

Mémoire

Présenté par

Monsieur Djoudi Hakim

Pour l'obtention du diplôme de

Magister

en Electrotechnique
Option : Machines Electriques

Thème

Etude des courants d'absorption et de résorption dans du papier d'isolation

Jury :

Mr	Benamrouche	Nacereddine	Professeur, UMM Tizi-Ouzou	Président
Mme	Bitam-Megherbi	Ferroudja	Maître de Conférences, UMM Tizi-Ouzou	Rapporteur
Mr	Haddad	Salah	Professeur, UMM Tizi-Ouzou	Examineur
Mr	Handala	Mohand Amokrane	Maître de Conférences, UMM Tizi-Ouzou	Examineur
Mr	Belassel	Mohand-Tahar	Maître de Conférences, UMM Tizi-Ouzou	Examineur

Remerciements

Madame Ferroudja BITAM-MEGHERBI, Maître de Conférences A au Département d'Electrotechnique m'a fait confiance en me proposant le travail objet du présent mémoire. Elle n'a eu de cesse de me prodiguer de précieux conseils durant toute la période de réalisation du travail. Je lui en suis reconnaissant et tiens et lui exprimer ici mes vifs remerciements.

Le Professeur Nacereddine BENAMROUCHE exerçant au Département d'Electrotechnique, mais également Vice-Recteur de notre Université, a accepté de présider le jury de soutenance de mon travail qu'il trouve ici l'expression de mes sincères remerciements.

Mes remerciements s'adressent également au Professeur Salah HADDAD, Chef du Département d'Electrotechnique qui a bien voulu prendre sur son temps et faire partie du jury d'examen.

Monsieur Mohand Amokrane HANDALA, Maître de Conférences A au Département d'Electrotechnique a accepté de juger mon travail en prenant part au jury de soutenance je le remercie cordialement.

Monsieur Mohand-Tahar BELASSEL, Maître de Conférences A au Département d'Electrotechnique, a accepté de faire partie du jury et juger mon travail, je l'en remercie fortement

Que tous les enseignants du Département d'Electrotechnique, eux qui ont participé à différents niveaux à ma formation, trouvent ici l'expression de ma reconnaissance et de mes remerciements.

Introduction générale	1
-----------------------	---

Chapitre 1 : Papier d'isolation pour transformateurs

1.1. Introduction	4
1.2. Composition du papier	4
1.2.1. La cellulose	4
1.2.2. Les hémicelluloses	6
1.2.3. La lignine	6
1.3. Propriété du papier et cartons	6
1.3.1. Caractéristiques mécaniques du papier	6
1.3.1.1. Résistance à la traction	7
1.3.1.2. Résistance au déchirement	7
1.3.1.3. Résistance au pliage	7
1.3.1.4. Résistance à l'éclatement	7
1.3.2. Caractéristiques diélectriques du papier	7
1.3.2.1. La permittivité relative	7
1.3.2.2. La rigidité diélectrique et la tension de claquage	8
1.3.2.3. Le facteur de dissipation diélectrique	8
1.3.3. Propriétés thermiques	9
1.4. Huile isolantes pour transformateur	10
1.5. Papier imprégné	11
1.5.1. Permittivité et facteur de dissipation diélectrique	11
1.5.2. Rigidité diélectrique	11
1.6. Vieillessement du complexe huile-papier	11
1.6.1. Dégradation par hydrolyse	12
1.6.2. Dégradation par oxydation	13
1.6.3. Dégradation par pyrolyse	14

Chapitre 2 : Bases théoriques sur les matériaux diélectriques

2.1. Introduction	15
2.2. Théorie du phénomène de polarisation des diélectriques	15
2.3. Généralisation de la loi de Gauss aux diélectriques	17
2.4. Les différents types de polarisation	19
2.5. Mécanismes de conduction sous champ continu	21
2.5.1. Mécanismes d'injection de charges dans l'isolant	22
2.5.1.1. Effet Schottky	23
2.5.1.2. Effet Fowler-Nordheim	25
2.5.2. Mécanismes contrôlés par le volume de l'isolant	25
2.5.2.1. Comportement ohmique	25
2.5.2.2. Mécanisme de Poole-Frenkel	26
2.5.2.3. Expression de la densité de courant dans le cas d'une conduction par saut	27
2.5.2.4. Courant limité par charges d'espace	27
2.6. Approche de la polarisation sous champ alternatif	28
2.7. Généralités sur les pertes diélectriques	28
2.8. Causes des pertes diélectriques	30
2.8.1. Pertes par conduction	30
2.8.2. Pertes par polarisation	30
2.8.3. Pertes dues aux harmoniques de la tension d'alimentation	31

Chapitre 3 : Courant de polarisation et de dépolarisation

3.1. Introduction	32
3.2. Comportement d'un diélectrique soumis à un champ électrique	32
3.3. Estimation de la fonction de réponse $f(t)$	34
3.4. Courants d'absorption et de résorption	37

3.5. Origine physique des courants transitoires dans un diélectrique	39
3.6. Description de la méthode PDC (Polarization and Dépolarization Currents)	44

Chapitre 4 : Etude expérimentale

4.1. Dispositif expérimental	46
4.2. Séquences de charge/décharge pour différents teneurs en eau	47
4.2.1. Teneur en eau de 1%	47
4.2.2. Teneur en eau de 3.5%	50
4.2.3. Teneur en eau de 6.5%	53
4.3. Discussion des résultats expérimentaux	55
4.3.1. Influence de la teneur en eau	55
4.3.2. Séquences de charge	55
4.3.2.1. Teneur en eau de 1%	56
4.3.2.2. Teneur en eau de 3.5%	57
4.3.2.3. Teneur en eau de 6.5%	59
4.3.3. Séquence de décharge	60
4.3.3.1. Teneur en eau de 1%	60
4.3.3.2. Teneur en eau de 3.5%	62
4.3.3.3. Teneur en eau de 6.5%	64
4.4. Interprétation physique des résultats expérimentaux	65
4.4.1. Forme du courant de charge en fonction de la teneur en eau	65
4.4.1.1. Cas de la teneur en eau de 1%	65
4.4.1.2. Cas de la teneur en eau de 3.5%	66
4.4.1.3. Cas de la teneur en eau de 6.5%	67
4.4.2. Interprétation des séquences de charge	68
4.4.2.1. Teneur en eau de 1%	68
4.4.2.2. Teneur en eau de 3.5%	68
4.4.2.3. Teneur en eau de 6.5%	68

4.4.3. Interprétation des séquences de décharge	68
4.5. Approche mathématique des courants d'absorption et de résorption	69
4.5.1. Courants d'absorption	69
4.5.1.1. Teneur en eau de 1%	69
4.5.1.2. Teneur en eau de 3.5%	70
4.5.1.3. Teneur en eau de 6.5%	71
4.5.2. Courants de résorption	72
Conclusion générale	73
Références bibliographiques	75

De par ses qualités, le papier représente un matériau de choix pour l'isolation électrique. Avec un prix de revient très compétitif, il présente également des propriétés électriques et mécaniques remarquables [1]. Sa structure cellulosique poreuse le prédispose à une imprégnation aisée et son association avec un imprégnant liquide lui confère des propriétés isolantes encore plus intéressantes [2]. Le papier est principalement utilisé dans l'isolation des câbles électriques de puissance ainsi que dans les condensateurs et les transformateurs chaque fois que des tensions élevées et des échauffements importants sont mis en jeu. L'imprégnant le plus souvent associé au papier demeure l'huile minérale [3,4].

Le rôle principal dévolu au papier dans un transformateur demeure celui d'isoler des pièces métalliques portées à des potentiels différents. Il est donc naturel de concentrer notre attention sur les propriétés diélectriques du matériau. Il est à noter que les propriétés diélectriques et isolantes du papier sont fortement influencées par un état hygrométrique élevé. L'hygroscopicité élevée du papier découle du caractère fortement polaire de la cellulose. Une partie de l'eau se fixe aux groupements hydroxyle (OH) de la cellulose et l'autre partie pénètre dans les capillaires par absorption classique, conduisant ainsi à une réduction de ses propriétés mécaniques et électriques [5]. Toutefois même lorsque des précautions sont prises pour éviter une absorption d'eau, il n'est pas exclu d'assister à une production interne d'eau suite à un vieillissement sous contrainte thermique [6-8]. Il est généralement admis que la durée de vie du complexe isolant papier-huile soit intimement liée au pourcentage d'humidité contenue dans le papier.

Plusieurs méthodes de diagnostic permettant de déceler la teneur en eau d'une isolation d'un transformateur ont été élaborées. Parmi les méthodes conventionnelles nous citons :

- l'analyse des gaz dissous (DGA) [9,10] ;
- la mesure de la résistivité [11,12] ;
- la résistance à la traction du papier [3,6] ;
- le facteur de pertes diélectrique (DLF) [10,13] ;
- la tension de claquage [6] ;

- la résistance d'isolement (IR) [14] ;
- les décharges partielles (PD) [10,15,16].

Il est à noter, toutefois, que ces nombreuses et précises méthodes présentent néanmoins un inconvénient majeur. En effet, elles ne peuvent être appliquées facilement et directement à des équipements en service.

Au cours des deux dernières décennies, de nouvelles méthodes sophistiquées pouvant s'appliquer directement aux équipements électriques ont été mises au point. Parmi celles-ci, nous citons :

- la caractérisation du phénomène de relaxation diélectrique par des mesures de capacité à différentes fréquences [10,17,18] ;
- La méthode de la tension de retour RVM (Recovery Voltage Method) [10,13,19,20] ;
- la méthode PDC (Polarization and Depolarization Currents).

Les deux dernières Méthodes sont basées sur l'application d'un échelon de tension U_C pendant un temps T_C à un système d'électrodes plan-plan formant un condensateur dont l'échantillon à tester constitue le diélectrique. Ce condensateur est ensuite mis en court-circuit pendant une durée déterminée appelée temps de décharge T_d . La tension résiduelle est recueillie après l'ouverture du court-circuit pour la première méthode. Le courant de charge (absorption + conduction) ainsi que le courant de décharge (résorption) sont mesurés pour la deuxième méthode.

L'objectif assigné au présent travail consiste en l'étude des courants d'absorption et de résorption dans le cas du papier d'isolation des transformateurs pour essayer de les corrélés ensuite à la teneur en eau présente dans le papier.

Dans le but de bien situer les résultats de notre étude, nous avons structuré le mémoire en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous donnons les caractéristiques du matériau, objet de notre étude. Une synthèse bibliographique détaillée sur la composition chimique, les propriétés thermiques, électriques, mécaniques ainsi que les différents mécanismes de dégradation du complexe papier-huile y sont également exposés.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les principaux phénomènes physiques qui ont lieu dans les diélectriques : le phénomène de polarisation, les principaux mécanismes de transport de charges dans les matériaux diélectriques et des généralités sur les pertes diélectriques et leurs origines physiques.

Le comportement d'un diélectrique soumis à un champ électrique fait l'objet du troisième chapitre. La méthode d'investigation des courants d'absorption et de résorption y est également décrite.

Le quatrième chapitre, quant à lui, est consacré à l'étude expérimentale des courants d'absorption et de résorption du papier utilisé dans la construction des transformateurs. L'étude est menée en fonction de la teneur en eau du matériau étudié.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale où sont rassemblés de façon synthétique nos divers résultats. Les perspectives que pourrait ouvrir le présent travail y seront également évoquées.

1.1. Introduction

Le fonctionnement optimal des transformateurs de haute tension ne peut être atteint qu'avec une isolation de qualité. L'isolation des transformateurs est réalisée par la mise en œuvre de deux matériaux essentiels. Ces matériaux sont l'huile minérale, jouant le rôle double d'isolant de qualité et de vecteur idéal pour le transport et l'évacuation de la chaleur, et le papier. Le papier est utilisé autant pour le guipage sur des fils de cuivre que pour la confection d'écrans en carton. Dans ce dernier cas, le papier joue aussi un rôle mécanique en plus de sa destination première qui est l'isolation. En effet, dans un transformateur, le papier sert aussi à maintenir mécaniquement les bobinages et à matérialiser les canaux de refroidissement.

C'est tout-à-fait au début de l'utilisation de l'énergie électrique que l'on s'est aperçu des qualités remarquables du papier. Il a dès lors été utilisé dans l'isolation des transformateurs [21]. D'autres matériaux ont vu le jour mais le papier a toujours sa place [22]. En effet, la porosité du papier permet la combinaison efficace avec l'huile qui, en plus de ses qualités isolantes joue un rôle de liquide caloporteur évacuant la chaleur par convection. Ainsi, l'huile minérale utilisée comme imprégnant confère au papier une bonne tenue diélectrique [23], des pertes diélectriques faibles et une permittivité relative augmentée [3]. L'huile minérale d'imprégnation empêche la reprise d'humidité pour une isolation cellulosique [24], son analyse au cours de la vie du transformateur peut renseigner sur l'état des parties actives de l'appareil.

1.2. Composition du papier

La pâte à papier est composée à 90 % de cellulose, le reste étant essentiellement de la lignine et de l'hémicellulose [3, 21, 24].

1.2.1. La cellulose

a) Structure chimique

La cellulose se trouve avec des proportions allant de 40 à 60 % dans le bois. La structure de la molécule est donnée par la figure 1.1.

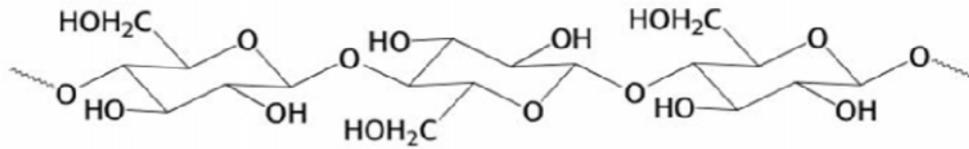


Figure. 1.1. Formule de la cellulose [3, 25, 26].

b) Structure physique

L'association de plusieurs dizaines voire centaines de chaînes de cellulose liées entre elles par des liaisons hydrogène constitue les microfibrilles. On distingue dans ces dernières des régions cristallines où les molécules sont parfaitement parallèles, et des régions plus désordonnées dites amorphes. Les parties amorphes étant plus accessibles aux solvants, elles sont facilement gonflées et déformées. En revanche, les zones cristallines sont stables et résistent mieux à la pénétration des solvants ou des réactifs [26].

c) Propriétés physico-chimiques

- **Dissolution de la cellulose**

La cellulose possède un caractère polaire dû à la présence de nombreux groupements hydroxyle. Elle n'a d'affinité qu'avec les liquides polaires mais la dissolution ne peut avoir lieu que si les zones cristallines sont atteintes par ces liquides [25,26].

