

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D' INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : **Electrotechnique industrielle**

Présenté par
Juba CHELLI
Sofiane DELCI

Thème

EFFET DE LA FREQUENCE SUR LA PERMITTIVITE D'UN ISOLANT SOLIDE

Mémoire soutenu publiquement le 29/09/2016 devant le jury composé de :

Mr Mohammed IMACHE

Maître-Assistant classe A, UMMTO,

Président

Mr Mohammed MEGHERBI

Professeur, UMMTO,

Encadreur

Melle Rahma KACHENOURA

Maître de Conférences classe B, UMMTO,

Examinatrice

Mr M'hand MEKIOUS

Maître-Assistant classe A, UMMTO,,

Examineur



REMERCIEMENTS

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Mr Mohammed MEGHERBI, Professeur au sein de notre département, pour nous avoir guidés tout au long de notre travail, et prodigué conseils et encouragements.

Nos vifs remerciements vont également à

Melle R. KACHENOURA ainsi qu'à MM. M. MEKIOUS et M. IMACHE

qui ont accepté de juger notre travail en prenant part au jury de soutenance.

Nos remerciements vont aussi à toute l'équipe pédagogique et administrative de notre département.

Que tous ceux qui nous ont apporté de l'aide que ce soit sur le plan moral ou matériel trouvent ici l'expression de notre gratitude.



Dédicaces

A ceux qui nous ont tout donné sans rien exiger en retour

A ceux qui nous ont encouragés et soutenus dans les moments les plus durs et a
qui nous devons tant

A nos chers parents pour leur amour et leur support affectif

A nos frères et sœurs ainsi qu'à nos proches et tous nos amis

Nous dédions ce modeste travail

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités et rappels	3
Introduction.....	3
I. Les matériaux diélectriques.....	3
I.1 Caractéristiques principales des matériaux diélectriques	4
I.1.1 Rigidité diélectrique	4
I.1.2 Constante diélectrique.....	4
I.1.3 Condensateur plan	4
I.1.4 La susceptibilité électrique	7
I.2 Angle de pertes diélectriques.....	7
I.2.1 Circuit d'isolation en courant alternatif.....	7
I.2.2 Définition de l'angle de pertes diélectriques	8
I.3 Polarisation diélectrique	8
I.3.1 Moment électrique d'un dipôle	8
I.3.2 Description de la polarisation	9
I.3.3 Théorème de Gauss et vecteur déplacement.....	10
I.3.3.1 Charges fictives et charges réelles	11
I.3.3.2 Le théorème de Gauss en présence de matière.....	11
I.4 études des courants de conduction et de déplacement.....	13
I.4.1 Loi d'Ohm.....	13
I.4.2 Courant de déplacement.....	14
I.5 équations régissant les pertes diélectriques en alternatif.....	15
I.6 Les différents types de polarisation.....	16

I.6 .1 Polarisation électronique	16
I.6.2 Polarisation ionique.....	16
I.6.3 Polarisation dipolaire.....	17
I.7 Les condensateurs.....	18
I.7.1 Utilité des condensateurs	18
I.7.2 Capacité d'un condensateur.....	18
I.8 Capacité de quelque condensateurs simples	19
I.8.1 Capacité d'un condensateur sphérique	19
I.8.2 Condensateur cylindrique.....	20
I.9 Charge et décharge d'un condensateur	21
I.9.1 Courbe de charge.....	21
I.9.2 Courbe de décharge.....	22
I.10 Circuit RLC série	23
Conclusion.....	24
Chapitre II : les isolations imprégnées d'huiles minérales.....	25
Introduction.....	25
II.1 Papier et carton (Kraft)	25
II.1.1 Fabrication du papier et des cartons	26
II.1.2 Propriétés des papiers et cartons	26
II.1.2.1 Epaisseur, masse volumique	27
II.1.2.2 Hygroscopicité.....	27
II.1.2.3 Propriétés mécaniques	27
II.1.2.4 Propriétés diélectriques.....	27
II.1.2.5 Séchage des papiers et cartons	27

II.2 Huile minérales isolantes	28
II.2.1 Effet de la lumière	28
II.2.2 Résistance à température et à l'oxygène	28
II.3 Rigidité diélectrique	29
II.4 Propriétés électriques des papiers et cartons	29
II.4.1 Résistance sous un champ statique	30
II.4.2 Permittivité relative	30
II.4.3 Pertes diélectriques	30
II.4.4 Rigidité électrique	30
II.4.4.1 Rôle de décharge partielle	31
II.4.4.2 Influence de l'eau	31
II.5 Vieillessement thermique de l'isolation papier-huile	31
II.5.1 Vieillessement du papier	32
II.5.2 Vieillessement de l'huile minérale	32
II.5.3 Vieillessement du complexe papier-huile minérale	33
II.6 Lois de vieillessement	33
II.6.1 Loi de Montsinger	33
II.6.2 Loi de Dakin	33
II.6.3 Perte ou gain de durée de vie	34
Conclusion	34
Chapitre III : Résultats expérimentaux	35
Introduction	35
III.1 Description de l'expérience	35

III.2 Influence de la teneur en eau et de la fréquence sur la permittivité.....	39
III.3 Polarisation d'orientation	40
III.4 Approche du caractère polaire de la molécule d'eau	42
III.5 Rôle des diélectrique dans un condensateur.....	44
Conclusion	47
Conclusion générale	48
Références bibliographiques	49

Introduction générale

L'estimation de la durée de vie d'une isolation ainsi que la connaissance de l'état de cette isolation dans différents systèmes et appareillages est l'une des préoccupations majeures des ingénieurs et techniciens. Ce sont les résultats tirés des études scientifiques qui permettront aux personnes en charge de la mise en œuvre de ces systèmes de prévenir tout risque d'endommagement.

Cette recherche de connaissance passe par une appréciation la plus fine possible des matériaux constituant cette isolation et que l'on désigne sous le terme général de matériaux isolants ou matériaux diélectriques.

Les diagnostics concernant ces matériaux reposent sur leur réponse diélectrique à diverses sollicitations. Cette réponse peut se manifester par leur rigidité diélectrique traduisant leur aptitude à demeurer isolants même sous la contrainte des champs élevés, leur conductivité qui renseignera sur les échauffements induits par effet Joule, leur permittivité par laquelle nous pouvons apprécier la modération du champ électrique. La connaissance des pertes diélectriques, accessible à travers la tangente de l'angle de pertes δ est également importante du fait des pertes d'énergie occasionnées mais aussi des échauffements induits.

Le rôle assigné aux matériaux diélectriques dans le génie électrique, consiste à exercer une fonction d'isolation électrique entre pièces métalliques portées à des potentiels différents. Ces matériaux peuvent se présenter sous forme solide, liquide ou gazeuse. Outre ce rôle d'isolation, il arrive que l'on mette à profit une autre caractéristique de ces matériaux très utile pour le stockage de l'énergie. C'est le cas lors de l'utilisation de ces matériaux dans la confection des condensateurs dont on cherche à augmenter la capacité par des matériaux à haute permittivité.

L'état physique d'un matériau diélectrique est souvent affecté par le temps et les conditions climatiques dans lesquelles il évolue. C'est le phénomène dit de vieillissement. Le vieillissement des isolants est le résultat d'une détérioration

graduelle due à des réactions physico-chimiques pouvant avoir des effets négatifs indésirables autant la tenue mécanique que diélectrique du système d'isolation

Parmi les matériaux isolants utilisés en électrotechnique les papiers et les cartons occupent une place prépondérante, principalement dans l'isolation des transformateurs de puissance. Les performances du papier sont sensiblement améliorées par imprégnation d'huile minérale. L'imprégnation par un tel isolant liquide leur confère une rigidité diélectrique remarquable. Cette procédure d'imprégnation, devenue courante depuis le début du siècle dernier est toujours largement pratiquée de nos jours.

Dans le travail réalisé dans le cadre du présent mémoire, notre attention a été principalement dirigée vers l'effet de la fréquence sur des échantillons de papier ayant différents niveaux d'humidité. L'intérêt porté à la fréquence n'est pas fortuit mais relève du fait que la polarisation d'orientation en dépend fortement. Nous avons également examiné le comportement après imprégnation d'huile minérale. Dans le premier chapitre nous avons fait un rappel sur les diélectriques et les condensateurs et sur certaines lois élémentaires telles la loi d'Ohm ou celle relative aux pertes diélectriques. Nous avons également abordé le phénomène de polarisation diélectrique en expliquant succinctement les différents processus la gouvernant..

Dans le deuxième chapitre nous donnons des informations relatives aux caractéristiques de certains isolants comme les papiers, les huiles ou les complexes papier-huile largement utilisés dans les systèmes d'isolation électrique. On trouvera aussi des notions concernant les processus de vieillissement du complexe papier-huile.

Le troisième chapitre du mémoire est consacré à notre expérimentation. Nous y décrivons le dispositif expérimental mis au point. Notre étude expérimentale a été principalement axée sur l'évolution de la permittivité relative en fonction de la fréquence sur un échantillon de papier sec, puis imprégné d'huile et pour différentes teneurs en eau.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale où sont exposés les résultats de nos expériences.

Chapitre I

Généralités et rappels

Introduction

Un matériau diélectrique idéal est caractérisé par le fait que dans son état normal il ne peut conduire l'électricité. Cette propriété lui est conférée par l'absence d'électron de conduction en son sein. Nous pouvons formuler cela en disant que tous les électrons sont dans la bande de valence et que la bande de conduction est vide. Cependant sous l'action d'une contrainte extérieure (application d'un champ électrique très fort ou température élevée des électrons peuvent passer de la bande de valence vers la bande de conduction) un tel matériau peut acquérir des propriétés conductrices. Ce cas extrême ne nous intéresse pas dès lors qu'il correspond à un état anormal où le matériau est quasiment détruit.

I. Les matériaux diélectriques

Les matériaux diélectriques souvent désignés sous le nom de matériaux isolants revêtent une très grande importance dans le domaine de l'électrotechnique. Ils sont caractérisés par une résistivité électrique très élevée de l'ordre de 10^6 à 10^{16} $\Omega.m$. Cette grande résistivité est liée, comme déjà énoncé, au fait que ces matériaux ne possèdent pas d'électrons libres pouvant se mouvoir sous l'influence d'un champ électrique. Les deux termes diélectriques et isolants servent donc à désigner les mêmes matériaux, cependant lorsque nous nous intéressons au fait d'empêcher que des pièces métalliques portées à des potentiels différents ne se mettent en court circuit nous parlons de matériaux isolants. Par contre lorsque c'est la capacité des condensateurs qui nous intéresse alors nous préférons parler de matériaux diélectriques.

De tels matériaux trouvent leur utilité dans les réseaux électriques et en technique de la haute tension où le rôle principal qui leur est assigné consiste à éviter des courts circuits entre pièces conductrices portées à des potentiels différents ou entre ces pièces et la terre. Ils servent également à assurer la protection des personnes contre les chocs électriques. En plus de cette fonction d'isolation les matériaux diélectriques sont très utilisés dans l'industrie des condensateurs où la recherche de capacités toujours plus élevées est un enjeu économique très important.[1] Comme rôle accessoire les matériaux isolants sont souvent appelés à remplir la fonction de support mécanique.

I.1 Caractéristiques principales des matériaux diélectriques

Les principales grandeurs servant à caractériser les matériaux diélectriques sont :

- a) leur rigidité diélectrique
- b) leur constante diélectrique

I.1.1 Rigidité diélectrique.

La rigidité diélectrique représente la valeur maximale du champ appliqué à un diélectrique sans qu'un courant important ne le traverse. Lorsque cela se produit, nous parlons de rupture diélectrique. Le matériau n'assure plus la fonction qui lui est assignée. Cette rigidité diélectrique est généralement exprimée en kV/mm . [1]

I.1.2 Constante diélectrique

Cette grandeur est aussi appelée permittivité diélectrique absolue ou même pouvoir spécifique inducteur. Cette permittivité diélectrique caractérise les propriétés physiques au niveau macroscopique du milieu et peut, dans un premier temps, être donnée par le rapport de l'induction ou déplacement électrique au champ électrique influençant [1], soit :

$$\varepsilon = D/E \quad (1.1)$$

où :

D : Déplacement électrique aussi appelé induction électrique ou excitation électrique en (C/m^2) .

