas vérifiées. En plus de cacher la plupart des indicateurs, l'humidité introduit une non linéarité décelable à travers la mauvaise adéquation de la transformation des données temporelles et des courbes fréquentielles. Cependant l'humidité excessive ne devrait pas poser de problème puisqu'un transformateur humide représente un potentiel immédiat d'incident et doit, de toute façon être l'objet d'une intervention.

3.11.3 Les Facteurs externes

Concernant la température, la loi d'Arrhenius permet de se ramener à une température de référence. La détermination et la prise en compte de l'humidité se font respectivement via l'utilisation des courbes isothermes et la loi des mélanges.

3.11.4 Les perspectives

Il ressort de la réalisation des objectifs, que pour les cuves sèches, on a pu établir une corrélation claire entre le vieillissement et les mesures diélectriques. Cette corrélation peut s'exprimer indépendamment de la température et de la géométrie. En transposant ces résultats pour des transformateurs réels, on aurait un moyen relativement simple pour obtenir une information quantitative assez fiable sur le degré de vieillissement de

l'isolation et la durée de vie résiduelle du transformateur. Cela peut constituer un élément important dans la prise de décision.

Cependant, les résultats obtenus souffrent de deux problèmes majeurs, leur non universalité et leur aspect statique. En effet, la relation entre le vieillissement et la réponse diélectrique est claire mais dépend de la cuve. De plus, il est nécessaire que le transformateur soit en équilibre thermique pendant toute la durée de la mesure qui peut durer quelques heures. D'où les deux axes d'amélioration suivants :

Le premier axe consiste à stabiliser les relations et résultats obtenus. Les actions à entreprendre à ce niveau sont :

- La poursuite des expériences de vieillissement dans l'optique d'obtenir des relations plus universelles.
- Étendre les expériences sur la température à d'autres cuves, pour valider de façon définitive la relation obtenue.
- Faire le relevé systématique de la quantité d'eau contenue dans l'huile pour vérifier le bien fondé de la méthode des courbes isothermes pour déduire l'humidité dans le papier.

Dans une seconde phase on s'intéressera à l'aspect dynamique pour se mettre dans les conditions existant réellement sur le terrain. En particulier, il s'agira de modéliser l'impact de la variation de température sur les mesures diélectriques.

Au niveau des modèles, le modèle XY représente un bon potentiel de diagnostic, malgré une modélisation très simple de la réponse diélectrique de l'huile et de l'interaction entre les différents constituants du transformateur.