- **Degré de polymérisation**

Le degré de polymérisation (DP) indique le nombre moyen d'unités élémentaires constituant la macromolécule. Le degré de polymérisation de la cellulose varie suivant l'origine des fibres et les procédés d'élaboration. Il est de l'ordre de 3000 dans les pâtes cellulosiques à base de coton, et d'environ 1500 pour les pâtes de bois [3, 26].

- **Réactivité de la cellulose**

Les groupements réactifs de la cellulose sont les trois groupements alcool des unités anhydroglucoses. Les fonctions OH sont plus accessibles dans les zones amorphes. Les zones cristallines sont difficilement accessibles : elles réagissent peu ou pas du tout en milieu aqueux non alcalin [26].

1.2.2. Les hémicelluloses

Les hémicelluloses sont des polysaccharides ayant un degré de polymérisation de l'ordre de 100 à 200 et une structure physique amorphe. Ces deux caractéristiques leur assurent une plus grande solubilité que la cellulose ainsi qu'une plus grande réactivité de leurs groupements hydroxyle [25].

1.2.3. La lignine

La lignine désigne des polymères tridimensionnels irréguliers constitués de motifs phényl-propane. Ces polymères sont très difficiles à extraire [3].

1.3. Propriété du papier et cartons

Les propriétés du papier conditionnent fortement la mise en œuvre ainsi que la tenue en service de l'isolation à laquelle il est destiné. Les papiers presspahn ou les cartons comprimés sont fabriqués à partir de la pâte de bois purifiée. Ils sont constitués de plusieurs couches de feuilles minces, moulées ou pressées à chaud. Cette constitution permet d'obtenir des caractéristiques mécaniques, électriques et thermiques optimales.

1.3.1. Caractéristiques mécaniques du papier

Dans la mise en œuvre ou la mise en service des papiers ou des cartons comprimés, les principales caractéristiques mécaniques à prendre en compte sont les résistances à la traction, au déchirement, au pilage et à l'éclatement [27].

1.3.1.1. Résistance à la traction

Elle est caractérisée par la longueur à la rupture qui est la longueur que devrait avoir une bande de papier de largeur uniforme pour que, suspendue par l'une de ses extrémités, elle se rompt sous son propre poids.

1.3.1.2. Résistance au déchirement

Elle est définie comme étant la force moyenne exercée pour poursuivre le déchirement amorcé par une entaille initiale dans une éprouvette généralement constituée d'une liasse de feuilles de papier.

1.3.1.3. Résistance au pliage

On mesure, au moyen d'un dispositif normalisé le nombre de doubles pliages que peut supporter une bande de papier, sous tension constante avant de se rompre.

1.3.1.4. Résistance à l'éclatement

Elle est évaluée par son indice qui est égal au quotient de la pression hydraulique, exercée sur une éprouvette par l'intermédiaire d'une membrane en caoutchouc à l'instant de l'éclatement, par la masse du papier.

1.3.2. Caractéristiques diélectriques du papier

Trois facteurs peuvent être étudiés pour caractériser les performances diélectriques du papier : la permittivité relative, la rigidité diélectrique et le facteur de dissipation diélectrique.

1.3.2.1. La permittivité relative

La permittivité relative ou constante diélectrique ϵ_r d'un isolant est le rapport de la capacité C_x d'un condensateur dans lequel l'espace entre les électrodes et autour d'elles est entièrement et exclusivement rempli de l'isolant en question, à la capacité C_0 de la même disposition d'électrodes dans le vide :

$$\epsilon_r = \frac{c_x}{c_0} \quad (1.1)$$

La valeur de la permittivité relative du papier dépend de sa masse volumique. En effet, la masse volumique de la cellulose pure est de 1.4 g/m^3 alors que celle du papier pour transformateurs et pour câbles est plus faible variant de 0.85 à 1.25 g/cm^3 [24, 28]. La permittivité relative d'un papier peut varier de 1.7 à 3.2 quand la masse volumique varie de 0.6 à 1.2 g/cm^3 [3].

1.3.2.2. La rigidité diélectrique et la tension de claquage

La rigidité diélectrique r d'un milieu isolant, se trouvant entre les armatures d'un condensateur, représente la valeur maximale du champ (V/m) que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique. Cette valeur maximale de la tension appliquée aux bornes est appelée tension de claquage U_c du condensateur. La rigidité du milieu est définie d'après l'équation 1.2 :

$$r = \frac{U_c}{d} \quad (1.2)$$

avec d l'épaisseur de l'isolant placé entre les armatures qui permettent d'appliquer la tension U_c .

La rigidité diélectrique du papier non imprégné peut être considérée médiocre puisque étant à peine supérieure à celle d'un film d'air de même épaisseur, elle est de l'ordre de 5 kV/mm pour le papier presspahn [29].

1.3.2.3. Le facteur de dissipation diélectrique

On considère une plaque d'isolant solide d'épaisseur d entre deux électrodes métalliques et on applique une différence de potentiel alternative sinusoïdale que l'on représente en notation complexe :

$$\underline{V} = V_0 \exp(j\omega t) \quad (1.3)$$

avec ω la pulsation du générateur. Si l'isolant était parfait, il ne pourrait être traversé que par un courant capacitif.

$$\underline{I} = j\underline{V}C\omega \quad (1.4)$$

En pratique, l'imperfection du matériau se traduit par la circulation d'un courant de conduction. Par conséquent, nous avons :

$$\underline{I} > j\underline{V}C\omega \quad (1.5)$$

En considérant globalement les effets des phénomènes capacitifs et de conduction, nous pouvons représenter l'isolant sous forme d'un circuit équivalent composé d'une résistance R_p et d'une capacité C_p montées en parallèle. Dans ce cas, on obtient :

$$I = \sqrt{\frac{1}{R_p^2} + \omega^2 C_p^2} V \quad (1.6)$$

Le courant I n'est pas en quadrature avec la tension V . L'écart est mis en évidence à l'aide de l'angle de pertes δ , caractérisé par le facteur de dissipation diélectrique $\tan \delta$, établi à partir du diagramme représenté sur la figure 1.2.

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (1.7)$$

Dans la pratique industrielle, $\tan \delta < 1$ [6].

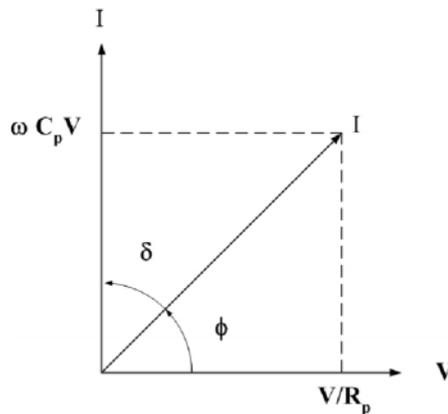


Figure. 1.2. Calcul de $\tan \delta$.

1.3.3. Propriétés thermiques

L'une des contraintes les plus importantes auxquelles sont soumis les matériaux isolants dans les matériels électriques est celle qui résulte des échauffements des parties actives. L'effet de la contrainte thermique revêt deux aspects :

- Le premier concerne le comportement instantané des isolants aux températures élevées.
- Le second est relatif à la dégradation qui s'opère progressivement affectant leur comportement à long terme.

Parmi les propriétés thermiques nous pouvons citer [3, 29]:

a) La conductibilité thermique

La conduction thermique limite plus au moins l'élévation de la température de l'isolation, dont dépendent à court terme les risques de claquage thermique et à long terme le vieillissement de l'isolation.

b) La stabilité thermique

L'effet se fait sentir à long terme. Dans ce cas, l'imprégnant joue un grand rôle dans la mesure où il a une influence sur certains paramètres tels que l'oxygène et l'humidité qui sont des facteurs importants d'accélération du vieillissement du papier. La stabilité thermique est prise en considération même lors du séchage du matériau afin d'éviter toute dégradation au cours de ce traitement.

1.4. Huiles isolantes pour transformateur

Les huiles minérales dans les transformateurs haute tension ont deux fonctions principales : le transfert thermique et l'isolation électrique. Leur analyse au cours de la vie du transformateur peut renseigner sur l'état des parties actives de l'appareil. Les huiles minérales sont obtenues par distillation de pétroles sélectionnés débarrassés de matières diverses (gaz légers, sulfure d'hydrogène, eau...). Ces pétroles bruts (plusieurs centaines de types différents) doivent passer par divers stades de raffinage pour donner des huiles isolantes conformes pour les applications électrotechniques. La composition des huiles minérales isolantes dépend de la composition des pétroles d'origine. Elles contiennent près de 3000 molécules différentes, dont 10 % seulement sont caractérisées. Les huiles minérales utilisées dans le remplissage des

transformateurs de puissance se présentent comme un mélange complexe de composés naphthéniques, paraffiniques et aromatiques, tous dérivés du pétrole. La proportion des ces composés dans l'huile varie suivant le type d'huile [30, 31, 32].

1.5. Papier imprégné

Nous allons examiner dans ce qui suit, les principales propriétés du papier imprégné à l'huile minérale. Ces propriétés dépendent de l'imprégnant mais surtout de la qualité du papier et de sa masse volumique [3].

1.5.1. Permittivité et facteur de dissipation diélectrique

Le papier imprégné peut être considéré comme étant une association en série de la cellulose et de l'imprégnant. Plusieurs facteurs telles que la densité du papier, la pureté de l'eau ainsi que le traitement chimique de la pâte de bois lors de la fabrication peuvent influencer la mesure des pertes diélectriques. La mesure du facteur de pertes diélectriques en fonction de la température nous renseigne sur la contamination d'une isolation par des impuretés ioniques [3].

1.5.2. Rigidité diélectrique

La présence d'un imprégnant est responsable de l'amélioration notable de la rigidité diélectrique du papier. La rupture diélectrique dans le papier imprégné débute par des décharges au niveau de l'imprégnant conduisant à la rupture totale de l'isolation. Cette rupture est influencée par les modalités d'application de la tension ainsi que de la géométrie de l'éprouvette. Cette caractéristique dépend aussi de l'épaisseur, de la densité des impuretés qui sont liées aux matériaux ainsi que des conditions dans lesquelles elle a été déterminée [3, 24].

1.6. Vieillessement du complexe huile-papier

Les principaux agents, présents dans le transformateur, susceptibles de dégrader la cellulose et les hémicelluloses, sont l'eau (par hydrolyse) et l'oxygène (par oxydation) [25, 26, 33, 34]. Par ailleurs, la cellulose se dégrade spontanément sous

l'effet de la température, par pyrolyse au-delà de 300°C [1, 6, 7, 8, 25, 34]. Il est difficile de discriminer la part propre à chaque mécanisme réactionnel car même à haute température le papier n'est pas complètement exempt d'eau. Nous résumons sur la figure suivante les divers mécanismes invoqués, la température y jouant systématiquement un rôle accélérateur.

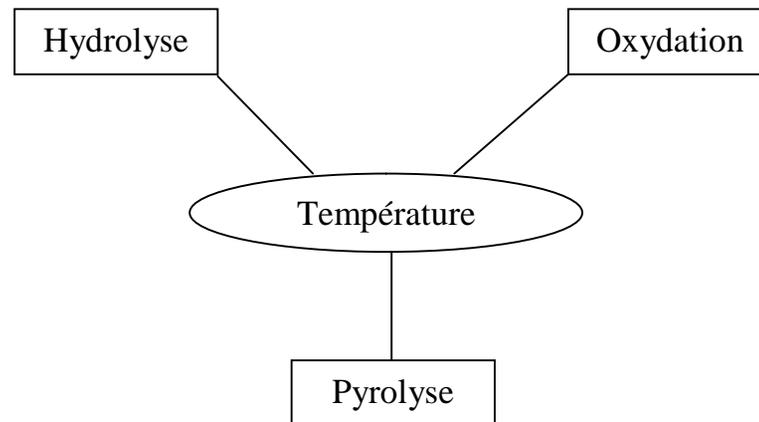


Figure 1.3. Mécanisme de dégradation du papier.

L'huile imprégnant le papier joue au départ un rôle d'écran; en effet son caractère apolaire oblige l'eau à rester majoritairement sur le papier. De la même façon certains produits de dégradation du papier (à caractère polaire) ne peuvent pas se solubiliser dans l'huile. Si cette dernière s'oxyde au cours des années, l'acidité et certains autres produits d'oxydation pourront jouer un rôle actif sur la dégradation du papier, voire permettre une solubilisation limitée des produits de dégradation [25, 34].

1.6.1. Dégradation par hydrolyse

Le rôle de l'eau, l'oxygène et la température, sur la dégradation du papier était énoncé par Fabre dès 1957 [25] et l'auteur déterminait en particulier leur influence sur le degré de polymérisation. Dans un transformateur, la concentration en eau n'est pas uniformément répartie ; sa concentration est forte sur la cellulose (même avec un bon conditionnement, des teneurs supérieures à 0,2 % sont encore présentes) et l'équilibre du système atmosphère-huile-papier a également été décrit par Fabre [25]. Cet

équilibre varie bien entendu en fonction de la température du système (en fonctionnement cette température peut nettement varier entre le papier au contact du cuivre et l'huile elle-même). La teneur en eau peut ainsi varier au sein même d'un guilage car la compacité des couches limite la diffusion dans les couches internes. Enfin l'adsorption de l'eau est probable dans les régions amorphes de la cellulose ; la teneur en eau dépend donc de la température locale et de la structure de la cellulose [25]. L'action de l'eau sur le papier (hydrolyse) se résume en la coupure des liaisons glucosidiques conduisant ainsi à une diminution du degré de polymérisation. Un tel mécanisme réactionnel est cependant décomposable en trois étapes et fait intervenir une catalyse par les acides [25, 33].

Si l'hydrolyse concerne des bouts de chaînes celluloses, alors le sucre majoritairement formé est le D-glucose. Cependant d'autres sucres en C5 et C6 ont été signalés lors de l'hydrolyse de la cellulose [33, 34] mais ces molécules pourraient être attribuées soit aux chaînes hémicellulosiques soit à l'intercalation de tels sucres (défauts locaux) dans la chaîne cellulosique.

Les sucres précédemment cités peuvent, par déshydratation acide, se transformer en dérivés furaniques et évoluer vers des acides. Des dérivés furaniques peuvent également se former sous l'action de la température [25].