E : L'intensité du champ électrique en (V/m)

La permittivité est une propriété essentielle de l'électrostatique ainsi que de l'électrodynamique des milieux continus (milieux matériels). Comme la permittivité est un élément caractérisant les condensateurs et que ces derniers ont, lorsqu'ils sont parfaits, tendance à mettre les courants en quadrature avance sur les tensions, on donne souvent à cette grandeur une forme complexe. C'est une façon élégante et très utile de faire apparaître les pertes dans les diélectriques non parfaits.

I.1.3 condensateur plan

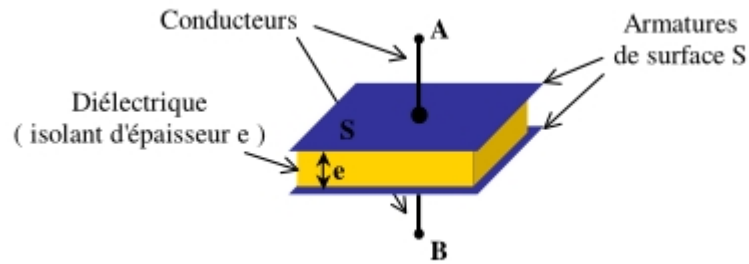


Figure 1.1 condensateur plan [3]

En introduisant un isolant entre les armatures d'un condensateur plan soumis à une tension continue V , à l'aide d'un galvanomètre intercalé dans le circuit on note la présence d'un courant de courte durée qui disparaît dès que cesse le déplacement de l'isolant, lorsque ce dernier est retiré du condensateur on constate à nouveau la circulation d'un courant mais de sens inverse. Sous l'action du champ électrique des charges apparaissent sur l'isolant, elles compensent en partie l'action des charges que portent les armatures du condensateur [4].

Pour que la tension entre les armatures reste inchangée, la source doit fournir la charge complémentaire égale aux charges produites sur le diélectrique, ceci explique la circulation d'un courant, qui traduit l'apparition de charge de polarisation.

Le phénomène de polarisation est caractérisé par l'apparition d'une mince couche de charge négative sur une face du matériau et d'une mince couche de charge positive sur l'autre face.

Par contre à l'intérieur du diélectrique il y a généralement compensation de charge de polarisation.

Après l'introduction du diélectrique entre les armatures du condensateur la capacité du système augmente.

Si C_0 est la capacité du condensateur placé dans le vide et C celle mesurée après l'introduction du matériau, on trouve rapport :

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (1.2)$$

Cette valeur ne possède pas d'unité est toujours supérieure à 1 puisque l'introduction du matériau donnera lieu à une polarisation se traduisant par une capacité augmentée.

$$\text{Avec } C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{e} \quad (1.3)$$

$$\text{Nous pouvons écrire } C = \varepsilon \frac{S}{e} \quad (1.4)$$

où :

S : est la surface des armatures en regard (m^2)

e : la distance séparant ces les armatures (m)

ε : la permittivité absolue du diélectrique dans l'espace entre les armatures (F/m)

ε_0 : une constante universelle appelée permittivité du vide égale à $\frac{1}{36\pi 10^9}$ (F/m)

ε_r est la permittivité relative (sans dimension), obtenue par division de ε par ε_0

La capacité d'un condensateur plan dépend donc de sa géométrie mais elle dépend aussi de la nature du diélectrique remplissant l'espace entre les armatures.

Nous aurons donc pour un condensateur plan:

- une capacité qui est proportionnelle a la surface des armatures.
- une capacité qui est inversement proportionnelle a l'épaisseur du diélectrique.
- une capacité dépendant de la nature du diélectrique caractérisé par un facteur noté ε et appelé permittivité du matériau.

Comme dans la majorité des ouvrages seule la permittivité relative est donnée on veillera à retourner à la permittivité absolue par:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (1.5)$$

I.1.4 La susceptibilité électrique

La susceptibilité absolue χ renseigne sur la tendance plus ou moins marquée d'un matériau à se polariser sous l'action d'un champ électrique selon

$\vec{P} = \chi \vec{E}$. La susceptibilité électrique relative χ_r se déduit par division par ε_0 , ce qui donne en fin de compte l'expression suivante :

$$\chi_r = (\varepsilon_r - 1) \quad (1.6)$$

L'expression de la polarisation se transforme alors en :

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi_r \vec{E} \quad (1.7)$$

où

\vec{P} est le vecteur polarisation (C/m^2).

et \vec{E} le champ électrique appliqué (V/m).

I.2 Angle de pertes diélectriques

I.2.1 Circuit d'isolation en courant alternatif

Lorsque nous utilisons un diélectrique réel nous devons tenir compte du fait que sa résistance n'est pas infinie. Cela va générer des pertes par effet Joule. Sur un autre plan lorsque nous avons des phénomènes de polarisations il y a nécessairement des pertes sous forme de chaleur. Nous arrivons donc à la conclusion que pour un diélectrique réel nous avons des pertes se manifestant par un dégagement de chaleur.

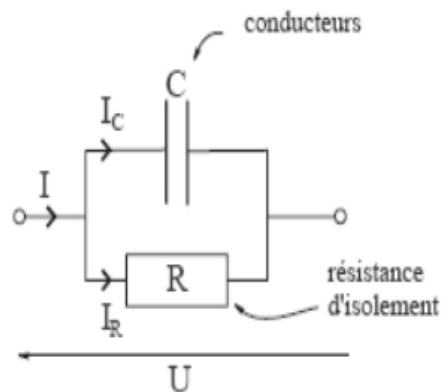


Figure 1.2 Circuit équivalent d'une isolation en courant alternatif [1]

Nous pouvons donc modéliser, comme sur la figure 2, un diélectrique réel comme un condensateur parfait C (résistance infinie et sans pertes) en parallèle avec une résistance R qui rendra compte des pertes mais aussi de l'écart à la quadrature. On peut tout aussi bien représenter le diélectrique réel en considérant un modèle avec une résistance en série. Le choix de l'un ou l'autre des modèles dépend de la gamme de fréquence considérée. Pour les basses fréquences (jusqu'à 1 kHz) le modèle en parallèle est le mieux adapté.

I.2.2 Définition de l'angle de pertes diélectriques

L'angle de pertes δ est défini comme étant l'angle complémentaire du déphasage φ entre la tension U et le courant [2]. Pour un diélectrique parfait ce déphasage serait de 90° alors que pour un diélectrique réel ce déphasage est toujours légèrement inférieur à cette valeur de la quantité δ .

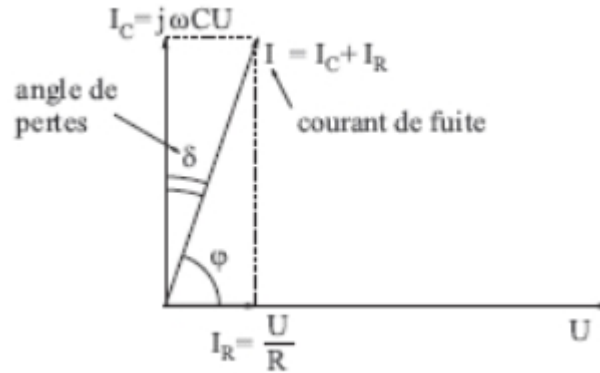


Figure 1.3 Représentation de l'angle de pertes diélectriques [1]

On a

$$\tan \varphi = \frac{CU\omega}{U/R} = RC\omega \quad (1.8)$$

$$\tan \delta = \frac{1}{\tan \varphi} = 1/RC\omega \quad (1.9)$$

Le terme $\tan \delta$ est appelé facteur de dissipation diélectrique. L'angle de pertes caractérise la qualité d'un isolant, un bon isolement sera caractérisé par une résistance R élevée et un angle δ petit. Dans le cas contraire l'isolation est considérée comme mauvaise [2] ; .

I.3 Polarisation diélectrique

I.3.1 Moment électrique d'un dipôle

Un dipôle électrostatique est formé de deux charges égales avec des signes opposés séparées par une distance a comme représenté sur la figure 4.

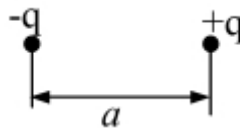


Figure 1.4 Représentation d'un dipôle [1]

Le dipôle électrostatique est caractérisé par son moment électrique $\vec{p} = q\vec{a}$ ce moment électrique est un vecteur orienté de la charge négative vers la charge positive. Dans la réalité la situation se présente sous une autre forme. En effet dans la nature la situation qui se rencontre consiste en des barycentres des charges de signes opposés qui ne

coïncident pas. Dans ce qui suit nous donnons une sommaire description des phénomènes de polarisation électrique.

I.3.2 Description de la polarisation

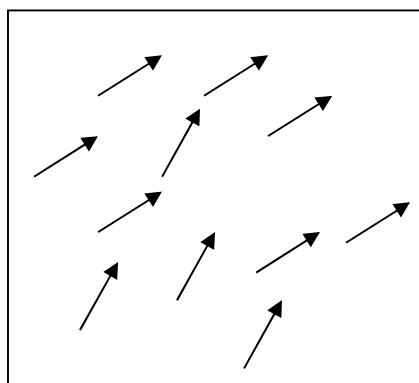
Lors de l'application d'un champ électrique sur un matériau diélectrique, les molécules ou atomes qui le constituent sont déformés de telle manière que les barycentres des charges positives et négatives ne coïncident plus. Il arrive cependant que cette situation se présente pour certaines molécules même en l'absence d'un champ électrique extérieur. Nous parlons alors de molécules polaires par opposition à celle qui ne présentent pas ces moments permanents que l'on appelle apolaires. A l'échelle macroscopique en l'absence d'un champ électrique le moment électrique résultant est nul du fait de la répartition aléatoire des dipôles. Lors de l'application d'un champ électrique à des molécules même apolaires, les barycentres des charges ne coïncideront plus et il apparaîtra des dipôles induits. C'est le principe de la polarisation électronique [1]



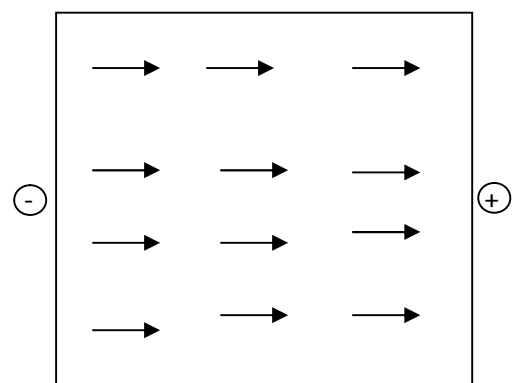
Pas de champ extérieur

Présence d'un champ extérieur

Figure 1.5 Schéma représentatif de la polarisation électronique



a) En l'absence de champ



b) En présence de champ

Figure 1.6 : Représentation schématique de la polarisation dipolaire

Lorsque nous sommes en face d'une substance polaire, nous constatons qu'en l'absence de champ électrique extérieur, les dipôles ont tendance à s'orienter de façon tout-à-fait aléatoire à cause de l'agitation thermique (Fig 1.6.a). L'application d'un champ électrique va se manifester par des couples tendant à orienter les dipôles dans la direction du champ. La figure 1.6.b donne une image de situation extrême jamais atteinte en pratique. Dans la réalité les effets antagonistes de l'agitation thermique et de l'énergie du champ conduira à un équilibre avec une orientation moyenne. Si chaque dipôle porte un moment électrique élémentaire, nous pouvons décrire la situation macroscopique d'un échantillon en définissant une densité volumique de moment dipolaire.

$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_i}{d\tau}$ les \vec{p}_i représentent les moments élémentaires et $d\tau$ l'élément de volume servant à définir la moyenne

Dans le cas où la substance considérée est linéaire, la polarisation est proportionnelle au champ électrique comme précédemment

$$\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E} \quad (1.10)$$

I.3.3 Théorème de Gauss et vecteur déplacement

S'il est un théorème qui revêt une importance considérable en électrostatique, et par voie de conséquence dans l'étude des diélectriques, c'est sans conteste le théorème de Gauss. Ce puissant outil permet de lier les effets créés par des charges sources à la densité de celles-ci. Sa formulation différentielle constitue l'une des équations de Maxwell, exprimant la divergence du champ en fonction de la densité de charge.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (1.11)$$

Nous remarquons qu'ici nous ne tenons aucunement du matériau, cette formule gagnerait à être généralisée pour tenir compte de la matière. Cela est rendu possible par l'introduction de la notion de vecteur déplacement électrique \vec{D} et celle de charges de polarisation (charges fictives ou charges liées)

I.3.3.1 Charges fictives et charges réelles.

a) Charges réelles

On appelle charges réelles des charges électrique pouvant se déplacer sur de grandes distances sous l'effet d'un champ électrique. A ce titre on leur donne également le

nom de charges libres. Elles participent donc à la conduction. Ces charges peuvent être des électrons ou des ions.

c) Charges liées

De telles charges ne peuvent pas se déplacer sur de grandes distances. Ce sont par exemples les charges électriques constituant un dipôle électrostatique. En effet dans un champ électrique uniforme un dipôle ne peut être soumis qu'à un couple tendant à l'orienter. Les charges sont dites liées dans ce cas. Si nous considérons un ensemble de dipôles la somme algébrique de toutes les charges est toujours nulle.

Examinons ce qui se passe lorsque nous appliquons un champ électrique à un échantillon macroscopique comme su la figure 4.b. Nous remarquons que bien que la somme des charges est rigoureusement nulle, l'échantillon vu de l'extérieur apparaît comme s'il était chargé avec une face positive (à droite) et une face négative. C'est le phénomène de polarisation qui fait apparaître ces charges fictives auxquelles est généralement donné le nom de charge de polarisation.

I.3.3.2 Le théorème de Gauss en présence de matière

En toute rigueur nous avons dans l'expression précédente la densité de charge qui représente la charge totale, c'est-à-dire les charges réelles ainsi que les charges de polarisation. La densité des charges de polarisation est donnée par :

$$\rho_{Pol} = -\nabla \cdot \vec{P} \quad (1.12)$$

Comme le vecteur déplacement est défini par :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (1.13)$$

Nous aurons

$$\nabla \cdot \vec{D} = \epsilon_0 \nabla \cdot \vec{E} + \nabla \cdot \vec{P} \quad (1.14)$$

C'est-à-dire

$$\nabla \cdot \vec{D} = \epsilon_0 \nabla \cdot \vec{E} + \nabla \cdot \vec{P} = \rho - \rho_{Pol} \quad (1.15)$$

Pour une polarisation uniforme $\rho_{Pol} = 0$

Et

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.16)$$

Qui est l'expression locale du théorème de Gauss en présence de matière.

I.3.3.2 Expression intégrale du théorème de Gauss

$$\iint \vec{D} \vec{S} = q \quad (1.17)$$

Cette formule n'est autre que la formulation intégrale du théorème de Gauss II en résultera une augmentation de \vec{D} à l'intérieur du diélectrique.[1]

La quantité q représente la charge réelle totale contenue dans le volume délimité par la surface S

Dans un diélectrique, on exprimera la relation entre la polarisation \vec{P} et le champ électrique imposé \vec{E} au moyen de la susceptibilité diélectrique relative du matériau, considéré homogène, linéaire et isotrope par [1]

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi_r \vec{E} \quad (1.18)$$

On exprimera le champ de déplacement \vec{D} en fonction du champ électrique par l'expression (1.19)[1].

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (1.19)$$

$$\varepsilon_r = \chi_r + 1 \quad (1.20)$$

De (1.18) et (1.20) on aura

$$\vec{P} = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \vec{E} \quad (1.21)$$

Au niveau microscopique, on représente le phénomène de polarisation par un ensemble de petits dipôles. [1]

Le vecteur macroscopique de polarisation \vec{P} est en fait la densité volumique des moments dipolaires microscopiques. [1]

I.4 Etudes des courants de conduction et de déplacement

I.4.1 Loi d'ohm

Le courant de conduction résulte du mouvement des charges qui se déplacent sur de grandes distances, depuis l'une des armatures vers l'autre.

La loi d'Ohm dans sa forme locale donne la relation entre le champ électrique appliqué et la densité de courant qui en résulte.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (1.22)$$

Considérons un volume élémentaire du diélectrique $ds dl$ soumis à une différence de potentiel V ; calculons l'intensité du courant correspondant Pour un circuit filiforme de section ds et de longueur dl

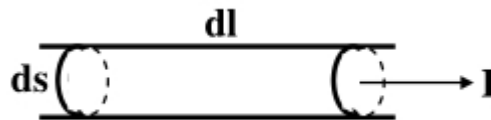


Figure 1.7 Représentation d'un tube de courant [1]

$$I = \vec{j} \cdot \vec{S} \quad (1.23)$$

Où

\vec{j} : est la densité du courant

$$V = E dl = J/\sigma dl = I/S \sigma dl = RI \quad (1.24)$$

Forme traditionnelle bien connue de la loi d'Ohm pour un circuit filiforme de résistance R

I.4.2 Courant de déplacement

Dans un diélectrique la loi de GAUSS se traduit par la relation (1.25) [1]

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (1.25)$$

Avec ρ densité volumique de charges.

Si le champ électrique dépend du temps, la relation précédente deviens

$$\vec{\nabla} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1.26)$$

Et en tenant compte de l'équation de continuité

$$\vec{\nabla} \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) = 0 \quad (1.27)$$

D'où

$$\oint_S \vec{\nabla} \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{s} = 0 \quad (1.28)$$

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ a la dimension d'une densité de courant, c'est la densité \vec{J}_D du courant de déplacement [1]

$$\vec{J}_D = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.29)$$

D'après Maxwell, toute variation du champ électrique doit provoquer l'apparition d'un champ magnétique, cela entraîne nécessairement la présence d'un courant électrique pour un diélectrique qui présente une polarisation \vec{P} , l'induction est donnée par la relation :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (1.30)$$

Dans ce cas la densité du courant s'écrit :

$$\vec{J}_D = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} \quad (1.31)$$

Avec

$\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ Densité du courant de déplacement dans le vide.

$\frac{\partial \vec{P}}{\partial t}$ Densité du courant de polarisation.

Le courant de polarisation correspond à la moyenne des courants microscopiques produits par de faibles déplacements relatifs des charges liées.

En effet, si divers porteurs de charges q_i présents dans un volume macroscopique avec un nombre N_i par unité de volume, sont animés d'une vitesse moyenne V_i telle que :

$$V_i = \frac{\partial \vec{l}_i}{\partial t} \quad (1.32)$$

Avec l_i déplacement moyen de q_i

Le courant de polarisation de densité \vec{J}_p est donné par :

$$\vec{J}_p = \sum_i N_i q_i V_i = \sum_i N_i q_i \frac{\partial \vec{l}_i}{\partial t} \quad (1.33)$$

Avec

$$\vec{P} = \sum_i N_i q_i \vec{l}_i \quad (1.34)$$

D'où

$$\vec{J}_p = \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} \quad (1.35)$$

I.5 Equation régissant les pertes diélectriques en alternatif :

On a défini la permittivité relative ϵ_r à partir de la proportionnalité entre le champ de déplacement \vec{D} et le champ électrique \vec{E} appliquée. [1]

Pour tenir compte de l'effet de retard du vecteur de polarisation \vec{P} sur le champ il est convenable de considérer la permittivité relative comme un nombre complexe s'exprimant par

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (1.36)$$

Dans un condensateur parfait, on obtiendrait un déphasage de 90° entre le courant I et la tension U_c , dans la pratique on constate que le déphasage entre I et U_c n'est pas exactement de 90° mais plutôt de $90^\circ - \delta$, [1]. Cet angle est apprécié par sa tangente donnée en fonction des permittivités réelle et imaginaire par :

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (1.37)$$

En termes de puissance cela signifie qu'en plus de la puissance réactive échangée entre la source alternative et le condensateur, il y a lieu de considérer une puissance active dissipée en chaleur. [1]

L'angle de perte δ tend à augmenter lorsque la fréquence augmente et on a habituellement $\varepsilon_r'' \ll \varepsilon_r'$ le calcul des pertes dans un isolant peut donc se calculer comme suit :

$$P_{diél} = U^2 \omega C \tan \delta \quad (1.38)$$

On doit utiliser un isolant possédant un paramètre $\tan \delta$ le plus faible possible.

I.6 Les différents types de polarisation

Dans ce qui précède nous avons rapidement évoqué le phénomène de polarisation dipolaire. Afin de compléter cet aspect nous nous proposons ici d'évoquer avec plus de détails les différents types de polarisation que l'on peut rencontrer.

I.6.1 Polarisation électronique

Le déplacement des électrons par rapport au noyau d'un atome fait apparaître une polarisation dont le temps d'établissement est très court $\approx 10^{-15}$ S

$$P_e = N \alpha_e E_l \quad (1.39)$$

α_e Est une constante dépendante du rayon de l'atome est qui est égale à $4\pi\varepsilon_0 r^3$

Pour un diélectrique neutre ou pratiquement non polaire, présentant ce type de polarisation, la relation de Maxwell $n = \sqrt{\varepsilon_r}$ entre l'indice de réfraction et la permittivité relative est vérifiée.[1]

I.6.2 Polarisation ionique

Il se produit un déplacement mutuel des ions constituant la molécule dans un temps de l'ordre de 10^{-13} S à 10^{-12} S. la relation de Maxwell n'est pas satisfaite. On a dans ce cas

$$P_i = N \alpha_i E_l \quad (1.40)$$

Ces deux polarisations électroniques et ioniques ne sont pratiquement pas affectées par la température.[1]

I.6.3 Polarisation dipolaire

Elle consiste dans l'orientation de molécules dipolaires sous l'action du champ électrique, elle dépend de la température et apparaît dans les gaz, les liquides et les corps amorphes très visqueux. [1]

Ce type de polarisation provoque une dissipation d'énergie pendant la relaxation.

Le temps de relaxation d'un dipôle tournant dans un liquide de viscosité dynamique est :

$$\tau = 4\pi \frac{\eta r^3}{KT} = \frac{3\eta V}{KT} \quad (1.41)$$

Où

r : rayon de la molécule

K : constante de Boltzmann

V : volume de la molécule

La polarisation dipolaire P_d :

$$P_d = N\alpha_d E_d \quad (1.42)$$

$$\alpha_d = \frac{p^2}{3KT} \quad (1.43)$$

Où

p est le moment dipolaire de la molécule.

I.7 Les condensateurs

Un condensateur est constitué de deux conducteurs placés à proximité l'un de l'autre, mais sans qu'il n'y ait contact entre eux, il a la propriété de pouvoir stocker de l'énergie électrique, ce qui distingue le condensateur d'une source d'énergie électrique est le fait qu'il peut libérer son énergie électrique quasiment instantanément.

I.7.1 Utilité des condensateurs

Les condensateurs sont utilisés dans des situations où l'on a besoin d'une importante énergie électrique, pendant un bref intervalle de temps. C'est pourquoi on les utilise dans les flashes électroniques.

Comme la charge et décharge d'un condensateur prennent un certain temps, on peut les utiliser pour commander un circuit avec un certain retard. Les condensateurs peuvent être utilisés pour bloquer le passage d'un courant continu. Cependant un courant

alternatif passe à travers un condensateur, et c'est en courant alternatif que les applications sont les plus nombreuses, leurs impédance dépendant de la fréquence, on les utilise comme filtres (filtre passe-bas, filtre passe haut).

I.7.2 Capacité d'un condensateur

Un condensateur est formé de deux conducteurs en influence totale. Les deux conducteurs sont appelés armatures du condensateur.[3]

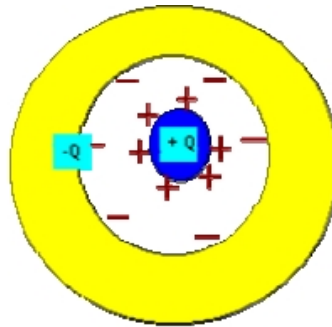


Figure 1.8 Condensateurs [3]

Soient V_1 et V_2 les potentiels respectifs des armatures interne et externe. On appelle charge du condensateur, la charge Q de son armature interne.

$$C = \frac{Q}{V_1 - V_2} \quad (1.44)$$

Où

C est la capacité en farad(F)

Q en coulomb(C)

V_1, V_2 En volt (V)

I.8 Capacité de quelques condensateurs simple

Pour obtenir la capacité C d'un condensateur, il faut calculer la relation entre sa charge Q et sa tension U , c'est-à-dire

$$U = V_1 - V_2 = \int_1^2 \vec{E} \cdot \vec{dl} = \frac{Q}{C} \quad (1.45)$$

Autrement dit, il faut être capable de calculer la circulation du champ électrostatique entre les deux armatures ainsi que la charge Q . [5]

I.8.1 Capacité d'un condensateur sphérique

Soit un condensateur constitué de deux armatures sphériques de même centre O , de rayons respectifs R_1 et R_2 séparées par un vide ($R_2 > R_1$).