1.6.2. Dégradation par oxydation

L'oxygène réagit de manière non sélective avec les fonctions alcool du motif anhydroglucose. Une oxydation peut ainsi provoquer une ouverture du cycle pyranique ou une coupure des liaisons glucosidiques. Des fonctions carbonyle et carboxyle sont alors formées [25, 34].

L'oxydation totale de la cellulose produit de l'eau et du dioxyde de carbone. Des teneurs trop élevées en oxydes de carbone (CO et CO₂) trouvées lors de l'analyse des gaz dissouts peuvent signifier une dégradation partielle de la cellulose [25, 33, 34]. L'oxydation de l'huile peut également entraîner une dégradation rapide de l'isolation cellulosique [34].

1.6.3. Dégradation par pyrolyse

La dégradation thermique de la cellulose provoque la coupure des liaisons glucosidiques et l'ouverture des anneaux de glucose. Les produits ainsi formés sont des molécules de sucre libre, CO, CO₂, H₂O. La pyrolyse n'affecte sensiblement les qualités mécaniques qu'au dessus de 150°C [6, 7, 8].

Enfin, le vieillissement du matériau lignocellulosique est essentiellement un processus de dépolymérisation, engendré par des réactions d'hydrolyse acide, d'oxydation et de pyrolyse. La présence de cuivre et des produits d'oxydation de l'huile a une influence difficilement appréciable sur le phénomène [26, 33, 34].

2.1. Introduction

Le comportement électrique que l'on observe dans les dispositifs électriques trouve son origine dans les propriétés physico-chimiques des matériaux diélectriques qui les composent. La recherche d'une telle compréhension de ce comportement passe donc par la connaissance la plus poussée possible de la nature du diélectrique impliqué. L'objectif de ce chapitre est de présenter les principaux phénomènes physiques qui ont lieu dans les diélectriques.

2.2. Théorie du phénomène de polarisation des diélectriques

S'il est un phénomène pouvant caractériser correctement un diélectrique, c'est bien celui de la polarisation. En effet un diélectrique étant caractérisé par une conductivité quasi nulle, il peut être considéré comme totalement dépourvu de charges libres nécessaires à la conduction. Le phénomène de polarisation que nous considérons comme prédominant est généralement bien décrit par la permittivité ou pouvoir inducteur spécifique des matériaux. Ce phénomène, impliquant des charges liées sera présent dans tous les matériaux soumis à une excitation électrique.

Le phénomène de polarisation consiste en l'orientation plus ou moins accomplie d'un dipôle électrique, induit ou permanent, sous l'action d'un champ électrique. Un dipôle électrique est, par définition, constitué de deux charges q de signes opposées séparées par une distance l . Un tel dipôle est caractérisé par son moment dipolaire :

$$\vec{p} = q\vec{l} \quad (2.1)$$

D'un point de vue macroscopique, la polarisation dipolaire correspond à la somme vectorielle de tous les dipôles par unité de volume. Elle est définie par la relation :

$$\vec{P} = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^{\Delta v N} \vec{p}_i \quad (2.2)$$

Où v désigne un volume dans le diélectrique, N le nombre d'atomes ou de molécules par unité de volume et \vec{p}_i le moment dipolaire d'un dipôle élémentaire. Le volume v doit être assez grand pour contenir un nombre élevé de dipôles et

permettre une évaluation statistique, mais assez petit pour permettre l'application des règles du calcul différentiel.

L'équation (2.2) définit donc la notion de polarisation par l'introduction du vecteur polarisation \vec{P} qui représente l'outil idéal pour la compréhension des phénomènes survenant suite à l'application d'un champ électrique. Lorsqu'un isolant est soumis à un champ électrique, il réagit en se polarisant. Il est à noter que les processus apparaissant durant le phénomène de polarisation diffèrent selon la nature des matériaux en présence. En effet, une distinction doit être faite entre les matériaux polaires et les matériaux non polaires. Dans tous les cas, la polarisation, en tant que réponse du matériau à une sollicitation électrique, aura toujours comme conséquence de réduire le champ effectif dans le matériau, cette propriété fait qu'un diélectrique est considéré comme un modérateur de champ.

- **Les matériaux polaires**

Dans de tels matériaux, des dipôles existent en permanence du fait des différences d'électronégativité des atomes constituant les molécules. Ces dipôles sont, en l'absence de toute excitation, orientés de façon aléatoire du fait de l'agitation thermique. Cette équi-répartition spatiale des moments dipolaires fait que la polarisation macroscopique est par conséquent nulle dans un tel cas. Lorsqu'un champ électrique vient à être appliqué, ces dipôles sont soumis à un couple qui tend à les orienter dans la direction du champ. L'énergie potentielle communiquée par le champ électrique aux dipôles et qui tend à les orienter est contrecarrée par celle découlant naturellement de l'agitation thermique. D'un point de vue statistique, le nombre de dipôles orientés dans une direction donnée est régi par la théorie de Langevin. C'est cet effet de l'agitation thermique qui fait que pour ces matériaux la tangente de l'angle de pertes ainsi que la permittivité dépendent fortement de la température [35].

- **Les matériaux apolaires**

Ce sont des matériaux dont les molécules ne peuvent pas être assimilées à des dipôles permanents dès lors que dans ce cas de figure, les barycentres des charges positives et négatives coïncident parfaitement. Sous l'action d'un champ électrique, les barycentres des charges positives et négatives sont déplacés dans des directions opposées pour ne plus coïncider et chaque atome ou molécule ayant son nuage électronique déformé, peut être assimilé à un dipôle.

Les matériaux apolaires sont caractérisés par un facteur de dissipation diélectrique faible variant peu en fonction de la fréquence et de la température puisque les électrons sont peu sensibles à la température et que la fréquence propre des oscillateurs harmoniques qu'ils constituent se trouve dans la bande des radiations lumineuses[34].

2.3. Généralisation de la loi de Gauss aux diélectriques

Pour des charges libres placées dans le vide, la loi de Gauss s'écrit :

$$\epsilon_0 \vec{E} d\vec{S} = \int_v \rho dv \quad (2.3)$$

et

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.4)$$

Dans les relations (2.3) et (2.4) :

ϵ : est permittivité du vide ;

\vec{E} : est le champ électrique ;

\vec{D} : est l'induction électrique ;

ρ : est la densité de charges libres présentes dans un volume v , délimité par une surface S .

Si un diélectrique est introduit dans le volume v , nous devons tenir compte autant des éventuelles charges libres que des charges de polarisation désignées souvent par le nom de charges liées. Ces charges liées sont dues au phénomène de polarisation. La loi de Gauss s'exprime alors par :

$$\epsilon_0 \vec{E} \cdot d\vec{S} = (\rho + \rho_p) dv \quad (2.5)$$

Dans la relation (2.5), ρ_p est la densité de charges liées dues à la polarisation. Il est à noter que pour une polarisation uniforme, le corps du matériau ne présentera aucune charge électrique en volume. Celle-ci apparaîtra effectivement sur ses faces terminales. Par contre lorsque la polarisation n'est pas uniforme, le spécimen étudié apparaîtra comme chargé, du fait d'une divergence non nulle.

En posant $\rho_p = -\vec{\nabla} \cdot \vec{P}$ et en utilisant le théorème de la divergence, nous obtenons :

$$\epsilon_0 \vec{E} \cdot d\vec{S} = \rho dv + (-\vec{\nabla} \cdot \vec{P}) dv \quad (2.6)$$

Puis :

$$\epsilon_0 \vec{E} \cdot d\vec{S} = \rho dv - \vec{P} \cdot d\vec{S} \quad (2.7)$$

Nous obtenons finalement :

$$(\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) \cdot d\vec{S} = \rho dv \quad (2.8)$$

L'induction électrique \vec{D} dans un diélectrique satisfait la relation :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2.9)$$

Pour un diélectrique homogène, linéaire et isotrope, la relation entre la polarisation \vec{P} et le champ électrique \vec{E} s'écrit :

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (2.10)$$

Dans la relation (2.10), χ est la susceptibilité électrique. La relation (2.9) devient alors :

$$\vec{D} = \epsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} \quad (2.11)$$

En posant $1 + \chi = \epsilon_r$ et $\epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon$, nous aurons :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.12)$$

La polarisation \vec{P} peut s'écrire aussi :

$$\vec{P} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \vec{E} \quad (2.13)$$

2.4. Les différents types de polarisation

Lorsqu'un diélectrique est soumis à un champ électrique, sa polarisation sera le résultat de diverses contributions [36]. Ces différentes contributions sont dues à des polarisations dites électronique, ionique, par orientation ou interfaciale. Les représentations schématiques de ces différents types de polarisation sont rassemblées sur la figure 2.1.

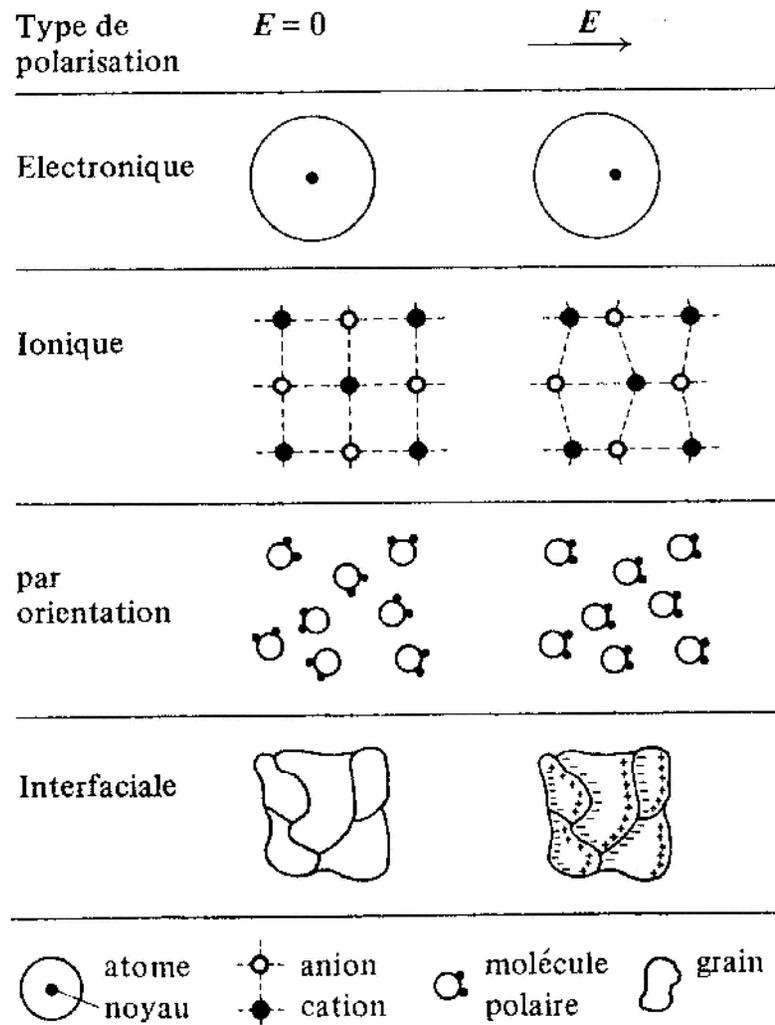


Figure 2.1. Illustration des différents mécanismes de polarisation [37].

D'autre part, il convient de noter que lorsqu'un diélectrique est soumis à un champ électrique, les divers constituants du diélectrique ressentent un champ différent du champ appliqué. En effet le champ ressenti est la somme du champ appliqué et du champ créé par les proches voisins. Nous parlerons dans ce cas du champ local \vec{E}_l . C'est ce champ local qui agira sur chaque particule élémentaire pour lui donner une polarisation [38]. Ceci est illustré par l'expression :

$$\vec{p} = \alpha \vec{E}_l \quad (2.14)$$

Où α désigné la polarisabilité du matériau. Pour une unité de volume contenant N particules, nous aurons :

$$\vec{P} = N\alpha \vec{E}_l \quad (2.15)$$

Ainsi, soumis à l'action d'un champ électrique, les matériaux vont se polariser selon les mécanismes suivants :

- **Polarisation électronique**

Du fait que toute matière est constituée d'atomes et d'électrons gravitant autour, ce type de polarisation va se manifester avec toute substance soumise à un champ électrique. Elle résulte du déplacement des orbites électroniques externes par rapport au noyau de l'atome. La polarisation électronique n'est pas sensible aux fréquences utilisées dans l'électrotechnique, dès lors que ce phénomène est très rapide en s'établissant en des temps de l'ordre de 10^{-15} secondes [38, 39]. La polarisation électronique est également élastique et les dipôles induits disparaissent quand le champ est supprimé.

La polarisation électronique est régie par la formule suivante :

$$\vec{P}_e = N\alpha_e \vec{E}_l \quad (2.16)$$

Dans l'expression (5.15), α_e est une constante dépendant du rayon r de l'atome, elle est donnée par la formule :

$$\alpha_e = 4\pi\epsilon_0 r^3 \quad (2.17)$$

- **Polarisation ionique**

La polarisation ionique résulte du déplacement relatif des atomes dans les structures cristallines présentant des liaisons ioniques. Les électrons de valence parcourent les orbitales partagées avec d'autres atomes. Dans ce cas, la polarisation se manifeste sous la forme d'un déplacement des atomes de charge positive dans la direction du champ électrique et du déplacement des atomes de charge négative en sens contraire. Cette polarisation est caractérisée par des constantes de temps de l'ordre de 10^{-13} à 10^{-12} secondes [38]. Ce type de polarisation dépend de la charge de l'ion et des liaisons ioniques mutuelles [37, 39].

La polarisation ionique, appelée aussi polarisation par déformation, n'est pas affectée par la température. Dans le domaine des fréquences industrielles, la polarisation ionique ne peut donner lieu à des pertes diélectriques appréciables, ce qui est d'autant plus vrai pour la polarisation électronique citée plus haut [38].

- **Polarisation par orientation et polarisation interfaciale**

La polarisation par orientation (ou dipolaire) et la polarisation interfaciale (ou polarisation par charge spatiale) sont caractérisées par des constantes de temps assez élevées pour leur établissement et pour leur disparition.

La polarisation dipolaire ou orientationnelle est liée à l'orientation des dipôles permanents. La polarisation interfaciale de Maxwell-Wagner apparaît dans les diélectriques non homogènes. Elle se caractérise par une localisation des charges aux interfaces, dans le cas de composés non homogènes.

2.5. Mécanismes de conduction sous champ continu

Lorsqu'un matériau diélectrique est soumis à une tension continue, le courant qui en résulte évolue dans le temps et peut être décomposé en deux phases principales en faisant abstraction d'une phase initiale de décroissance très rapide et exponentielle

due à la charge du condensateur formé par les électrodes et l'espace les séparant. Ces deux phases sont :

- Premièrement, une décroissance, plus ou moins longue, correspondant à divers phénomènes de polarisation intervenant dans le matériau et/ou aux interfaces dans le matériau et aux électrodes. Cette décroissance peut être très longue avant d'atteindre un régime constant au cours du temps. cette partie sera détaillée dans le chapitre suivant.
- Deuxièmement, l'obtention d'un courant constant, correspondant au courant de conduction. Cette deuxième phase constitue en fait le stade ultime vers lequel tend la première phase. Cette conduction, certes très faible, est due à la présence en petite quantité de charges libres. Ces charges libres peuvent avoir plusieurs origines comme une présence dès la confection du matériau, une production par ionisation ou une injection à partir des électrodes.

Les mesures de courants sous contrainte continue permettent d'obtenir de nombreuses informations sur le mode de conduction dans les matériaux outre la valeur caractéristique de la résistivité. Nous décrivons ci-dessous les différents régimes de conduction dans les isolants. Nous nous limiterons à rappeler les phénomènes de base et les équations qui leur sont associées. De très nombreux articles de synthèse plus ou moins complets de ces mécanismes sont disponibles dans des livres et des revues généralistes [40, 41, 42, 43]. Nous nous référons en partie à ces ouvrages pour décrire les mécanismes ci-après.

2.5.1. Mécanismes d'injection de charges dans l'isolant

La conduction dans un matériau diélectrique nécessite l'injection de charges à partir des électrodes. Cette injection, par effet de champ, produira des charges pouvant dériver. L'application du champ peut aussi faire passer des électrons de la bande de valence à la bande de conduction

Un schéma idéalisé de l'interface électrode – isolant est représenté sur la figure 2.2. Sans champ électrique appliqué, la hauteur de la barrière est représentée par la grandeur ϕ_0 . Cette hauteur de barrière dépend de l'énergie du niveau de Fermi du métal constituant l'électrode.

Lorsqu'un champ électrique est appliqué à l'isolant, une énergie supplémentaire est fournie aux charges injectées par l'électrode en plus de leur énergie thermique. Cet apport d'énergie conduit à un abaissement de la hauteur de barrière. Les trois mécanismes d'injection de charges sont représentés sur la figure 2.2. Si l'injection de charges est faible devant la mobilité de ces mêmes charges dans l'isolant, alors les courants de conduction seront limités par le phénomène d'injection.

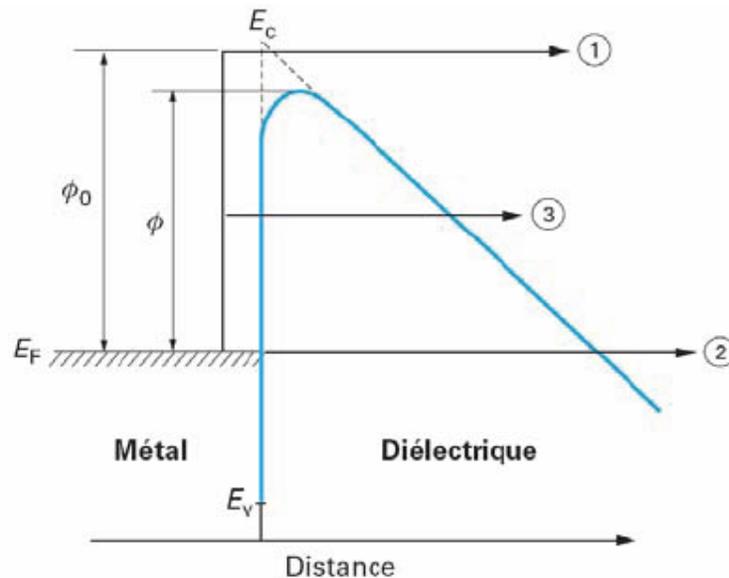


Figure 2.2. Diagramme de bande à l'interface électrode métallique-diélectrique [40].

2.5.1.1. Effet Schottky

L'effet Schottky, également appelé effet thermo-électronique, est l'injection de charges dans le diélectrique par passage au-dessus de la barrière de potentiel que représente l'interface. Il est représenté par le chemin numéro 1 sur la figure 2.2. L'application d'un champ électrique va abaisser la barrière de potentiel et donc favoriser ce type d'injection. La hauteur de barrière s'exprime alors par :

$$= \phi_0 - \beta_S \sqrt{E} \quad (2.18)$$

β_S est la constante de Schottky, sa valeur dépend du matériau diélectrique considéré et est calculée selon l'équation :

$$\beta_S = \sqrt{\frac{e^3}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0}} \quad (2.19)$$

La densité de courant émise par un tel mécanisme est donnée par l'équation ci-dessous:

$$J = AT^2 \left[\frac{\phi_0 - \beta_S \sqrt{E}}{kT} \right] \quad (2.20)$$

Dans cette équation, A est la constante de Richardson-Schottky et vaut $120 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Un tel mécanisme est représenté par une droite sur un graphique $\ln J = f(\sqrt{E})$ (cf. figure 2.3). La pente de cette droite vaut $\frac{\beta_S}{kT}$, β_S ne dépendant que de la permittivité du diélectrique.

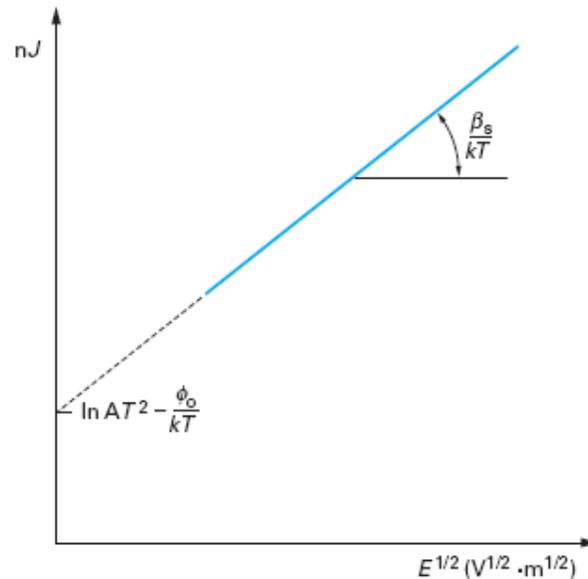


Figure 2.3. Variation dans un diagramme semi-logarithmique, de la densité de courant en fonction du champ électrique pour un mécanisme d'injection de type Schottky [40].

2.5.1.2. Effet Fowler- Nordheim

Ce mécanisme, également appelé effet tunnel, traduit le passage des charges directement à travers la barrière de potentiel. Il est représenté sur la figure 2.2 par les chemins 2 et 3. Dans ce cas, il y a successivement un effet Schottky suivi d'un effet tunnel. Un tel mécanisme est quasiment indépendant de la température ; la densité de courant peut donc s'exprimer seulement en fonction du champ appliqué et de la hauteur de barrière par l'équation :

$$J = AE^2 \exp\left(-\frac{B}{E}\right) \quad (2.21)$$

Dans cette équation, nous avons :

$$A = \frac{e^3}{8\pi h^2 \epsilon_0} \quad \text{et} \quad B = 4[(2m)^{1/2} \epsilon_0^{3/2}] \quad (2.22)$$

Si la conduction est contrôlée par ce mécanisme, alors une représentation de $\ln(J/E^2)$ en fonction de $\frac{1}{E}$ donne une droite. C'est le seul mécanisme qui varie en $\exp\left(-\frac{1}{E}\right)$.

2.5.2. Mécanismes contrôlés par le volume de l'isolant

2.5.2.1. Comportement ohmique

Sous champ faible (quelques kV/mm), les matériaux isolants obéissent à la loi d'Ohm. La densité de courant circulant dans le matériau s'exprime en fonction du champ électrique par :

$$J = \sigma \times E \quad (2.23)$$

J étant la densité de courant (A/mm^2), E le champ électrique appliqué (V/m) et σ la conductivité du matériau, (S/m), indépendante du champ électrique dans ce cas.

2.5.2.2. Mécanisme de Poole – Frenkel

Ce mécanisme décrit le déplacement des porteurs se trouvant dans la bande de conduction et pouvant être piégés. La figure 2.4, représente la configuration énergétique d'un piège dans le matériau.

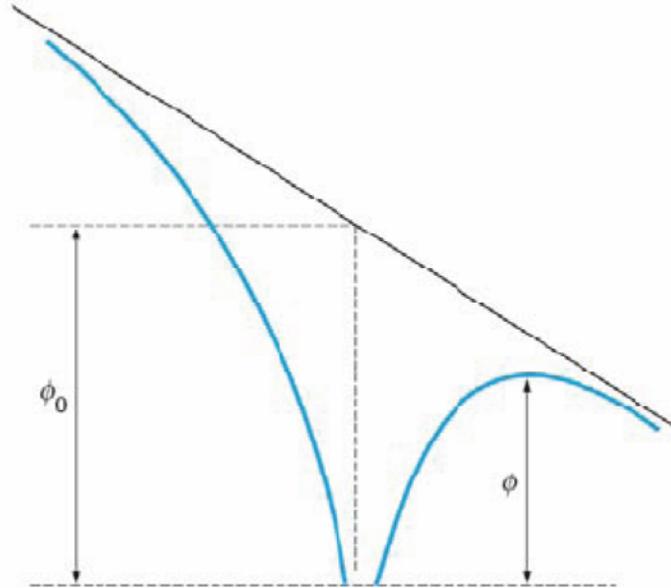


Figure 2.4. Diagramme de bande dans le cas de l'effet Poole-Frenkel [40].

Un porteur issu de la bande de conduction peut donc être piégé à la profondeur ϕ_0 . Ce porteur peut quitter le piège s'il acquiert une énergie thermique kT lui permettant de passer au dessus de la barrière. L'effet du champ électrique facilite ce dépiégeage du fait de l'abaissement de la barrière d'une quantité :

$$\phi = \phi_0 - \beta_{PF} E^{1/2} \quad (2.24)$$

où β_{PF} est la constante de Poole – Frenkel qui s'écrit :

$$\beta_{PF} = \sqrt{\frac{e^3}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0}} \quad (2.25)$$

La conductivité en fonction du champ appliqué s'exprime par :

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left[-\frac{E_0 - \beta_{PF}}{kT} \right] \quad (2.26)$$

Un mécanisme de Poole-Frenkel sera identifié en représentant $\ln \sigma = f(E^{1/2})$. Notons que cette représentation étant la même que celle du mécanisme Schottky, seule la perte de linéarité pour les champs les plus faibles du mécanisme Poole-Frenkel permettra de faire la discrimination.

2.5.2.3. Expression de la densité de courant dans le cas d'une conduction par saut

Le mécanisme Poole-Frenkel décrit au paragraphe précédent est observé pour une faible quantité de pièges que l'on peut alors considérer comme isolés. Lorsque la densité de pièges augmente, les hauteurs énergétiques sont différentes et l'expression de la densité de courant à laquelle on arrive est la suivante :

$$J = J_0 \exp \left(\frac{-E_a}{kT} \right) \times 2 \sinh \left(\frac{2\lambda E}{2kT} \right) \quad (2.27)$$

Dans cette expression, λ est la distance entre deux pièges. Une représentation de I ou de J en fonction de $\sinh \left(\frac{2\lambda E}{2kT} \right)$ doit donner une droite si un tel mécanisme est responsable de la conduction. L'optimisation de la droite de régression se fait en ajustant λ . Dans les études proposant un mécanisme de conduction par saut ou de conduction ionique, les valeurs de λ obtenues peuvent atteindre plusieurs nanomètres.

2.5.2.4. Courant limité par charges d'espace

Ce régime de conduction est détaillé par Laurent [43]. Il décrit les courants lorsque les charges injectées sont plus importantes que les charges intrinsèques. La relation courant-tension va dépendre de la répartition énergétique et de la densité des pièges. Des modélisations comportant un seul site de piégeage donnent la relation :

$$J = \frac{9}{8} \epsilon_r \epsilon_0 \theta \mu \frac{V^2}{L^3} \quad (2.28)$$

Où θ est le rapport porteurs libres/ porteurs piégés, L l'épaisseur de l'échantillon et V la tension appliquée.

Si on considère une répartition exponentielle de pièges, l'expression de la densité de courant devient alors :

$$J = \frac{9}{8} \epsilon_r \epsilon_0 \theta \mu \frac{V^{l+1}}{L^{2l+1}} \quad (2.29)$$

Avec $1 < l < 3$ suivant la distribution en énergie des pièges. Une fois tous les pièges remplis, la densité de courant J est proportionnelle à V^2 .

2.6. Approche de la polarisation sous champ alternatif

Sous un champ électrique variable, l'induction électrique \vec{D} change de sens alternativement. Les dipôles du diélectrique vont essayer d'inverser leur orientation mais le milieu diélectrique avoisinant exerce des forces qui s'opposent à leur mouvement. Il y aura donc un retard à l'orientation qui sera d'autant plus grand que la fréquence est élevée. Les dipôles n'ayant pas le temps d'atteindre leur position finale que l'induction électrique \vec{D} change de sens.

En régime sinusoïdal, nous pouvons exprimer le vecteur induction électrique par l'expression [44] :

$$D(\omega) = \epsilon_0 \epsilon_r^* E(\omega) \quad (2.30)$$

Avec : $\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ la permittivité complexe où ϵ_r' et ϵ_r'' sont des réels positifs.

2.7. Généralités sur les pertes diélectriques

L'énergie absorbée par un condensateur parfait en courant alternatif est nulle, en moyenne, le courant étant en avance de $\frac{\pi}{2}$ exactement sur la tension. Si le diélectrique possède une hystérésis, c'est-à-dire un retard de la polarisation sur le champ, il absorbe de l'énergie et l'avance du courant devient inférieure à $\frac{\pi}{2}$. Dans ce

cas, les expressions de la puissance active P et la puissance réactive Q sont respectivement données par les équations (1.31) et (1.32).

$$P = U.I. \cos \varphi \quad (2.31)$$

$$Q = U.I. \sin \varphi \quad (2.32)$$

Où U et I représentent la tension efficace appliquée au condensateur et le courant le traversant, φ est le déphasage entre ces deux grandeurs.