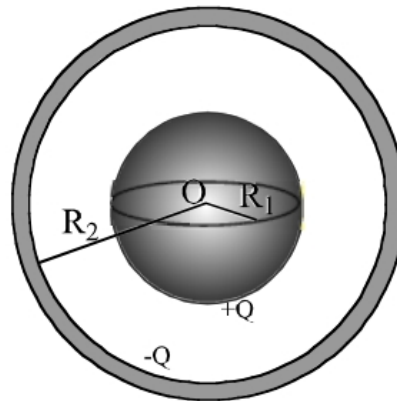


Figure 1.9 condensateurs sphériques [5]

D'après le théorème de Gauss, le champ électrostatique en un point M situé à un rayon r entre les deux armatures vaut [5]

$$\vec{E}(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}_r \quad (1.46)$$

En coordonnées sphériques, ce qui donne une tension

$$U = V_1 - V_2 = \int_1^2 \vec{E} \cdot \vec{dr} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (1.47)$$

Et fournit donc une capacité totale

$$C = \frac{Q}{U} = 4\pi\epsilon_0 \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} \quad (1.48)$$

I.8.2 Condensateur cylindrique

Soit un condensateur constitué de deux armatures cylindriques coaxiales de longueur infinie, de rayons R_1 et R_2 , séparées par un vide $R_2 > R_1$. Soit λ la charge par unité de longueur du cylindre intérieur.

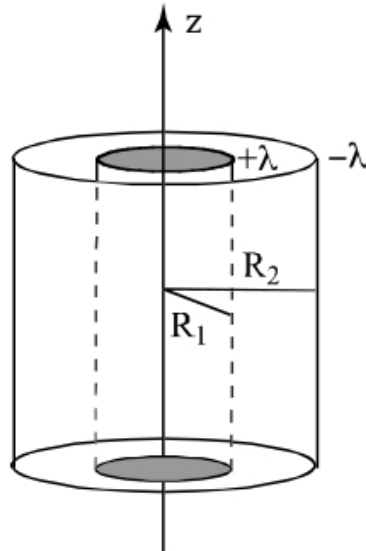


Figure 1.10 condensateurs cylindriques [5]

D'après le théorème de Gauss, le champ électrostatique entre les deux armatures s'écrit[5]

$$\vec{E}(\rho) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0\rho} \vec{U}_\rho \quad (1.49)$$

En coordonnées cylindriques, ce qui donne une tension

$$U = V_1 - V_2 = \int_1^2 \vec{E} \cdot \vec{d\rho} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (1.50)$$

Et une capacité par unité de longueur

$$C = \frac{\lambda}{U} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (1.51)$$

On définit ρ comme étant la densité volumique de charges son unité $C.m^{-3}$

$$\rho = \frac{dq}{dv} \quad (1.52)$$

I.9 Charge et décharge d'un condensateur

Il s'agit ici de charger ou de décharger un condensateur avec une source de tension et à travers une résistance. C'est la durée de charge ou de décharge qui permet de réaliser une "temporisation". [6]

I.9.1 Courbe de charge

Soit la figure suivante

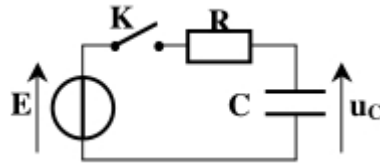


Figure 1.11 Charge d'un condensateur avec tension E et résistance R [3]

À l'instant $t = 0$, le condensateur est déchargé et on ferme l'interrupteur K .

La tension aux bornes du condensateur:

$$U_c(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1.53)$$

Avec $\tau = RC$

Où

τ en (S), R en (Ω) et C en (F)

La courbe de charge d'un condensateur est comme suit

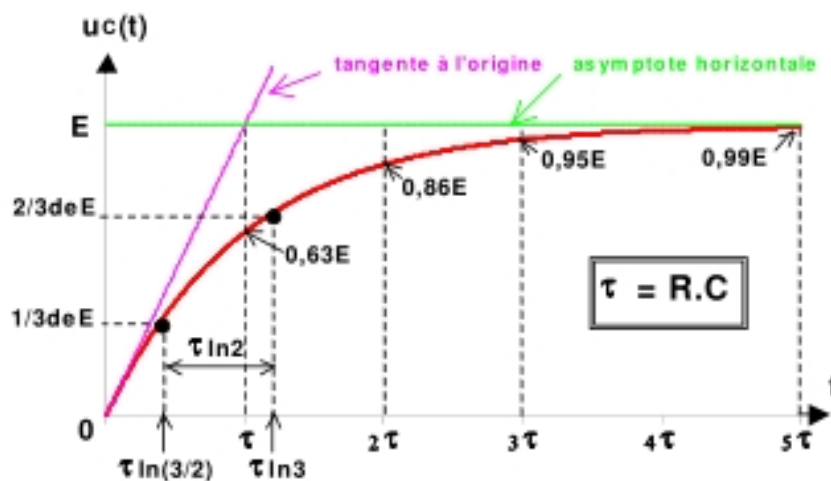


Figure 1.12 Courbe de Charge d'un condensateur avec tension E et résistance R [3]

La courbe $U_c(t)$ possède les propriétés ci-dessous :

à l'instant $t = \tau$, le condensateur est chargé à 63% ($U_c(\tau) = 0,63E$).

aux instants $t = 2\tau, 3\tau$ et 5τ le condensateur est chargé à 86%, 95% et 99%.

Le temps pour passer de 0 à 1/3 de E est: $t = \tau \ln(3/2) \approx 0,405\tau$

Le temps pour passer de 0 à 2/3 de E est: $t = \tau \ln 3 \approx 1,10\tau$

Le temps pour passer de 1/3 à 2/3 de E est : $t = \tau \ln 2 \approx 0,693\tau$

I.9.2 Courbe de décharge

Soit la figure suivante

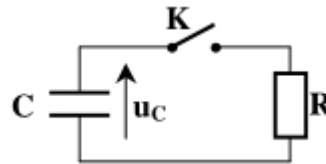


Figure 1.13 Décharge d'un condensateur à travers une résistance [3]

Supposons que le condensateur soit initialement chargé avec la tension $U_c(0) = E$.

A l'instant $t = 0$, l'interrupteur K est fermé.[6]

La tension aux bornes du condensateur et

$$U_c(t) = E e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.54)$$

Avec $\tau = RC$

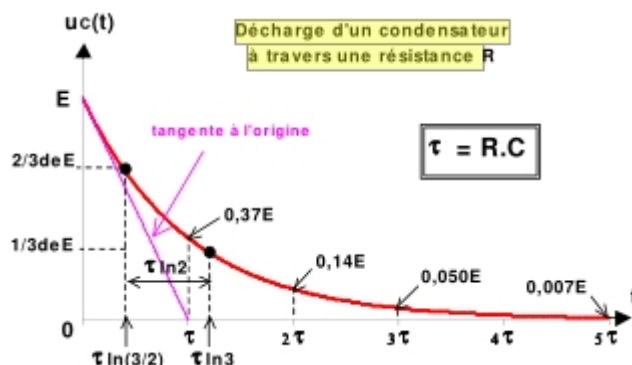


Figure 1.14 courbe de décharge a travers une résistance [3]

La courbe $U_c(t)$ possède les propriétés ci-dessous

l'asymptote horizontale coupe la tangente à l'origine à l'instant $t = \tau = R.C$

à l'instant $= \tau$, le condensateur n'est plus chargé qu'à 37% ($U_c(\tau) = 0,37E$).

aux instants $= 2\tau$, 3τ et 5τ le condensateur n'est plus chargé qu'à 14%, 5% et 0,7%.

le temps pour passer de E à $2/3$ de E est : $t = \tau \ln(3/2) \approx 0,405\tau$.

le temps pour passer de E à $1/3$ de E est : $t = \tau \ln 3 \approx 1,10\tau$.

le temps pour passer de $2/3$ à $1/3$ de E est : $t = \tau \ln 2 \approx 0,693\tau$.

I.12 Circuit RLC série

On considère le circuit RLC série suivant excité par une sinusoïdale

$$e_g = E_{gm} \sin 2\pi f t \quad (1.55)$$

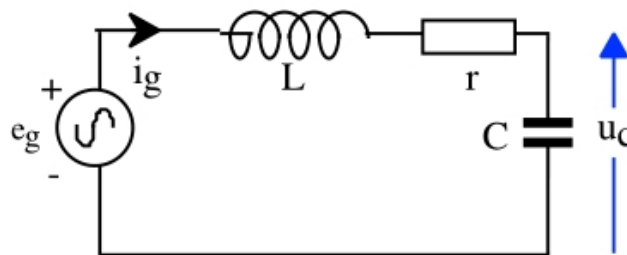


Figure 1.15 circuit RLC série [3]

On définit

a) L'impédance de montage $\bar{z} = r + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})$ (1.56)

b) La fréquence de résonance $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (1.57)

On appelle la fréquence de résonance f_0 la fréquence pour laquelle la partie imaginaire de l'impédance de montage \bar{z} est nulle $LC\omega_0 = 1$

Conclusion

Les fournisseurs de matériaux et les fabricants de condensateurs procèdent à la mesure de nombreuses propriétés et à divers essais de sélection ou de réception. La connaissance de certaines caractéristiques est indispensable pour concevoir le condensateur et sa tenue en fonctionnement.

Chapitre II

Les isolations imprégnées d'huiles minérales

Introduction

Les papiers et les cartons restent des matériaux de choix pour l'isolation, l'imprégnation par un isolant liquide essentiellement les huiles minérales, leur confère une rigidité diélectrique remarquable.

Des produits très élaborés sont disponibles : papier parchemin, papier à base de carton, de chanvre ou même d'amiante.

Pour imprégner ces isolants solides, les huiles végétales (lin-coton), la paraffine, les huiles de résine ont cédé rapidement la place aux huiles minérales irremplaçables en haute tension. Pour la moyenne tension. L'huile de ricin (castor oil) reste appréciée dans le domaine des condensateurs utilisés pour le stockage d'énergie. Dans les câbles des huiles minérales et des matières stabilisées à base de poly butylènes sont largement utilisées. Les papiers et les cartons imprégnés avec des huiles minérales restent bien implantés dans le secteur HT et MT, l'étude de leur mécanisme de dégradation et vieillissement présente donc un grand intérêt.

Dans ce chapitre, nous présentons des rappels sur les caractéristiques ainsi que les propriétés des papiers et des huiles utilisés dans l'industrie électriques.

II.1 Papier et carton (Kraft) :

La matière première est une pâte de bois, obtenue à partir de résineux (pin, sapin) par le procédé au sulfate, avec laquelle on peut fabriquer une feuille de papier dont les pertes diélectriques sont réduites, mais d'autres pâtes par exemple, celles à base de chanvre de Manille généralement mélangé à une pâte de bois. Ce chanvre dont les fibres ont des dimensions optimales (longueur moyenne de 6 à 7 mm et diamètre 18 à 24 μm) permet la fabrication d'un papier possédant de très bonnes propriétés mécaniques. [2]

Type de papier	manille	Kraft	Kraft acétylé
Longueur a la rupture (m)	14000	10000	85000
Allongement a la rupture	2.5 %	3 %	
Indice de déchirement (mN/gm^2)	90	80	30
Résistance au pliage	500	1000	1000

Tableau 2.1 : caractéristiques mécaniques du papier isolant [2]

II .1.1 Fabrication du papier et des cartons :

La feuille est constituée par un enchevêtrement de fibres de cellulose. Avant de décrire la structure des fibres, énumérons les différents traitements chimiques de bois, par exemple, élimination des matières non cellulosiques et enrichissement de la pâte en cellulose, c'est à dire augmentation du degré de polymérisation. Ensuite cette pate , composé essentiellement de cellulose à faible teneur en lignine et hémi-cellulose, est soumise à un raffinage soigneusement contrôlé . La formation de la feuille de papier est une opération délicate : elle dépend des liaisons qui s'établissent entre les fibrilles. Plus le raffinage est poussé, plus leur surface de contact augmente. [2]

Les fibres sont formées essentiellement par des chaines de cellulose qui peuvent être disposées d'une manière compacte et ordonnée, il s'agit de la cellulose cristalline, mais il existe également une cellulose fortement désorienté ou amorphe.