En posant : $\pi/2 - \varphi = \delta$, il vient $\frac{P}{Q} = \tan \delta$ et nous pouvons alors exprimer les puissances active et réactive sous les formes données par les équations (2.33) et (2.34).

$$P = U.I. \sin \delta \quad (2.33)$$

$$Q = U.I. \cos \delta \quad (2.34)$$

Les pertes dans le diélectrique sont alors caractérisées par l'angle δ ou plus précisément la tangente de cet angle que l'on appelle aussi facteur de dissipation diélectrique. L'angle de pertes δ ainsi défini représente le complément à l'angle de déphasage entre la tension et le courant. Pour tenir compte de cet écart à la quadrature, une façon pratique de traiter le problème consiste en l'introduction de la notion de permittivité complexe. La tangente de l'angle des pertes diélectriques s'exprime alors par :

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (2.35)$$

Où ϵ_r'' et ϵ_r' représentent les parties réelle et imaginaire de la permittivité complexe définie pour un matériau réel par [35,45], laquelle s'écrit :

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (2.36)$$

En pratique, il n'est pas possible de s'affranchir des pertes par conduction ; dans ce cas nous aurons :

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''(\omega) + (\sigma/\omega\epsilon_0)}{\epsilon_r'(\omega)} \quad (2.37)$$

2.8. Causes des pertes diélectriques

Les pertes diélectriques dans un matériau isolant ont des origines diverses. En premier lieu, nous devons tenir compte du fait qu'aucun matériau ne présente une résistivité infinie. Ainsi, trouverons-nous toujours des courants de conduction dans les matériaux isolants qui vont générer des pertes par conduction. Le second phénomène occasionnant des pertes dans les diélectriques est lié à leur polarisation. En effet, les diverses collisions entre dipôles sont à l'origine d'un retard de la polarisation sur le champ. Par analogie avec la mécanique des fluides, nous parlons dans ce cas de viscosité diélectrique. Cette difficulté de la polarisation à suivre le champ peut se traduire par un effet d'inertie qui se trouve décrit de façon claire, en régime sinusoïdal par la notion de déphasage.

2.8.1. Pertes par conduction

Lorsque nous considérons un condensateur avec un diélectrique autre que du vide, nous constatons qu'il est toujours le siège d'un courant de conduction lorsqu'il est mis sous tension. Ce courant est dû à la présence de porteurs de charge. Ces porteurs de charges peuvent exister dans le matériau de façon naturelle ou être générés par le champ lui-même (ionisation d'espèces neutres à l'origine). Le courant de conduction à travers un diélectrique soumis à un champ électrique E , s'exprime par une densité $J = \sigma \times E$ où la conductivité σ n'est jamais nulle. Du fait de sa valeur assez réduite et qu'il n'est jamais souhaité, ce courant est désigné par le terme de «courant de fuite».

2.8.2. Pertes par polarisation

Les pertes par polarisation varient selon la nature chimique et l'état physique du matériau. Lorsque la polarisation est uniquement de type électronique, elle ne s'accompagne pas de dissipation d'énergie, dès lors que ce type de polarisation concerne les électrons dont le mouvement n'est pas affecté par l'agitation thermique [38].

Lorsque le matériau considéré comporte des dipôles permanents, l'application d'un champ électrique induit une polarisation par orientation. En effet les dipôles acquièrent une énergie potentielle et tendent à s'orienter dans la direction du champ. Cette orientation sera contrecarrée par l'agitation thermique avec un effet de répartition aléatoire des dipôles. Les actions antagonistes du champ électrique et de l'agitation thermique conduisent au retard de l'orientation sur le champ et génèrent un dégagement de chaleur constituant les des pertes diélectriques. Un autre type de polarisation survient lorsque nous avons un diélectrique non homogène. C'est la polarisation interfaciale qui se manifeste par une accumulation de charges à l'interface. Du fait que les charges accumulées sont libres, elles produisent des pertes par conduction.

2.8.3. Pertes dues aux harmoniques de la tension d'alimentation

Les pertes diélectriques dans les divers équipements électriques ne sont pas dues uniquement fondamental de la fréquence industrielle mais aussi aux harmoniques de la tension d'alimentation [46, 47, 48]. En effet la polarisation dipolaire étant sensible à la fréquence, toute distorsion de tension peut générer un surplus de pertes diélectriques.

3.1. Introduction

Le phénomène de polarisation a lieu au sein des diélectriques car le champ électrique doit y pénétrer. A l'intérieur d'un diélectrique, le champ électrique aura pour conséquence de réorganiser la distribution des charges. Nous allons exposer dans ce qui suit l'effet du champ électrique sur un diélectrique quelconque.

3.2. Comportement d'un diélectrique soumis à un champ électrique

Pour un condensateur ayant le vide pour diélectrique, la relation entre l'induction électrique $D(t)$ et le champ électrique $E(t)$ peut s'écrire sous la forme simple :

$$D(t) = \varepsilon_0 E(t) \quad (3.1)$$

Où $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ (F.m⁻¹) est, par extension appelée permittivité du vide.

L'induction électrique $D(t)$ représente les charges électriques sur la surface des électrodes, à l'origine des lignes du champ électrique. Si nous introduisons un matériau diélectrique entre les électrodes, il faut tenir compte également des charges dues aux phénomènes de polarisation. L'induction électrique $D(t)$ est alors augmentée par la polarisation (macroscopique) $P(t)$ du matériau selon l'expression suivante.

$$D(t) = \varepsilon_0 E(t) + P(t) \quad (3.2)$$

La quantité $P(t)$ inclut tous les processus de polarisation, ceux que nous qualifions de "rapides" de la polarisation électronique et ceux que nous considérons "lents" des polarisations interfaciale et orientationnelle.

$P(t)$ et $E(t)$ sont reliés par l'équation :

$$P(t) = \varepsilon_0 \varepsilon_r E(t) + \varepsilon_0 \int_0^t f(\tau) E(t - \tau) d\tau \quad (3.3)$$

Où :

ε_r : est la permittivité relative à haute fréquence ;

τ : est le temps de retard de $P(t)$ par rapport à $E(t)$;

$f(t)$: est la fonction de réponse diélectrique du matériau [50], qui représente l'effet "mémoire" du matériau.

Le terme $\varepsilon_0 \varepsilon_r E(t)$ représente la polarisation rapide et le terme $\varepsilon_0 \int_0^t f(\tau) E(t - \tau) d\tau$ la polarisation lente.

Selon l'équation de Maxwell, un diélectrique soumis à un champ $E(t)$ va générer une densité de courant $j(t)$ qui est la somme du courant de conduction et du courant de déplacement [10,38,50,51,52].

$$j(t) = \sigma E(t) + \frac{\partial D(t)}{\partial t} = \sigma E(t) + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial D(t)}{\partial t} + \varepsilon_0 f(0) E(t) + \varepsilon_0 \int_0^t \frac{df(t-\tau)}{dt} E(\tau) d\tau \quad (3.4)$$

Si nous supposons que l'échantillon étudié est totalement déchargé et qu'un échelon de tension lui soit ensuite appliqué avec les caractéristiques suivantes:

$$U(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ U_0 & 0 \leq t \leq t_1 \\ 0 & t > t_1 \end{cases} \quad (3.5)$$

Nous remarquerons que pendant la durée t_1 , le courant traversant l'échantillon est dû à la conductivité du matériau d'une part et aux différents processus de polarisation d'autre part. Pour une géométrie déterminée, le courant de polarisation est exprimé à l'aide de l'équation (3.4) par la formule suivante :

$$I_{pol}(t) = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0} + \varepsilon_r \delta(t) + f(t) \right) C_0 U_0 \quad \text{pour } t > t_1 \quad (3.6)$$

Avec:

C_0 : est la capacité géométrique du système ;

$\delta(t)$: est la fonction delta, qui correspond à l'augmentation soudaine de la tension U_0 à $t = 0$ et provoque une impulsion de courant extrêmement grande.

La première partie de l'équation (3.6) est la contribution de la conductivité volumique σ du matériau. La deuxième partie représente le courant de déplacement dans le vide et à haute fréquence. La troisième partie, quant à elle, régit le courant de polarisation. Le courant de conduction n'est atteint qu'après un temps suffisamment long lorsque le dernier terme correspondant à la réponse diélectrique devient négligeable. La mesure du courant de polarisation peut être stoppée quand le courant devient stable (courant de conduction). Le courant de dépolarisation (résorption) est obtenu en court-circuitant l'échantillon à partir de t_1 (Figure 3.2). Selon le principe de superposition, le courant de dépolarisation est alors:

$$I_{dép}ol(t) = (f(t) - f(t - t_1) - \varepsilon_r \delta(t - t_1)) C_0 U_0 \quad \text{pour } t > t_1 \quad (3.7)$$

Où $\delta(t - t_1)$ correspond à l'annulation de l'échelon de tension.

En posant $(t - t_1) = t$ (t_1 est la nouvelle origine des temps) et en négligeant la contribution de la fonction delta, le courant de dépolarisation s'exprime par la relation:

$$I_{dép}ol(t) = -(f(t) - f(t + t_1)) C_0 U_0 \quad (3.8)$$

3.3. Estimation de la fonction de réponse $f(t)$

Pour déduire la fonction de réponse diélectrique $f(t)$ à partir du courant de dépolarisation, on suppose que la fonction de réponse diélectrique est une fonction qui diminue avec le temps. Si tel est le cas et si l'échantillon est déchargé (court-circuité) pendant un temps suffisamment long, nous avons :

$$f(t) = f(t + t_1) \quad (3.9)$$

La fonction de réponse diélectrique est alors:

$$f(t) = \frac{I_{d\acute{e}pol}(t)}{C_0 U_0} + f(t + t_1) - \frac{I_{d\acute{e}pol}(t)}{C_0 U_0} \quad (3.10)$$

Dans un matériau, plusieurs processus de polarisation peuvent intervenir avec différentes constantes de temps. La fonction de réponse diélectrique décroît d'une façon monotone, mais généralement elle n'obéit pas à une relation simple qui peut être exprimée par une fonction analytique. De nombreux travaux [50,51,52,53] ont tenté de représenter les données expérimentales avec une telle fonction. Nous pouvons citer quelques exemples:

- La réponse de Debye avec une seule constante de temps τ :

$$f(t) = A \cdot \exp(-t/\tau) \quad (3.11)$$

- La réponse générale ou la réponse "universelle" pour laquelle la fonction $f(t)$ suit des lois de puissance dont la représentation est rappelée sur la figure (3.1). Une telle réponse est exprimée par la relation:

$$f(t) = \frac{A}{(t/\tau)^n + (t/\tau)^m} \quad (3.12)$$

Où A est une constante.

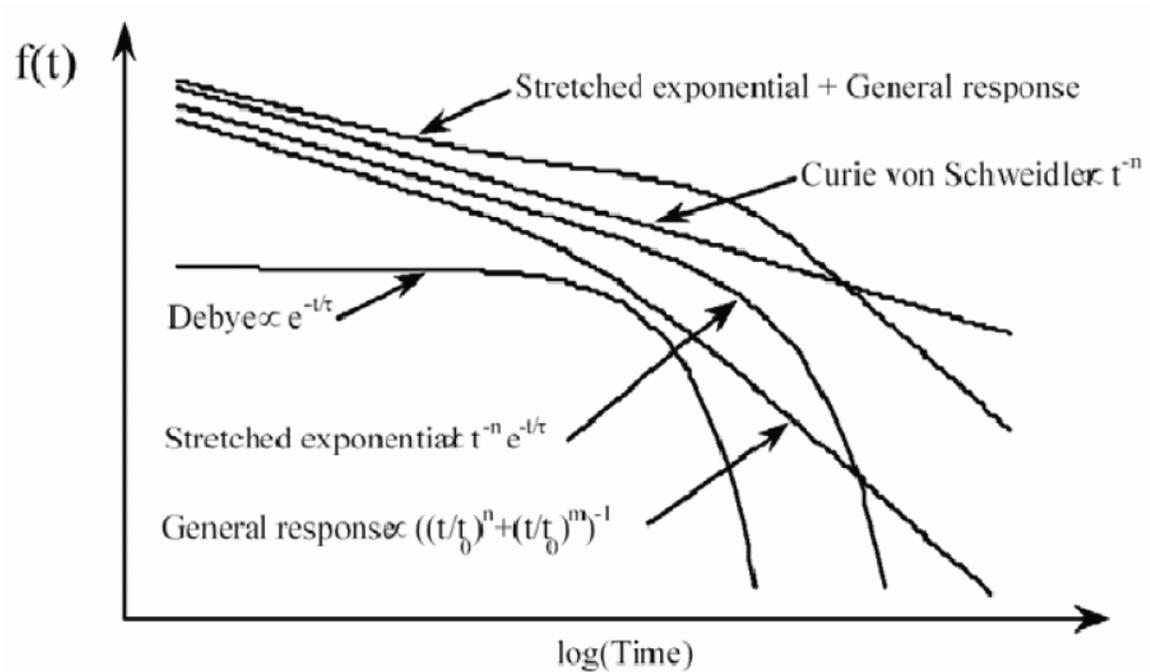


Figure 3.1. Différentes représentations de la fonction de réponse $f(t)$ [10, 50].

La mesure du courant de polarisation est donc une bonne façon de déterminer la fonction de réponse diélectrique du matériau. En pratique, il faut souvent attendre très longtemps pour que le courant atteigne la valeur du courant de conduction i_c . Jonscher [50] a montré que pour déterminer de manière approximative la fonction de réponse diélectrique d'un matériau à partir du courant de dépolarisation, il faut charger le matériau au moins dix fois plus longtemps que la durée de la mesure de décharge.

Sans attendre l'équilibre, la conductivité peut être déduite en additionnant l'équation (3.6) et (3.7) avec la condition (3.9), nous aurons alors [50]:

$$\sigma = \frac{\epsilon_0}{c_0 U_0} (I_{pol}(t) - I_{d\dot{p}ol}(t)) \quad (3.13)$$

3.4. Courant d'absorption et de résorption

Les courants transitoires, lors de l'application d'une tension et après coupure du champ électrique, sont représentés sur la figure 3.2. Ces courants sont appelés [40, 51, 53]

:

- Le courant d'absorption (i_a) : c'est le transitoire de courant enregistré entre la mise sous tension de l'isolant et l'instant à partir duquel le courant atteint son régime stationnaire et que l'on appelle le courant de conduction (i_c). Ce courant d'absorption correspond donc au courant de polarisation (I_{pol}) auquel on a retranché le courant de conduction (i_c).

$$i_a = I_{pol} - i_c \quad (3.14)$$

- Le courant de résorption $I_{dép}$: c'est le transitoire de courant enregistré entre l'arrêt de la tension et l'annulation du courant.

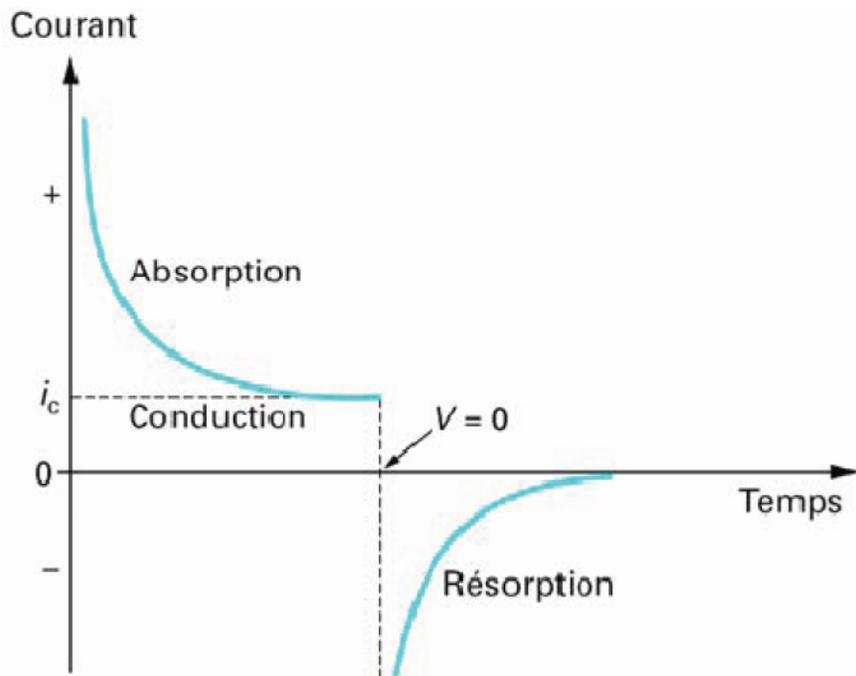


Figure 3.2. Allure des courants transitoires [40, 53].

L'évolution d'un échantillon d'un état de polarisation à un autre, de l'état polarisé à l'état dépolarisé ou vice versa, a fait l'objet de très nombreux travaux, dont nous ne citerons que les plus marquants.

Dès le début du siècle passé, Curie et Von Schweidler [10, 38, 40, 53], ont constaté que les courants transitoires en circuit fermé, dits courants d'absorption s'il s'agit du passage de l'état dépolarisé à l'état polarisé, ou de résorption dans le cas contraire, obéissent à des lois empiriques simples de la forme at^{-n} . Dans cette dernière, n est compris entre 0,5 et 1,5 et a est une constante dépendant du matériau étudié et des conditions expérimentales.

Ce n'est que dans les années 50 que certains chercheurs ont essayé, avec des résultats plus ou moins probants, de justifier la formule de Curie et Von Schweidler en introduisant une fonction de relaxation ou fonction mémoire $f(t)$. Comme l'indique Jonscher, [50], cette approche permet de montrer, en particulier, qu'un courant de dépolarisation ou de résorption ne peut être valablement interprété que pendant une durée très inférieure à la durée de polarisation préalable.

R. Coelo [54], indique que de telles lois ne peuvent être respectées que dans un intervalle de temps limité, puisqu'elles contiennent une divergence du courant à $t = 0$, et puisque la charge déplacée $q(t) = \int_0^t i(t) \cdot dt$ diverge pour $n > 1$ lorsque le temps tend vers l'infini.

Munich rapporté par [53] indique que les lois du type Curie et Von Schweidler ont été observées sur plus de 5 décades en temps. Ce n'est qu'avec l'évolution récente des techniques de mesure et des traitements des données que les courants d'absorption et de résorption peuvent maintenant être mesurés de quelques millisecondes à quelques semaines, soit sur près de 9 décades de temps.

3.5. Origines physique des courants transitoires dans un diélectrique

Les courants d'absorption et de résorption dans un diélectrique résultent essentiellement de la polarisation dipolaire, la polarisation interfaciale de type Maxwell-Wagner dans le cas de substances non homogènes, d'éventuelle charges d'espace et d'un processus d'ionisation [56, 57].

Takahashi et al. [58] ont étudié la conduction électrique de quelques échantillons de cellulose séchés pendant deux heures à une température de 100°C sous une pression de 10^{-5} torr. Ils ont remarqué que le courant de conduction en fonction de la tension appliquée n'était pas linéaire est que ce courant est une superposition d'un courant d'absorption et d'un courant stationnaire. Selon ces auteurs la conductivité de la cellulose est régie par l'équation suivante :

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left| -W_a / RT \right| \quad (3.15)$$

Où :

W_a : est l'énergie d'activation pour la mobilité des ions ;

σ_0 : est la conductivité en régime permanent ;

R : est la constante des gaz parfaits ;

T : représente la température absolue. Le courant d'absorption, quand à lui est dû à la polarisation interfaciale du type Maxwell-Wagner.

Selon les mêmes auteurs [58], le courant d'absorption aurait de deux origines :

1) Dans le premier cas, le courant serait dû à une réorientation des dipôles. En effet, sous l'action d'un champ électrique, un dipôle s'oriente et crée un déplacement de charge. Ce déplacement local, étendu à tout le volume du diélectrique, crée donc un courant du point de vue extérieur. Dans le cas d'une sollicitation continue, les dipôles vont s'orienter et atteindre une position d'équilibre qui correspond à l'annulation du courant de polarisation. Une fois la contrainte supprimée, les dipôles vont se redistribuer aléatoirement à cause de l'énergie thermique. Cette redistribution est à l'origine d'un

courant de dépolarisation (résorption). La figure (3.2) donne un aperçu de l'allure classique d'une polarisation suivie d'une dépolarisation. Nous voyons que la polarisation n'est pas instantanée. L'expression de la densité de courant est la suivante :

$$j(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (3.16)$$

En exprimant la permittivité en fonction de la fréquence, on a :

$$\varepsilon_r(t) = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.17)$$

Avec ε_∞ , la permittivité pour des fréquences infinies et ε_s celle correspondant à un champ statique (fréquence nulle) et τ la constante de vitesse de dépolarisation.

On a donc :

$$Q(t) = C(t) \cdot V = \varepsilon_r(t) C_0 V_0 \quad (3.18)$$

D'où, l'expression de la densité de courant

$$j(t) = \frac{C_0 V_0}{\tau} (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \exp(-t/\tau) \quad (3.19)$$

Montrant bien une décroissance exponentielle du courant avec la constante de temps τ .

Dans le cas des diélectriques réels, il n'est pas exclu de rencontrer différents types de dipôles faisant apparaître différentes constantes de temps τ_i . Dans un tel cas l'expression de la densité de courant est donnée par :

$$j(t) = C_0 V_0 (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \sum_i \frac{1}{\tau_i} \exp(-t/\tau_i) \quad (3.20)$$

La polarisation dipolaire du papier est liée à la présence des molécules polaires. Ces molécules proviennent des molécules d'eau libres ou liées à la matrice de cellulose ou peuvent être des molécules de la cellulose elle-même. Les grandes dimensions des dipôles de la cellulose constituée de macromolécules aussi bien qu'une interaction entre eux représentent un grand inconvénient pour leur orientation dans le champ électrique. Par conséquent, les courants liés à la polarisation (d'absorption) et dépolarisation (résorption)

varient plus lentement et peuvent avoir des durées de quelques millisecondes à quelques heures voire quelques jours dans certains cas [56].

2) Dans le second cas, le courant d'absorption proviendrait de la même origine que les courants stationnaires et il serait régi par un mouvement des porteurs ioniques dans le polymère. Selon [58], Saito a étudié les phénomènes de conduction de plusieurs polymères pour parvenir à dégager une loi empirique liant la conductivité σ d'un matériau au temps de relaxation τ du courant d'absorption.

$$\sigma = \varepsilon_0 \frac{i\varepsilon}{\tau} \quad (3.21)$$

Où :

ε_0 : est la permittivité du vide ;

ε : est la force de relaxation des courants d'absorption.

G. M. Urbani et R. S. Brooks [59] indiquent que le courant d'absorption est le résultat d'une dissociation électrolytique menant à la génération de porteurs de charge à partir des impuretés originellement présentes dans le matériau. Ces impuretés ne sont jamais totalement éliminées quelle que soit la rigueur avec laquelle est mené le processus de la fabrication de la pulpe du papier.

Comme le souligne Seguy [40], il est courant dans la pratique de trouver des comportements anormaux, où le courant de résorption change de polarité au cours du temps (voir figure 3.3). Ces comportements sont le plus souvent la conséquence d'une charge d'espace présente dans le matériau avant la polarisation ou de la création lors de cette même polarisation d'une distribution non uniforme de charges. Lors de la mise en court circuit d'un échantillon polarisé et chargé de façon non uniforme, les charges vont se redistribuer de telle manière à ce que la différence de potentiel à ses bornes soit nulle. Il en résulte un courant de résorption inhabituel.

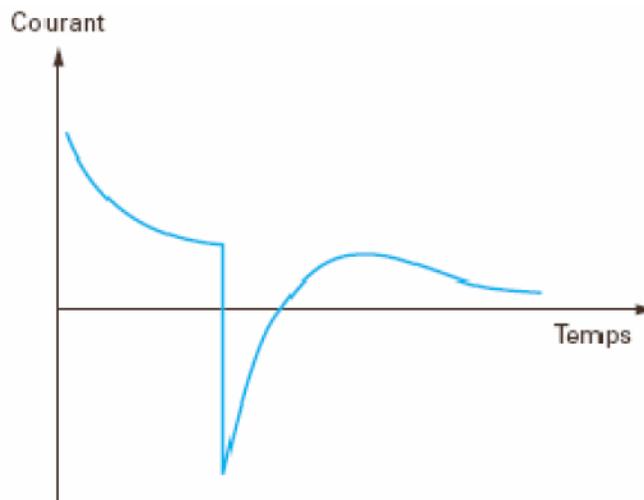


Figure 3.3 : Courants transitoires anormaux [40].

Lorsque le complexe huile-papier est soumis à une contrainte thermique, il subit une dégradation qui peut se manifester par la génération de produits de vieillissement ionisables et polarisables pouvant permettre une polarisation par charge d'espace. Cette polarisation de charge d'espace participe à la génération d'un courant d'absorption [1,55].

A l'aide de deux propriétés considérées comme indépendantes, la permittivité ε et la conductivité σ , les travaux de Maxwell-Wagner, rapportés par [38, 40], ont établi une théorie de l'absorption qui concerne les milieux diélectriques hétérogènes. Dans un diélectrique homogène, ils ont montré qu'une charge résiduelle ne peut apparaître. Par contre, l'association de deux diélectriques homogènes possédant des permittivités et des conductivités différentes est à l'origine du phénomène d'absorption. Il peut s'agir de deux matériaux solides, mais également d'un complexe constitué d'un solide et d'un liquide (le papier imprégné). Pour mettre en évidence ce phénomène d'absorption, ils ont considéré deux diélectriques 1 et 2, caractérisés par des permittivités ε_1 et ε_2 et des conductivités σ_1 et σ_2 . L'application d'un échelon de tension d'amplitude U_0 à un tel assemblage va générer des champs électriques E_1 et E_2 dans ces diélectriques mis en série. Ils ont obtenu des courants i_1 et i_2 , quantités généralement différentes, ce qui mène à une

accumulation de charges à l'interface avec une discontinuité du déplacement électrique ($D_1 \neq D_2$). L'accumulation de charges à l'interface a pour conséquence d'abaisser le champ appliqué au matériau de plus forte conductivité et de l'augmenter pour celui ayant la plus faible.

La charge $q(t)$ accumulée à l'interface des deux diélectriques est reliée aux valeurs instantanées $E_1(t)$ et $E_2(t)$ des champs électriques par :

$$\varepsilon_{r2}\varepsilon_0 E_2(t) - \varepsilon_{r1}\varepsilon_0 E_1(t) = q_{1,2}(t) \quad (3.22)$$

soit, en dérivant par rapport au temps :

$$\varepsilon_{r2}\varepsilon_0 \frac{dE_2(t)}{dt} - \varepsilon_{r1}\varepsilon_0 \frac{dE_1(t)}{dt} = \frac{dq_{1,2}(t)}{dt} = i_{c1}(t) - i_{c2}(t) \quad (3.23)$$

le courant traversant chacun des diélectriques s'écrit alors:

$$i_1(t) = i_{c1}(t) + \varepsilon_{r1}\varepsilon_0 \frac{dE_1(t)}{dt} \quad (3.24)$$

$$i_2(t) = i_{c2}(t) + \varepsilon_{r2}\varepsilon_0 \frac{dE_2(t)}{dt} \quad (3.25)$$

Dans le cas simple où les deux diélectriques ont la même épaisseur l , on aboutit à :

$$E_1(t) = \left[\frac{\sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \frac{U_0}{l} + \frac{U_0}{l} \frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2}} - \frac{\sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \frac{U_0}{l} \right] \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad (3.26)$$

$$i_1(t) = \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \frac{U_0}{l} + \frac{U_0}{l(\sigma_1 + \sigma_2)} \left[\left(\frac{\sigma_1 \varepsilon_{r2} - \sigma_2 \varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2}} \right) \right] \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad (3.27)$$

Nous voyons bien dans la relation (3.27), que le courant est composé d'un courant de conduction indépendant du temps, fonction uniquement des conductivités des deux diélectriques et d'un courant d'absorption d'allure exponentielle décroissant avec une constante de temps dépendant des conductivités et des permittivités relatives. Le courant d'absorption est nul si $\sigma_1 \varepsilon_2 = \sigma_2 \varepsilon_1$

Des expressions similaires à (3.26) et (3.27) peuvent être évidemment établies pour $E_2(t)$ et $i_2(t)$.

Il est à remarquer que lorsque le temps tend vers l'infini, c'est-à-dire pour un régime stationnaire, nous aurons :

$$i_1 = i_2 = \frac{\sigma_1 \sigma_2 U_0}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (3.28)$$

3.6. Description de la méthode PDC (Polarization and Dépolarization Currents)

La méthode des courantes de polarisation et de dépolarisation dite PDC, par abréviation (Polarization and Deplarization Currents) [10,51,52,53,56,57,59,60,61], est une méthode mettant en évidence les processus de polarisation dans une isolation. C'est une méthode qui fournit également des données sur l'état général de l'isolement tout en offrant des possibilités d'appréciation du vieillissement électrique et thermique d'une isolation au papier imprégné. Elle constitue un moyen permettant d'obtenir des informations sur l'état du papier dans les systèmes isolants à papier huilé, et cela sans nécessiter de prélèvements d'échantillons de papier. Elle est basée sur l'application d'un échelon de tension d'amplitude U_0 pendant un temps t_p à un système d'électrodes plan-plan contenant l'échantillon à tester. Ce dernier est ensuite mis en court-circuit pendant un certain temps t_p . Le courant de polarisation est mesuré pendant l'application de l'échelon de tension par contre le courant de dépolarisation (courant résorption) est mesuré pendant le court-circuit (figure 3.4).