II.1.2 Propriété des papiers et cartons :

Parmi les principales caractéristiques d'un papier ou d'un carton on peut distinguer :

- L'épaisseur
- La masse volumique et la perméabilité à l'air
- L'hygroscopicités
- Les propriétés mécaniques, diélectriques et thermiques

II.1.2.1 Epaisseur, masse volumique :

Une meilleure rigidité diélectrique est obtenue en réalisant une isolation constituée par la superposition de plusieurs couches de papier plus épais. La masse volumique, de même que la perméabilité à l'air sont des caractéristiques importantes dans la mesure où le papier imprégné doit assurer une bonne tenue en chocs. [2]

II.1.2.2 Hygroscopicité :

Au contact d'une atmosphère dont la température et l'humidité sont contrôlées, la teneur en eau de papier dépend de la température et de la pression partielle de vapeur d'air. Les caractéristiques dimensionnelles d'un papier varient avec sa teneur en eau : un papier se contracte en séchant alors qu'il se dilate suite à une absorption. De même la résistance à la traction augmente avec l'humidité pour atteindre une valeur optimale pour une tenue en eau de 5% environ.

II.1.2.3 Propriétés mécaniques :

On exige des papiers et cartons de bonnes propriétés mécaniques pendant aussi bien durant la mise en œuvre qu'en service. Ces propriétés sont la résistance à la traction et allongement à la rupture, la résistance à la flexion et à l'éclatement. Pour les cartons la résistance à la compression est également considérée comme une caractéristique importante. [2]

II.1.2.4 Propriétés diélectriques :

Sous de faibles contraintes électriques, un condensateur au papier non imprégné peut être considéré comme l'association en série de deux condensateurs dont les diélectriques sont respectivement la cellulose et l'air. Par conséquent la permittivité relative et le facteur de dissipation diélectrique dépendent de la masse volumique.[2]

II.1.2.5 Séchage des papiers et cartons :

Les molécules d'eau adhèrent fortement aux chaînes de cellulose, pour briser les liaisons existantes entre l'eau et la cellulose, il faut maintenir les papiers sous vide à haute température (130 C° à 170 C°) pendant plusieurs heures. Lorsque la teneur en humidité du papier ou des cartons est très élevée (>11%), les molécules d'eau peuvent se condenser et former des « clusters » dans les microcavités de la feuille. [2]

II.2 Huiles minérales isolantes :

Les bruts « naphthéniques » sont bien adaptés à la production des huiles minérales isolantes, ils présentent deux caractéristiques importantes : un bas point d'écoulement et une faible teneur en soufre, mais les pétroliers proposent des huiles minérales obtenues à partir d'une distillation fractionnée de brut paraffiné, les distillats possèdent les propriétés physiques voulues (viscosité, point d'inflammation, point d'écoulement). [2]

Les deux types d'huile sont à base de mélanges d'hydrocarbures paraffiniques, naphthéniques ou aromatiques. La teneur en hydrocarbure paraffinique étant généralement plus forte dans les huiles paraffiniques que dans les huiles naphthéniques.

Un raffinage contrôlé des distillats, traitement à l'acide sulfurique, extraction par solvant, mais surtout hydrogénation permet d'éliminer les composés indésirables, tout en conservant certaines molécules, en particulier les composés aromatiques soufrés, qui sont des inhibiteurs d'oxydation naturels. Ce raffinage permet une optimisation du taux de composés aromatiques conférant à l'huile isolante une meilleure résistance aux décharges partielles et une bonne résistivité à l'oxydation avec des propriétés diélectriques acceptables. [2]

II.2.1 Effet de la lumière :

Les huiles minérales peuvent être exposées à la lumière lorsque certains matériels électriques, par exemple des disjoncteurs HT sont munis de verrines transparentes indiquant le niveau du liquide.

La photo-oxydation des huiles minérales provoque la dégradation rapide, un changement de couleur de l'huile, l'apparition des premiers dépôts colloïdaux, une forte augmentation de l'indice de soufre corrosif de l'huile. [2]

II.2.2 Résistance à la température et à l'oxygène :

Il est important de limiter, voire même supprimer la pénétration de l'air dans une isolation imprégnée afin de réduire la vitesse des réactions d'oxydation de l'huile minérale, qui augmente avec la température et la présence de certains métaux tels que le cuivre et le fer.

La résistance à l'oxydation peut être améliorée par l'addition d'inhibiteurs qui prolongent la période de l'incubation pendant laquelle les préoxydes ne sont pas présents dans l'huile. Les inhibiteurs bloquent les réactions d'oxydation et évitent la formation d'acides et de composés polaires dont certains sont susceptibles de dégrader d'une manière irréversible l'huile minérale.[2]

II.3 Rigidité diélectrique :

a) Cas de la fréquence industrielle :

Si les particules conductrices, les fibres de cellulose, l'eau, les gaz dissous sont éliminés, la rigidité diélectrique d'une huile minérale peut augmenter de 50 % à 60 % par rapport à son état de livraison.

La valeur du champ disruptif d'une huile minérale varie en sens inverse de la distance entre les électrodes et de la surface des électrodes. [2]

b) Cas du choc de foudre:

Pour les liquides et en particulier les huiles minérales la rigidité diélectrique peut être évaluée en suivant les recommandations de la CEI 60 897(1987). J. Perret (1981) a indiqué qu'après un vieillissement thermique prolongé (1000heurs) la rigidité diélectrique en onde de choc négative pouvait diminuer d'environ 20%. On peut constater quelle dépend fortement de la nature des constituants de l'huile. La tension de rupture en choc positif est généralement plus basse que celle en choc négatif, sans dépendre significativement du liquide. [2]

II.4 Propriétés électriques des papiers et cartons imprégnés :

Pour plusieurs auteurs, la conduction ionique est prépondérante dans un papier ou carton soumis à une tension continu, elle dépend de l'eau fixée sur les molécules de cellulose (E.J. Murphy 1960). L'eau peut favoriser également la dissolution des impuretés ioniques présentes dans le papier et dans l'huile minérale [2]

La résistance volumique de la cellulose imprégnée d'huile minérale diminue avec la température. Selon la contrainte électrique, différents mécanismes de conduction peuvent être impliqués : dissociation d'ions sous champ électrique, décharges partielles.

La répartition des contraintes sur le carton et sur l'huile dépend de leur résistance volumique R_c et R_h , pour un carton imprégné d'huile minérale on a :

$$\frac{Eh}{Ec} = \frac{Rh}{Rc} \quad (2.1)$$

à 25°C le rapport des résistances volumique est voisin de 0.05.

II.4.1 Résistance sous un champ statique :

La résistivité ρ est fonction de la température et de champ électrique, on peut représenter la variation de ρ par la relation suivante :

$$\rho = \rho_0 \exp(-a\theta) \exp(-bE). \quad (2.2)$$

ρ_0 : Résistivité à 0°C et un champ nul

θ : Température

E : Champ électrique (kV/mm).

a et b respectivement coefficients de température et de champ électrique

P. Hessen et W. Lampe (1970) indiquent que pour un taux d'humidité augmentant de 1 à 1,5% ρ décroît d'une puissance de 10, ils observent également que pour des champs supérieurs ou égaux à 2kV /mm la résistivité atteint une valeur constante dans un temps n'excédant pas 1 min, entre 20 et 90°C et pour un taux d'humidité compris entre 0.1 et 5%. [2]

II.4.2 Permittivité relative :

Elle varie avec la densité du papier et avec la permittivité du liquide d'imprégnation, F. Liebscher et W. Held (1986) ont calculé la permittivité relative de la cellulose obtenue par plusieurs laboratoires et ont remarqué que le coefficient de température peut s'annuler si l'on choisit convenablement la densité de papier. [2]

II.4.3 Pertes diélectriques :

Les pertes diélectriques dépendent de nombreux facteurs : nature de la pâte de papier, traitement chimique et raffinage de la pâte à papier, densité de papier, pureté de l'eau utilisée lors de la fabrication du papier, contamination du papier et de l'imprégnant, présence d'humidité.

On peut facilement mettre en évidence le fait qu'une isolation est contaminée par des impuretés ioniques en effectuant une détermination de $\tan \delta$ en fonction de la température ou de la tension. L'effet de la tension sur les pertes est bien connu sous le nom d'effet Garton (1941). [2]

II.4.4 Rigidité diélectrique :

La rigidité diélectrique des papiers imprégnés dépend de nombreux facteurs : densité, épaisseur, impureté, (ions répartis dans le volume, pont conducteur, eau). La rigidité

diélectrique décroît généralement lorsqu'on augmente l'épaisseur et la densité, contrairement au comportement généralement observé avec un matériau isolant homogène. [2]

II.4.4.1 Rôle de décharges partielles :

Des décharges partielles et des claquages prennent naissance dans l'huile pour des contraintes électriques 1.7 à 2 fois plus importantes que dans un papier «Kraft» L'augmentation de la densité du papier a pour effet de transférer une plus grande fraction de la contrainte électrique sur l'huile. La nature de l'imprégnant influe également sur la permittivité du complexe papier/huile. Plus les permittivités sont voisines, mieux seront répartis les contraintes électriques sur les divers composants de l'isolation.

II.4.4.2 Influence de l'eau :

Avertis des risques que la présence d'eau dans l'isolation peut faire courir aux matériels électriques, les constructeurs n'ont pas cessé d'améliorer les procédés du séchage et d'imprégnation pour amener la teneur en humidité des papiers à des valeurs de l'ordre de 0.3 à 0.5% .D'autre part, durant l'exploitation, il est mis en œuvre des dispositifs permettant de réduire la pénétration de l'eau.

Selon l'auteur P.Kogan (1963), la présence d'eau à des teneurs dépassant 4.5% dans les papiers imprégnés à l'huile minérale qui sont soumis à des contraintes électriques de 90kV/mm provoque un phénomène de dégradation à partir d'une température de 65°C. Mais auparavant Z.Krasucki, H.F.Church et C.G. Garton (1960) avaient admis qu'il se produit une électrolyse de l'eau avec la formation de gaz lesquels favorisent l'apparition de décharges partielles pouvant mener à un claquage. [2]

II.5 Vieillessement thermique de l'isolation papier-huile :

On considère seulement le vieillissement de l'isolation papier-huile minérale, à l'exclusion des effets dus à des décharges partielles, à des amorçages, ou à une dégradation anormale de l'huile.

Il est généralement admis que la durée de vie de l'isolation papier-huile dépend essentiellement de l'affaiblissement des caractéristiques mécaniques des papiers et non de la dégradation des propriétés diélectriques de l'huile. Dans un transformateur, si d'autres causes de défaillance n'apparaissent pas, la fragilisation du papier risque d'entraîner le claquage sous l'effet de court-circuit ou de chocs électriques. Dans ces conditions l'espérance de vie minimale est définie par le fait que la dégradation du papier atteint une limite. Cependant, la durée de vie effective est statistiquement

supérieure, car une contrainte mécanique entraînant le claquage peut survenir plus ou moins longtemps après que le vieillissement limite de papier à été atteint.

II.5.1 Vieillissement du papier

Le papier, habituellement utilisé dans les isolations papier-huile, est composé en majorité de cellulose : cette dernière est formée de longues chaînes comprenant environ 120 anneaux de glucose reliés par des ponts «oxygène ». Selon la température atteinte, il peut se produire :

La pyrolyse entraîne la décomposition de la cellulose, avec production de CO₂, CO, H₂O et H₂ principalement. Le phénomène de pyrolyse n'affecte sensiblement les qualités mécaniques qu'on dessus de 150°C [2].

L'oxydation qui consiste dans l'attaque des anneaux de glucose par l'oxygène provoque une dépolymérisation. Les produits formés sont des aldéhydes et des acides, mais aussi les gaz tels que CO, CO₂, H₂O, H₂.

L'hydrolyse qui est la réaction de l'eau avec les ponts oxygène provoque quant à elle la rupture de chaînes sans formation de produits libres. L'eau formée par la pyrolyse et l'oxydation contribue à augmenter l'hydrolyse.

II.5.2 Vieillissement de l'huile minérale :

La décomposition purement thermique de l'huile minérale en l'absence d'oxygène et d'eau est appréciable seulement vers 300°C [2].

En présence d'oxygène, il se produit une oxydation qui comporte un certain nombre d'étapes (initiation, propagation, terminaison).

Les produits finaux résultant de l'oxydation sont des alcools, des aldéhydes, des cétones, des esters, des acides, H₂O, CO, CO₂, et des hydrocarbures légers. L'oxydation de l'huile est un phénomène auto catalytique qui peut se poursuivre même en l'absence d'oxygène.

II.5.3 Vieillissement de complexe papier-huile minérale :

Les phénomènes de vieillissement de chaque composant reste les mêmes, mais on constate en particulier que les produits d'oxydation de l'huile contribuent au vieillissement de papier soit par augmentation de l'hygroscopicité de l'huile : par exemple la dégradation du papier peut être 10 fois plus rapide dans l'huile que dans un diélectrique chloré qui ne s'oxyde pas.

II.6 Lois de vieillissement :

Plusieurs lois permettant d'évaluer le vieillissement du complexe papier-huile en fonction de la température.

II.6.1 Lois de Montsinger :

On rappelle que la loi de Montsinger (1930) est de la forme suivante :

$$L = C \exp \left[-\frac{\ln(2)}{\Delta\theta} \theta \right] \quad (2.3)$$

Où

L : étant la durée de vie.

θ : La température en °C.

$\Delta\theta$: L'écart de température correspondant au doublement ou à la réduction de moitié de la durée de vie, il est égal à 6°C dans la publication 354 de CEI.

II.6.2 Loi de Dakin :

D'après les travaux du LCIE, si on prend comme paramètre caractéristique du vieillissement, un facteur de dégradation $\eta = 1000[(1/D) - (1/D_0)]$, ce facteur correspond au nombre de scissions par quantité de cellulose équivalente à 1000 anneaux de glucose pour faire passer le degré de polymérisation de D_0 à D_1 . Ce facteur, après une période initiale à variation rapide varie linéairement avec le temps. Par suite, si on prend une valeur limite f , la durée de vie a pour expression :

$$\log L = \log (\eta_f - \eta_0) - A \log (e) + [B \log(e)]/T = a + (b/T) \quad (2.4)$$

η_0 : étant l'ordonnée à l'origine résultant de la période initiale.

II.6.3 Perte ou gain de durée de vie :

Si on définit une température de référence T_n , un vieillissement de durée t à une température T différente de T_n produit une variation de la propriété mesurable égale à celle qui serait obtenue pendant un temps équivalent t_e sous la température T_n on établit : [2]

$$\log (t_e / t) = b [(1/T_n) - (1/T)]$$

(2.5)

Cette expression permet, connaissant b , de calculer la perte ou le gain de durée de vie rapporté à la température T_n , selon que $T > T_n$ ou $T < T_n$.

Conclusion

Le vieillissement des isolants est le résultat d'une détérioration graduelle due à des réactions physiques et chimiques affectant la tenue mécanique et diélectrique du système d'isolation. Ces réactions entraînent la rupture des macromolécules de cellulose et réduisent le degré de polymérisation moyen. Par ailleurs, elles sont accélérées par toute augmentation de la température, de la concentration en oxygène et du taux d'humidité. L'huile isolante est également altérée par la détérioration chimique. Elle s'oxyde, ce qui forme des composés acides et des boues.

Il est généralement admis que la durée de vie des isolations papier/huile dépend essentiellement de l'affaiblissement des caractéristiques mécanique du papier. Le rôle des matériaux diélectriques, du point de vue du génie électrique, est celui d'exercer une fonction isolante dans tout matériel soumis à une tension électrique. Ils existent sous forme solide, liquide et gazeuse. Ils sont capables de stocker l'énergie électrique, puisque ils permettent au champ électrique de les pénétrer; cette aptitude de pénétration est caractérisée par leur permittivité électrique.

Chapitre III

Résultats expérimentaux

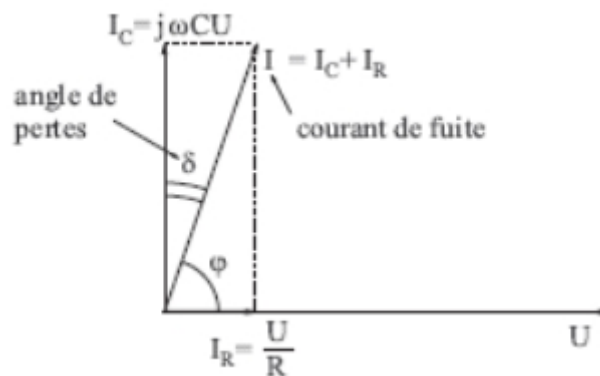
Introduction

La mesure de la réponse diélectrique permet d'obtenir des informations précieuses sur l'état d'une isolation. L'exposition de l'isolation à une large bande de fréquences et la mesure de sa réponse diélectrique à diverses fréquences permettent d'obtenir une évaluation plus approfondie de son état. Les effets de l'humidité et de la contamination ionique sur les propriétés diélectriques de l'isolation sont plus prononcés aux basses fréquences.

Dans ce chapitre nous présentons une expérience réalisée au laboratoire sur un échantillon de papier, pour l'étude du comportement de la permittivité relative en fonction de la fréquence Pour différentes teneur en eau obtenues séchage dans le four. On réalise aussi une étude sur ce même échantillon en l'imprégnant avec de l'huile à laide d'une cuve remplie d'huile aménagée.

III.1 Description de l'expérience

Dans le but d'étudier l'influence de la teneur en eau et de la fréquence sur la permittivité du papier et papier imprégné, on utilise un condensateur plan de forme circulaire de diamètre 10 cm, une épaisseur $e = 1$ mm, sa capacité géométrique est donnée par $C_0 = \epsilon_0 S/e \simeq 65.3$ pF, le diélectrique étant l'air. Un échantillon de papier de dimensions 10 cm \times 10 cm. et analyseur d'impédance (RLC mètre). Qui est basé sur le principe de la mesure de déphasage entre le courant et la tension φ telque :



$$\bar{I} = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \varphi = \arg(\bar{I}) &= \arg\left(\frac{\bar{V}}{1/(\frac{1}{R} + jC\omega)}\right) = \arg(\bar{V}) - (-\arg(\frac{1}{R} + jC\omega)) \\ &= 0 + \arg(\frac{1}{R} + jC\omega) = \arctg RC\omega. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Où

δ : représente l'angle complémentaire de l'angle φ tel que $\delta + \varphi = 90^\circ$
 $\delta = 90^\circ - \varphi$

$tg \delta$: caractérise les pertes dans le diélectrique.

Les échantillons utilisés ont des formes de disques en papier de 10 cm de diamètre pour une épaisseur de 1 mm. La masse des échantillons est déterminée à l'aide d'une balance ayant une précision de 1/100 de gramme

L'expérience commence par la mesure de la masse initiale de l'échantillon de papier $M_i = 14,53g$ puis on l'insère entre les armatures du condensateur, et à l'aide du RLC mètre nous déterminons la capacité pour différentes fréquences, entre 20 et 1000Hz. Une fois les capacités enregistrées, nous traçons la courbe donnant la permittivité en fonction de la fréquence. Par la suite on effectue sur l'échantillon du papier un séchage, retirant la plus grande partie de l'eau présente, surtout dans le papier en l'introduisant dans une étuve. Après le premier séchage on a trouvé une masse de $M_1 = 14,20g$ on a retiré une quantité d'eau ensuite on a effectué un deuxième séchage et on a trouvé une masse de $M_2 = 13,75g$, puis on laisse l'échantillon du papier au four durant une semaine et on trouve une masse de 13,62g.

La deuxième partie de l'expérience L'imprégnation on introduit l'échantillon du papier dans une cuve remplie de l'huile l'imprégnant est introduit dans la cuve par le biais d'une ouverture aménagée il a atteint une masse de 15,14 g ensuite on le laisse dans la cuve durant une semaine

On élimine des molécules d'eau à chaque essai en chauffant l'échantillon dans un four, puis on trace les courbes de capacité en fonction de la fréquence $C(f)$.

1^{er} essai la masse initiale de l'échantillon de papier vaut $M_i=14.53g$

2^{eme} essai la masse de l'échantillon de papier vaut $M_1=14.20g$

3^{eme} essai la masse de l'échantillon de papier vaut $M_2=13.75g$

4^{eme} essai la masse de l'échantillon de papier vaut $M_3=13.62g$

5^{eme} essai la masse de l'échantillon du papier est imprégné de l'huile vaut $M_4=15.14g$

6^{eme} essai la masse de l'échantillon du papier est imprégné de l'huile vaut $M_4=15.32g$ après être laissé à l'air libre durant une semaine.

Les courbes obtenues sont représentés respectivement dans les figures suivantes

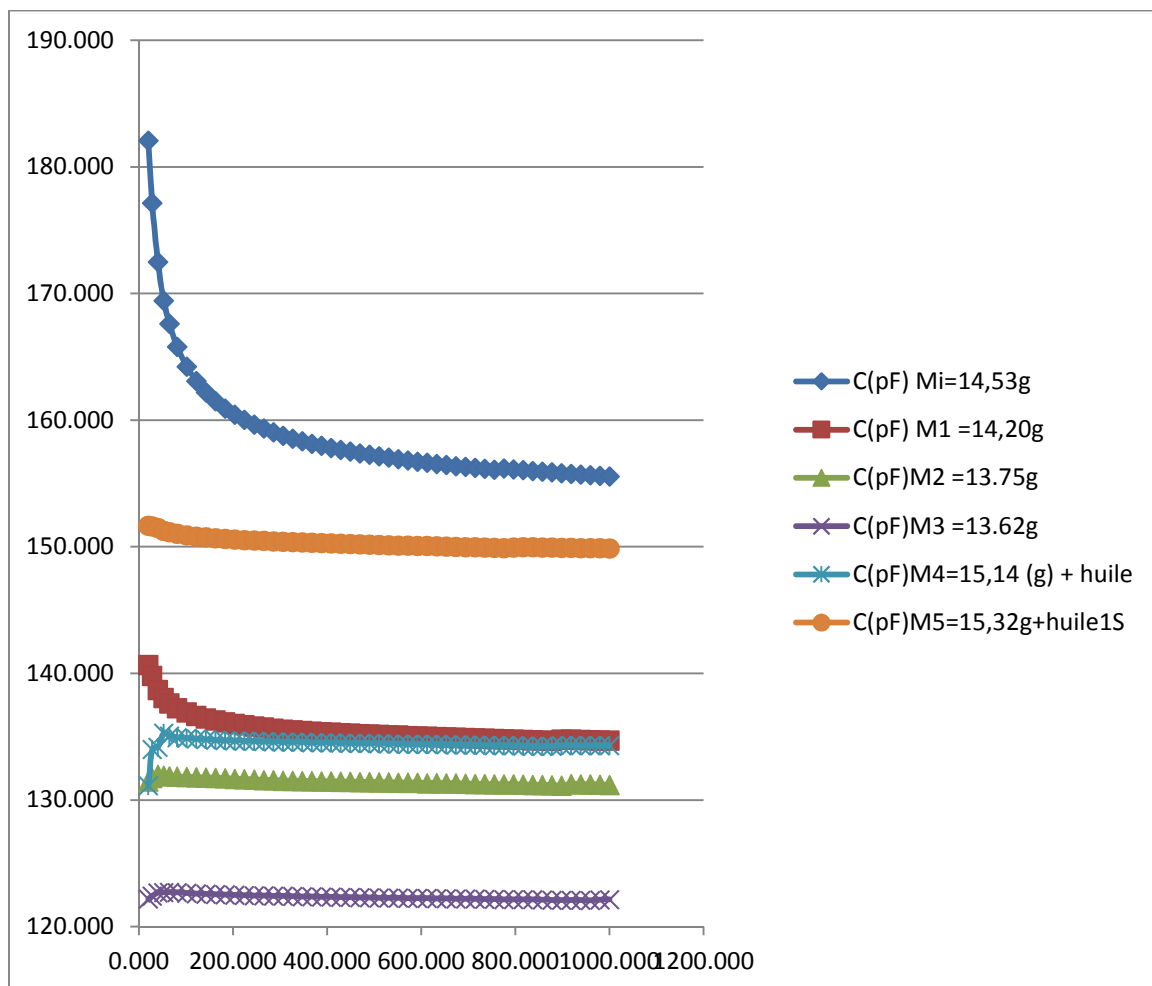


Figure 3.1 Capacité en fonction de la fréquence

Analyse des courbes :