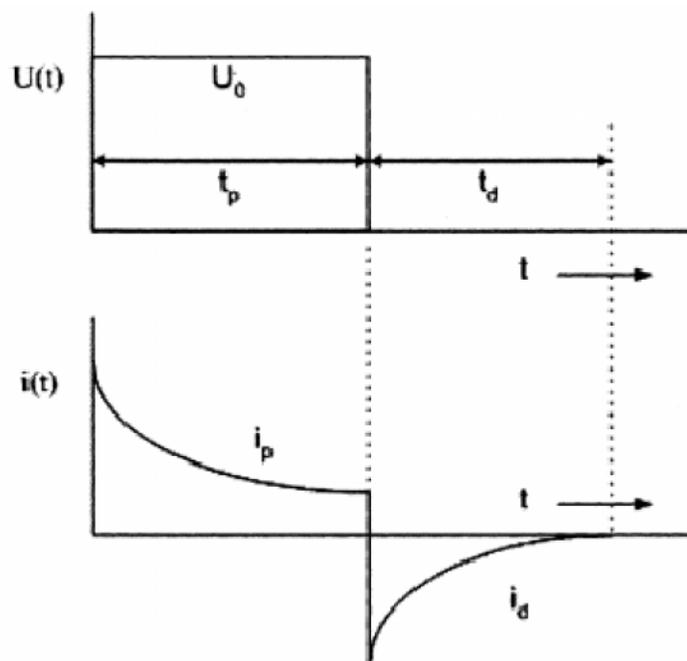


Figure 3.4. Représentation schématique de la méthode PDC [72].

Après avoir traité le sujet qui nous préoccupe sur le plan théorique, nous nous sommes attelés à réaliser les expériences relatives à la réponse des diélectriques à une sollicitation en tension continue. Le dispositif expérimental mis en place au laboratoire a déjà servi à plusieurs travaux traitant des thèmes semblables au notre [13,62].

4.1. Dispositif expérimental

Les échantillons de papier testés nous ont été fournis par la firme Electro-Industries sise à Azazga, ils proviennent de lots destinés à la construction des transformateurs. Le diamètre de nos échantillons est de 80 mm et leur épaisseur de 0.5 mm. Le dispositif expérimental est constitué d'un système comportant deux électrodes planes. Le plan relié à la terre est muni d'un anneau de garde nous permettant d'éviter les erreurs pouvant provenir d'une conduction superficielle. La source de tension et l'électromètre sont combinés dans un même appareil. Les valeurs des courants donnés par l'électromètre sont transférées via une interface GPIB (General Purpose Interface Bus) utilisant un logiciel approprié à un micro-ordinateur. Les variations de la teneur en eau sont réalisées par chauffage dans un four à la température de 90°C. Les tensions d'essai appliquées aux différents échantillons sont de 500 et 1000 volts. La durée de chacune des séquences de charge et de décharge est de 1000 secondes. Les teneurs en eau ayant l'objet de notre étude sont de 1 %, 3.5% et 6.5%. Les essais ont été réalisés avec des échantillons de papier non imprégné et de papier imprégné d'une huile minérale ayant un facteur de pertes diélectriques inférieur à 10^{-4} . La représentation schématique du dispositif expérimental est donnée sur la figure 4.1.

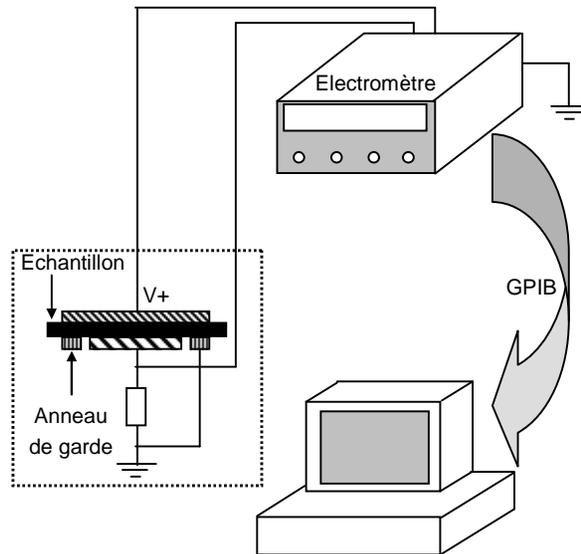


Figure 4.1. Schéma synoptique du dispositif expérimental.

4.2. Séquences de charge/décharge pour différents teneurs en eau

Afin d'examiner les courants de charge et le possible effet de la mise en court-circuit sur le comportement du matériau nous avons été amenés à faire subir à l'échantillon deux cycles de charge/décharge. Les échantillons présentant différents taux d'humidité sont chargés durant un temps T_C puis mis en court-circuit durant un temps T_d . Dans notre cas T_C et T_d ont la même valeur de 1000 s. Nous rappelons que les deux niveaux de tension utilisés sont 500 et 1000 V.

4.2.1. Teneur en eau de 1 %

Les séquences de charge/décharge pour des teneurs en eau du papier de 1% sont représentées sur les figures 4.2 et 4.3 pour le papier non imprégné avec des tensions d'essai de 500 et 1000 volts respectivement. De façon analogue, les séquences correspondant au papier imprégné sont représentées sur les figures 4.4 et 4.5 respectivement.

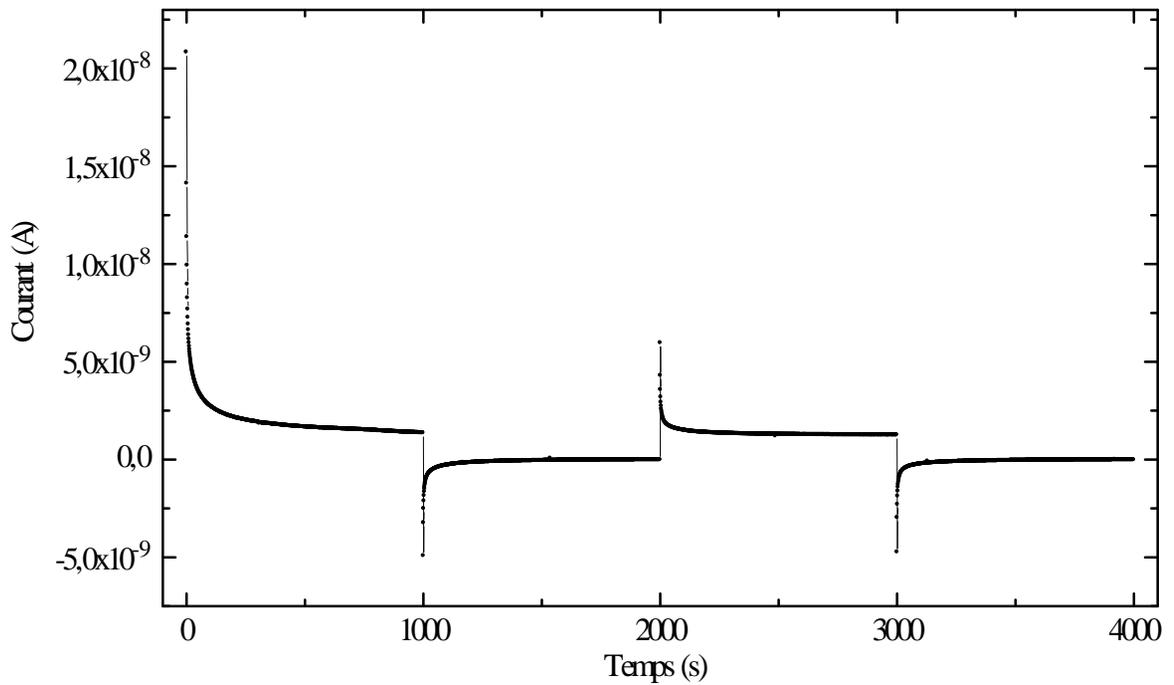


Figure 4.2. Séquences de charge/décharge pour une teneur en eau de 1%.

Papier non imprégné et une tension d'essai de 500 V.

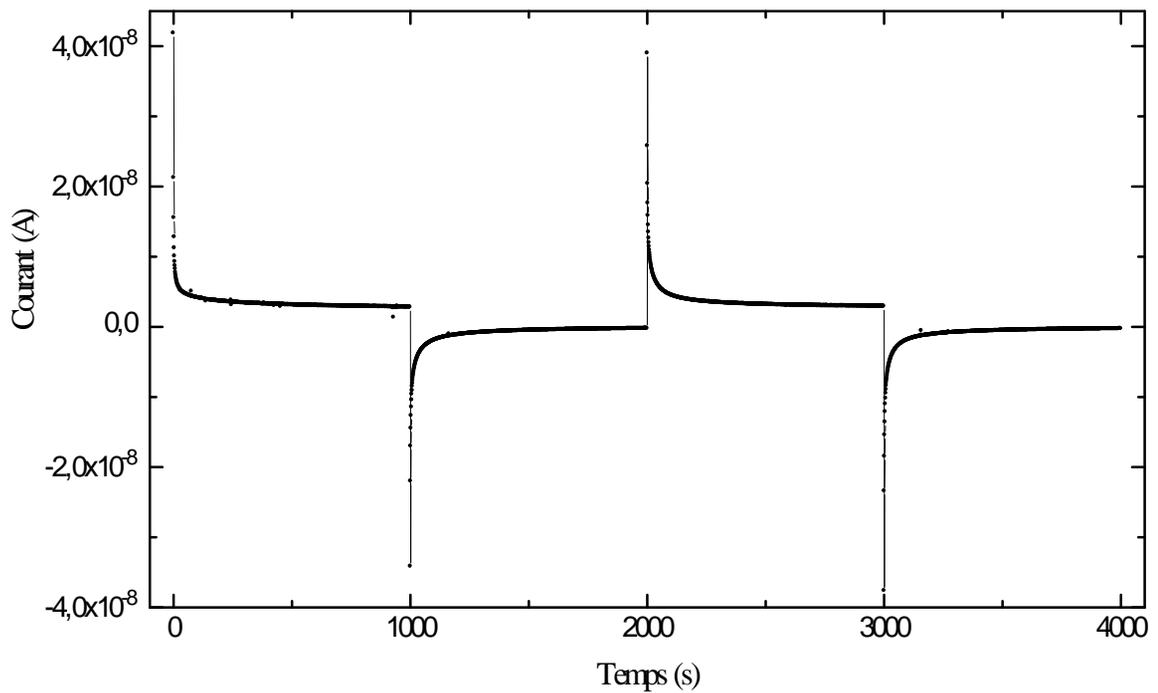


Figure 4.3. Séquences de charge/décharge pour une teneur en eau de 1%.

Papier non imprégné et une tension d'essai de 1000 V.

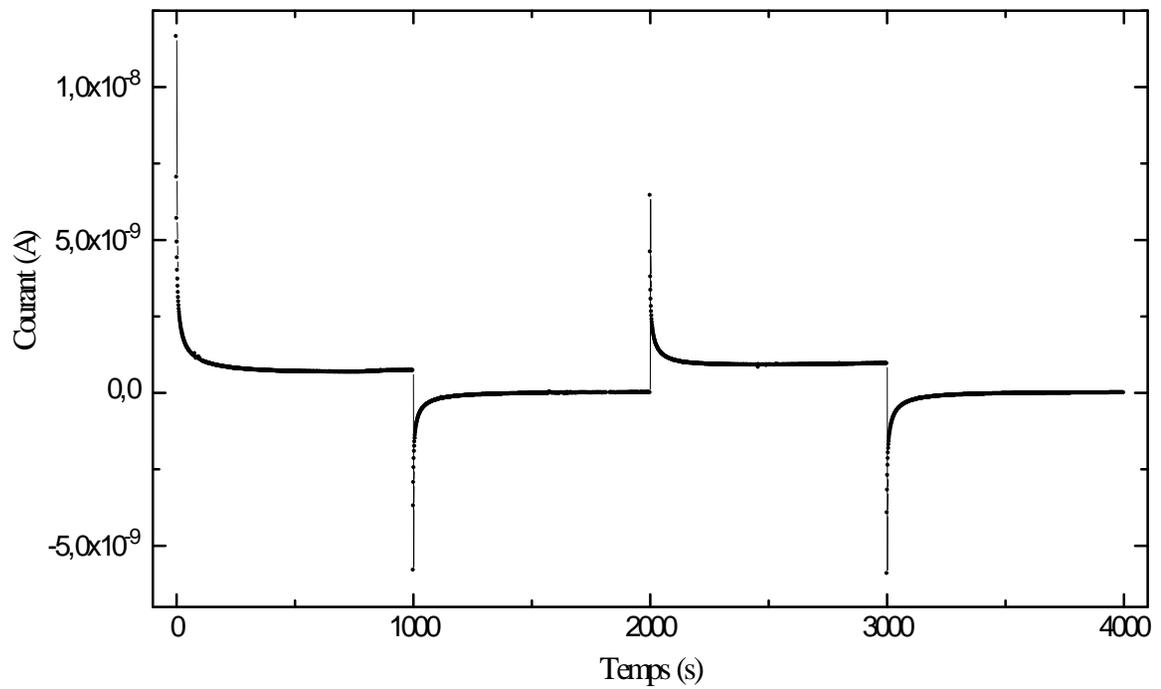


Figure 4.4. Séquences de charge/décharge pour une teneur en eau de 1%.
Papier imprégné et une tension d'essai de 500 V.