D'après les courbes obtenues on peut constater que la capacité du condensateur diminue à chaque fois qu'on diminue la quantité d'eau du papier, et elle diminue aussi lorsque on augmente la fréquence jusqu'à atteindre des valeurs minimales plus faibles dans chaque essai

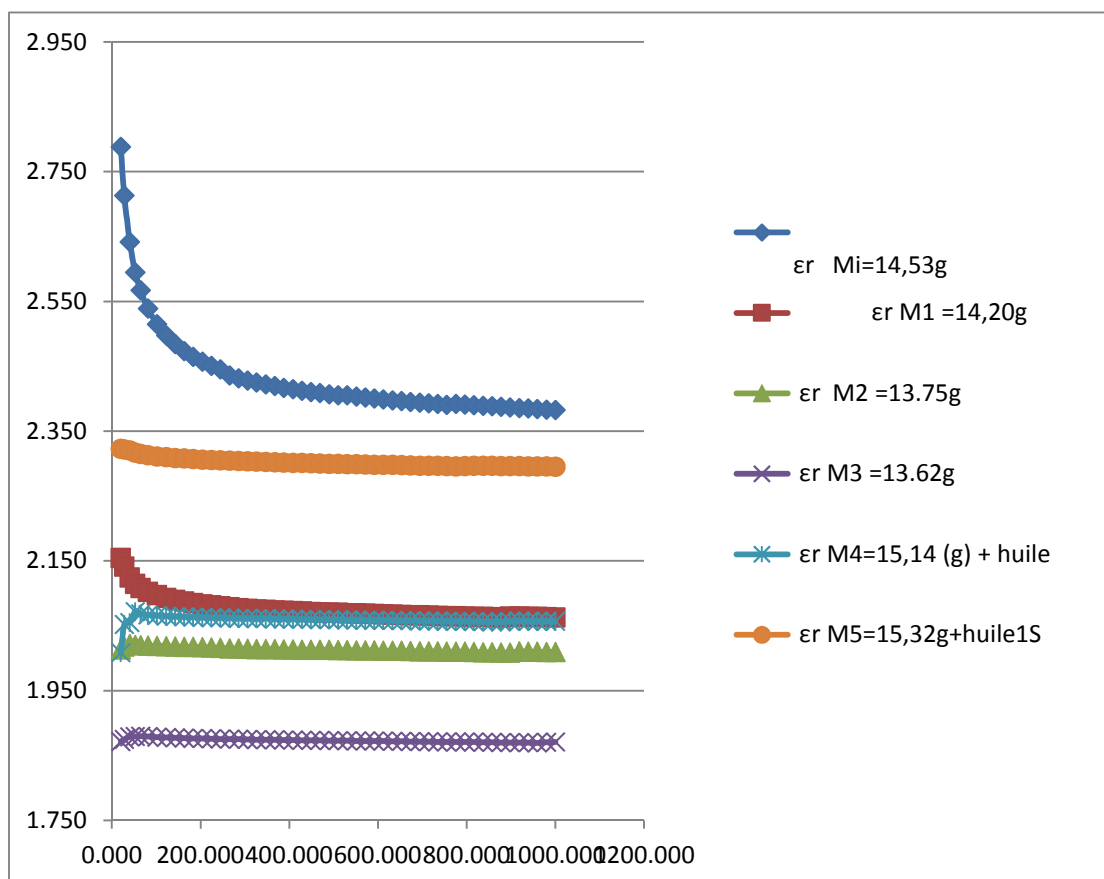


Figure 3.2 : Variation de la permittivité du papier en fonction de la fréquence et pour différents teneurs en eau

Analyse des courbes :

D'après les courbes obtenues on peut constater que la permittivité relative diminue à chaque fois qu'on diminue la quantité d'eau présente dans le papier, car la permittivité

relative est le rapport entre C et C_0 $\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$ est comme nous avons C_0 qui est une constante donc nous avons une proportionnalité entre ϵ_r et C .

Elle diminue aussi lorsque on augmente la fréquence jusqu'à atteindre des valeurs minimales plus faibles dans chaque essais.

Les propriétés diélectriques de l'isolation sont plus visible aux basses fréquences. L'eau peut avoir de dangereux effets sur l'isolation huile- papier; elle réduit la tenue diélectrique, accélère le vieillissement de l'isolation papier et entraîne l'émission de bulles de gaz à des températures élevées. De ce fait, il est capital pour l'utilisateur du matériel de bien connaître la concentration d'humidité.

III.2 Influence de la teneur en eau et de la fréquence sur la permittivité

a) Influence de l'eau sur la capacité :

La molécule d'eau par sa structure chimique peut être considérée comme un dipôle électrique permanent, donc la présence des molécules d'eau dans le papier augmente le nombre de dipôles par unité de volume ou bien la polarisation dans le diélectrique, d'autre part le vecteur polarisation étant défini par $\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E}$. Donc d'après cette formule si le champ électrique est constant alors lorsque \vec{P} augmente, la susceptibilité elle aussi augmente ceci conduit d'après la formule donnant la permittivité absolue $\epsilon = \epsilon_0(1+\chi)$ à augmenter cette dernière.

b) Le moment dipolaire de l'eau :

Le moment dipolaire de la molécule d'eau est donné par

$$p = 2\delta d \cos \frac{\alpha}{2} = 2.03 D \text{ (debye)} \quad (3.3)$$

Avec :

α : L'angle entre liaisons O-H dans la molécule d'eau, égale à 104.5° .

d : La distance interatomique et égale à 96 pm .

$\delta(H) = +0.36e$: la charge partielle de l'atome H (hydrogène).

$$1D = 3.336.10^{-30} Cm$$

C) Influence de la fréquence

L'apparition des pertes diélectriques en général peut être expliquée comme suit: aux très basses fréquences, la polarisation suit le champ alternatif, ce qui fait que sa contribution à la constante diélectrique est maximale et les pertes n'apparaissent pas. Aux fréquences très élevées, le champ alterne trop vite pour que la polarisation puisse augmenter et il n'y a aucune contribution à la constante diélectrique – aucune énergie n'est perdue dans le milieu [7].

Mais quelque part entre ces deux extrêmes, la polarisation commence à prendre du retard par rapport au champ électrique d'où dissipation de l'énergie.

Le facteur de pertes atteint une valeur maximale à une fréquence f_m , liée au temps de relaxation caractéristique par la relation:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_m} = \frac{1}{\omega_m} \quad (3.4)$$

La permittivité et la polarisation de relaxation dépendent du temps; on distingue deux états d'équilibre pour chacune de ses caractéristiques. Dans un champ statique ($0 \rightarrow \omega$), la permittivité diélectrique vaut ϵ_s , et dans les fréquences optiques

($\omega \rightarrow \omega_{opt}$), elle vaut ϵ_∞ .

L'équation typique décrivant ce modèle simple de relaxation diélectrique est l'équation de dispersion de Debye [7].

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} - i \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (3.5)$$

L'équation de Debye peut être écrite sous différentes formes selon la caractéristique cherchée.

III.3 Polarisation d'orientation

La polarisation d'orientation résulte du fait que les moments dipolaires présents dans le matériau s'orientent suivant le champ électrique local

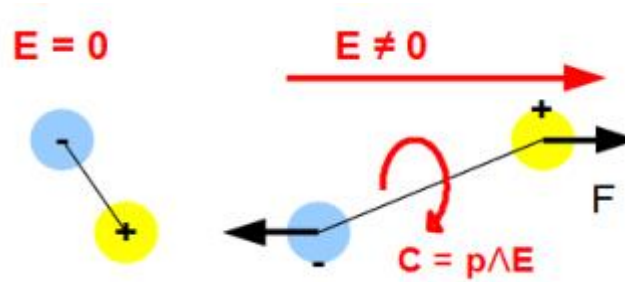


Figure 3.3 : Polarisation d'orientation [9]

La présence d'un champ électrique local E a pour effet d'imposer une force F d'orientation des charges avec ce champ, et donc un couple de rotation des charges égal à

$$\vec{C} = \vec{p} \wedge \vec{E} \quad (3.6)$$

Où p est le moment dipolaire de la molécule [9]

$$\vec{p} = q \overrightarrow{AB} \quad (3.7)$$

Où A et B sont les barycentres des charges négatives et des charges positives

Les dipôles électriques réagissent au champ électrique par une polarisation d'orientation. Ce phénomène se rencontre pour les liquides polaires, comme l'eau [9].

Ce processus est gouverné par les configurations où les effets de frottement sont prépondérants devant ceux de l'accélération.

Dans ce cas la durée de relaxation est de l'ordre de grandeur du temps de Debye τ_D , lequel dépend de la température selon la loi de Curie: la durée τ_D est d'autant plus grande que la température est faible. Pour $\omega\tau \ll 1$ [9]

$$\chi_e(\omega) \approx \chi_0 \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - j\omega/\tau} = \chi_0 \frac{1}{1 - j\omega\tau_D} \quad (3.8)$$

Avec le temps de Debye

$$\tau_D = \frac{1}{\omega_0^2 \tau} \quad (3.9)$$

Et où l'on montre que la susceptibilité statique vérifie

$$\chi_0 = \frac{np_0^2}{3\varepsilon_0^2 k_B T} \quad (3.10)$$

Où p_0 est le moment dipolaire moléculaire permanent et $k_B = 1,3806503 \cdot 10^{-23}$ J/K la constante de Boltzmann.

De (3.8) on tire que les parties réelle et imaginaire de $\chi_e(\omega)$

Vérifient les équations de Debye

$$\chi_e(\omega) = \varepsilon_r - 1 = \chi_0 \frac{1}{1 + \omega^2 \tau_D^2} \quad (3.11)$$

$$\chi_e''(\omega) = \varepsilon_r'' = \chi_0 \frac{\omega \tau_D}{1 + \omega^2 \tau_D^2} \quad (3.12)$$

. Basses fréquences $\omega \tau_D \ll 1$

$$\chi_e(\omega) \approx \chi_0$$

$$\chi_e''(\omega) \ll \chi_0$$

La susceptibilité dipolaire est réelle et égale à sa valeur champ statique.

. Hautes fréquences $\omega \tau_D \gg 1$

$$\chi_e(\omega) \ll \chi_0$$

$$\chi_e''(\omega) \ll \chi_0$$

La susceptibilité dipolaire est négligeable en haute fréquence: les moments dipolaires n'ont pas le temps de s'aligner sur le sens imposé par les oscillations du champ électrique. [9]

III.4 Approche du caractère polaire de la molécule d'eau

La molécule d'eau a la forme de la lettre V, constituée d'un atome d'oxygène O situé à la pointe du V, et de deux atomes d'hydrogène H situés chacun à une extrémité du V.

Les liaisons chimiques O-H sont du type covalent, dans ce type de liaison chaque atome apporte un électron qui évoluera sur une orbitale commune à l'ensemble de la molécule, appelée "orbitale moléculaire". [8]

Les théories de la chimie quantique et l'expérience ont montré que pour la molécule d'eau le barycentre des charges positives $+q$ ne coïncide pas avec le barycentre des charges négatives $-q$ ces deux barycentres forment alors un dipôle électrique. On a vu que le moment dipolaire est exprimé en $C.m$ mais il peut aussi s'exprimer en Debye.

Pour la molécule d'eau nous avons L'angle entre les liaisons O-H, de sommet O, est $104^{\circ}30'$ et la longueur de ces liaisons est O-H = 0,97 angström (pratiquement 10^{-10} m). La valence de l'oxygène O est 2, ce qui signifie qu'il manque deux électrons pour rendre complète sa dernière couche électronique, cette situation fait que l'oxygène est beaucoup plus électronégatif que l'hydrogène, autrement dit c'est ce dernier qui apportera les deux électrons à l'édifice moléculaire. La chimie quantique montre en effet que les deux électrons mis en commun dans l'ensemble de la molécule proviennent des deux atomes d'hydrogène et aussi qu'ils occupent deux orbitales dont les axes principaux sont perpendiculaires entre eux en O. La charge négative est donc concentrée du côté de l'atome d'oxygène qui en est le barycentre $-q = -2e$, tandis que le barycentre des deux charges positives $+q = +2e$ est situé, pour raisons de symétrie, sur la bissectrice de H-O-H, au milieu de H-H. [8]

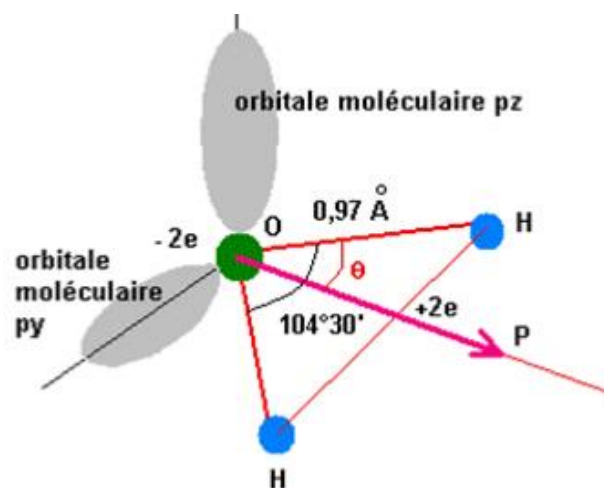


Figure (3.4) molécule d'eau [8]

Désignons par $d = 2L\sin\theta$ la distance entre les deux molécules d'hydrogène H, et par L la distance de la liaison O-H. D'après ce qui a été dit plus haut, admettons qu'en O se trouve la charge $-2e$ et en H une charge $+e$. Les champs à considérer sont alors:

- le champ électrique attractif de H ($+e$) sur O ($-2e$) qui obéit à la loi de Coulomb: [8]

$$E(H - O) = - e/4\pi\epsilon_0 l^2 \quad (3.13)$$

• le champ électrique répulsif entre les atomes d'hydrogène H(+e), obéissant également à la loi de Coulomb:

$$E(H - H) = e/4\pi \epsilon_0 .d^2 \quad (3.14)$$

• le champ électrique dû au dipôle induit en O par le champ électrique E(HO). On sait en effet qu'une particule chargée, lorsqu'elle est soumise à un champ électrique externe E' devient le siège d'un moment dipolaire induit relié à ce champ par la polarisabilité:

$$P = [\alpha] E \quad (3.15)$$

où $[\alpha]$ est le tenseur de polarisabilité. Il se réduit à un scalaire si la particule présente une symétrie sphérique, dans ce cas le moment dipolaire induit est colinéaire au champ inducteur. Dans notre présent exemple le moment dipolaire induit sur O par le champ de H s'écrit: [8]

$$P = \alpha E(H - O) \quad (3.16)$$

Si l'on admet que l'atome d'oxygène où se concentre la charge -2 e est de symétrie sphérique et a un rayon R, on montre que la polarisabilité est [8]

$$\alpha = 4\pi \epsilon_0 R^3 \quad (3.17)$$

L'énergie électrique totale de la molécule d'eau, de ce point de vue macroscopique, est la somme des énergies associées à ces trois interactions

La molécule d'eau, même électriquement neutre, réagit à un champ électrique parce qu'elle présente une polarité. Autrement dit, l'eau est polaire. La polarité des molécules est une des conséquences des liaisons chimiques covalentes que l'on peut modéliser grâce aux méthodes de la chimie quantique.

III.5 Rôle des diélectriques dans un condensateur

La présence d'un diélectrique permet d'appliquer de plus hautes tensions avant de provoquer la décharge du condensateur. Elle permet aussi de rapprocher les armatures sans risquer qu'elles se touchent, ce qui accroît la capacité comme le montre la

$$\text{relation} \quad C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 A}{D} \quad (3.18)$$

On voit qu'effectivement, la capacité ne dépend ni de Q , ni de V , seulement de l'aire des plaques et de la distance entre elles, ainsi que du milieu qui sépare les deux plaques.

Enfin, on a constaté expérimentalement que lorsqu'un diélectrique remplit l'espace compris entre les armatures d'un condensateur, sa capacité augmente d'un facteur ϵ_r ($\epsilon_r > 1$), appelé constante diélectrique : [4]

$$C = \epsilon_r C_0 \quad (3.19)$$

Où C_0 désigne la capacité du condensateur lorsqu'il y a le vide entre ses armatures et C celle du même condensateur avec un diélectrique de constante ϵ_r entre ses armatures. La valeur de ϵ_r varie avec la nature du diélectrique et se mesure expérimentalement.

. Quelques valeurs de ϵ_r dans un tableau

Matériau	Constante diélectrique (ϵ_r)
Vide	1,0000
Air	1,0006
Papier	3 – 7
Porcelaine	6 – 8
Eau	80

Tableau (3.1) Quelques valeurs de ϵ_r [4]

Dans le cas d'un condensateur à armatures parallèles, séparées par un diélectrique de constante diélectrique ϵ_r on obtient en combinant les relations (3.18) et (3.19) : Pour un condensateur à armatures parallèles

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (3.20)$$

On pose $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$

L'augmentation de la capacité d'un condensateur à armatures séparées par un diélectrique provient de la polarisation de ce dernier. Certains électrons atomiques, attirés par la plaque positive, se déplacent légèrement vers celle-ci de telle sorte que bien que le diélectrique soit globalement neutre, la position moyenne des charges négatives est légèrement déplacée par rapport à la position des charges positives, attirées elles par la plaque négative. Comme le montre la figure (3.3)

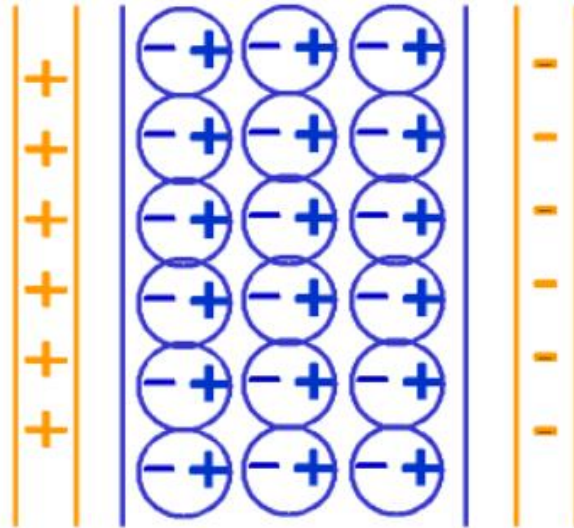


Figure (3.5) condensateur à armatures séparées par un diélectrique

Les molécules polarisées donnent lieu à un champ électrique dirigé de leur charge + vers leur charge -, de sens opposé à celui créé par les plaques chargées. Par conséquent le champ électrique entre les plaques diminue ainsi que la différence de potentiel entre les plaques si celles-ci ne sont pas connectées et que les charges ne peuvent pas s'échapper :

$$Q \rightarrow Q \text{ constant}$$

$$V \quad \text{diminue}$$

$$C = \frac{Q}{V} \quad \text{augmente}$$

Si les plaques sont connectées à une pile lorsqu'on introduit le diélectrique, la pile maintient V constant et c'est la charge portée par les plaques qui va augmenter. [4]

Conclusion

Les propriétés diélectriques du papier sont affectés par des facteurs tels que : la teneur en humidité qui augmente la permittivité relative ; la valeur de fréquence de champ électrique appliqué influence sur les pertes diélectriques, elles sont proportionnelles à la fréquence et ces pertes se traduisent généralement par un dégagement de chaleur. Donc il faut prendre tous ces considérations pendant l'exploitation des diélectriques.

Conclusion générale

Le dysfonctionnement de l'isolation des appareils et machines électriques peut induire un arrêt de production, les pertes financières associées à leur indisponibilité justifient largement la mise en place de moyens de surveillance et de protection dont l'objectif visé consiste à évaluer l'état effectif de ces matériels et limiter leur risque de défaillance. Le vieillissement d'un appareil peut être suivi par l'analyse régulière de l'état de l'isolation.

L'analyse du diélectrique (huile/papier), le diagnostic et le suivi de la maintenance permet de prévenir ces risques et de s'assurer de leur performance et de leur pérennité.

Les domaines électrotechniques utilisent régulièrement les diélectriques liquides et solides, notamment les huiles minérales et le papier Kraft qui ont souvent besoin de techniques analytiques et de méthodes physico-chimiques pour évaluer et caractériser la totalité des propriétés physiques, chimiques et électriques. L'objectif est non seulement la caractérisation des isolants et l'évaluation de leur vieillissement, mais également la recherche de relation entre la structure chimique du diélectrique et ses propriétés électriques.

L'expérience réalisée au laboratoire Elle avait pour objectif d'évaluer l'impacte de la teneur en eau dans le papier sur la permittivité, ainsi que l'impacte d'imprégnation de cet échantillon de papier avec l'huile .Les résultats de cette expérience ont été très intéressants aux basses fréquences on a constaté que la permittivité relative diminue à chaque fois qu'on diminue la quantité d'eau présente dans le papier.

L'huile a non seulement un rôle d'isolation électrique mais aussi de liquide de refroidissement dans les transformateurs de puissance.

Références Bibliographiques

- [1] Robert Fournié, Les isolants en électrotechnique, concepts et théories, Edition Eyrolles, Paris 5^{ème}, 1986.
- [2] Robert Fournié, Les isolants en électrotechnique, Essais, Mécanismes de dégradation, Application industrielles, Edition Eyrolles, Paris 5^{ème}, 1990.
- [3] Christian BISSIERES, Cours Physique Appliquée, Enseignant, Lycée militaire d'Aix-en-Provence, France.
- [4] Marc Séguin, Physique XXI, Tome B, Electricité et Magnétisme,
ISBN: 9782804161903.
- [5] Jonathan Ferreira, Chercheur, L'IPAG, l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble. France. Cours d'Electrostatique-Electrocinétique.
- [6] Norme CEI 354, Guide de charge des transformateurs de puissance immergés dans l'huile, édition 1991.
- [7] August Chełkowski, Dielectric physics, PWN, Edition Warszawa 1993.
- [8] Frédéric Élie, Gestionnaire de projet d'ingénierie chez Radio-Canada, Formation Université du Québec à Montréal, Article du 16/04/2004 Polarité de l'eau et structures quantiques des molécules.
- [9] Frédéric Élie, Rayonnements micro-ondes: temps de relaxation de Debye, Article de mars 2012.

Résumé

Le vieillissement des isolants est le résultat d'une détérioration graduelle due à des réactions physiques et chimiques affectant la tenue mécanique et diélectrique du système d'isolation. Ces réactions entraînent la rupture des macromolécules de cellulose et réduisent le degré de polymérisation moyen. Par ailleurs, elles sont accélérées par toute augmentation de la température, de la concentration en oxygène et du taux d'humidité.

L'expérience réalisée au laboratoire Elle avait pour objectif d'évaluer l'impacte de la teneur en eau dans le papier sur la permittivité, ainsi que l'impacte d'imprégnation de cet échantillon de papier avec l'huile .Les résultats de cette expérience ont été très intéressants on a constaté que la permittivité relative diminue à chaque fois qu'on diminue la quantité d'eau présente dans le papier. Les propriétés diélectriques du papier sont affectés par des facteurs tels que : la teneur en humidité qui augmente la permittivité relative ; la valeur de fréquence de champ électrique appliqué influence sur les pertes diélectriques, elles sont proportionnelles à la fréquence et ces pertes se traduisent généralement par un dégagement de chaleur. Donc il faut prendre tous ces considérations pendant l'exploitation des diélectriques.

Mots clés

Diélectrique

Permittivité

Polarisation

Condensateurs