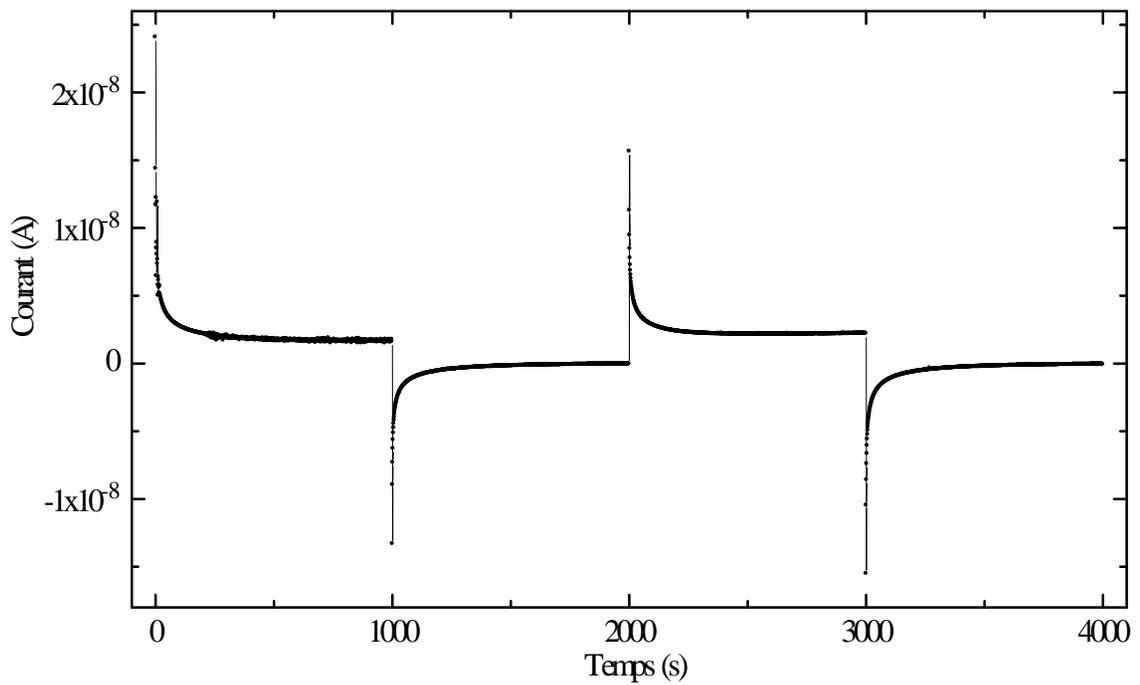


Figure 4.5. Séquences de charge/décharge pour une teneur en eau de 1%.
Papier imprégné et une tension d'essai de 1000 V.

La forme du courant est conservée pour les deux tensions et pour les deux cas imprégné et non imprégné. Pour les deux séquences de charge/décharge, le courant tend vers un courant stationnaire correspondant au courant de conduction, le courant d'absorption prenant des valeurs négligeables. Le courant d'absorption est plus élevé pour une tension de 1000 V, que le papier soit imprégné ou pas. Cela semble naturel, plus la tension est élevée, plus les charges piégées aux interfaces augmentent. Nous pouvons constater aisément que le courant traversant le papier imprégné est inférieur à celui correspondant au papier non imprégné, la nature de l'interface ayant changé (cellulose-huile au lieu de cellulose-air). Le courant de résorption est faible dans les quatre cas.

4.2.2. Teneur en eau de 3.5 %

Les séquences de charge/décharge pour une teneur en eau de 3.5% sont représentées sur les figures 4.6 et 4.7 pour le papier non imprégné et des tensions de 500 et 1000 V. Pour le papier imprégné, les séquences sont représentées sur la figure 4.8 pour la tension de 500 V et la figure 4.9 pour la tension de 1000 V.

Contrairement au cas de la teneur en eau de 1%, dans les deux cas, imprégné ou non et pour les deux tensions, le courant ne tend pas vers un régime stationnaire mais augmente pour les deux séquences de charge. Le courant est plus élevé dans le cas de la deuxième séquence. Cela pourrait trouver une explication dans une dégradation du papier due à une action simultanée du champ électrique et de réactions chimiques faisant intervenir l'eau.

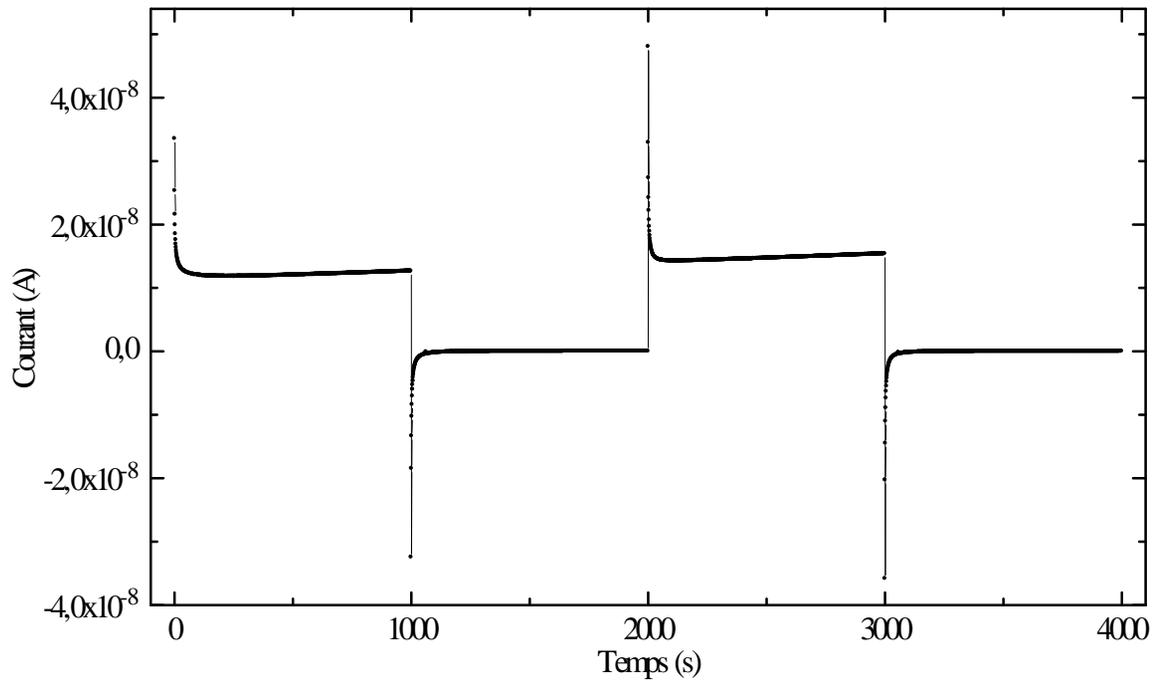


Figure 4.6. Séquences de charge/décharge pour une teneur en eau de 3.5%.

Papier non imprégné et une tension d'essai de 500 V.

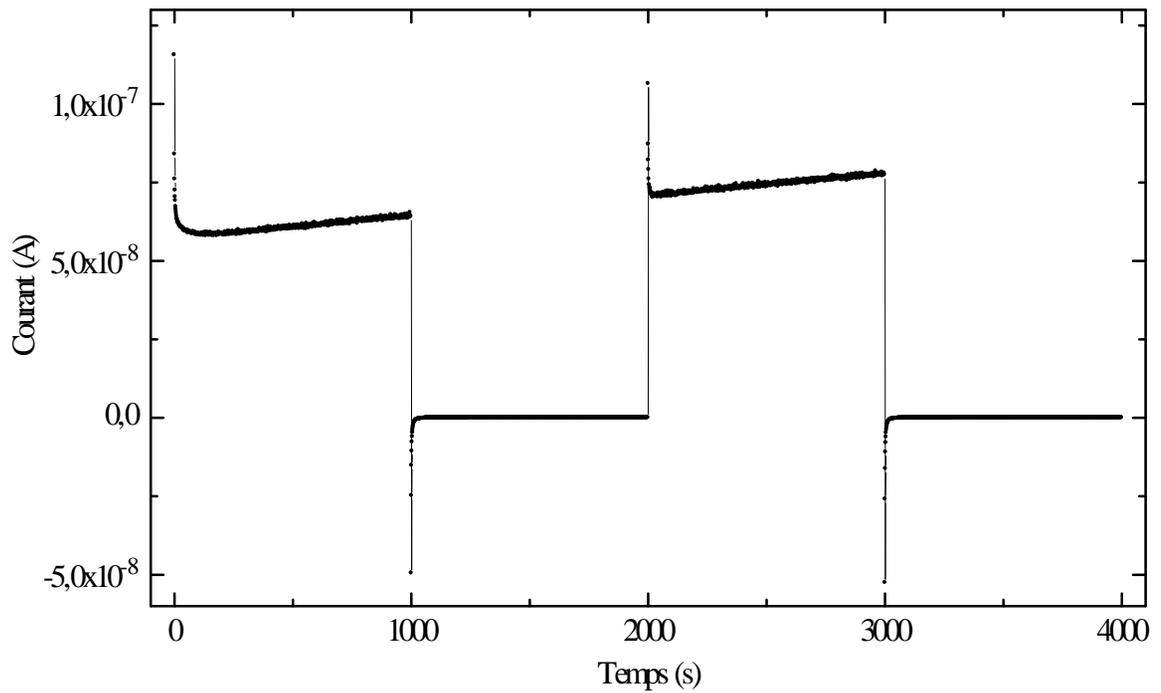


Figure 4.7. Séquences de charge/décharge pour une teneur en eau de 3.5 %.

Papier non imprégné et une tension d'essai de 1000 V.

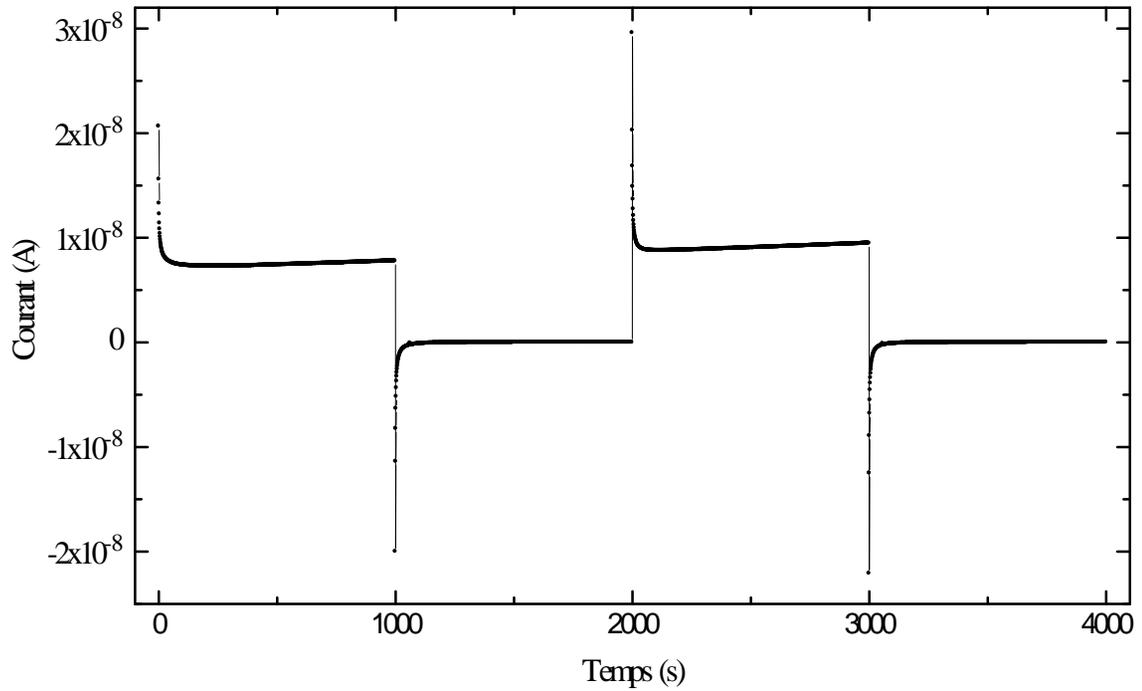


Figure 4.8. Séquences de charge/décharge pour une teneur en eau de 3.5 %.

Papier imprégné et une tension d'essai de 500 V.

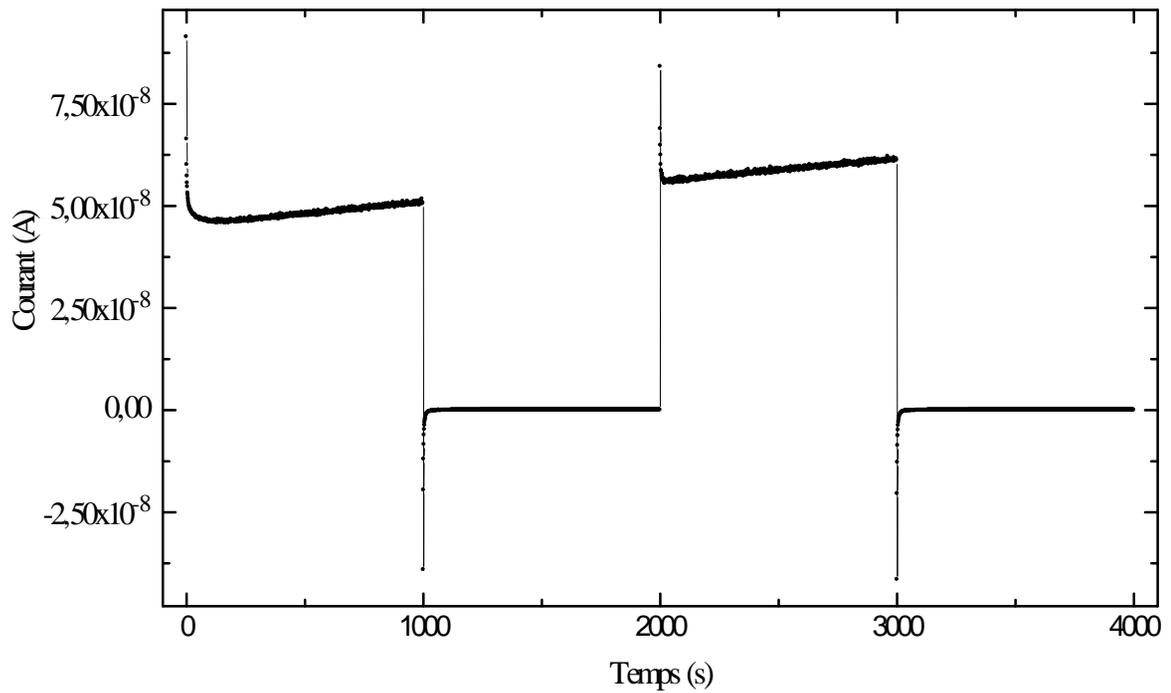


Figure 4.9. Séquences de charge/décharge pour une teneur en eau de 3.5%.

Papier imprégné et une tension d'essai de 1000 V.

4.2.3. Teneur en eau de 6.5%

Sur les figures 4.10 et 4.11 sont représentées les séquences charge/décharge pour une teneur en eau du papier non imprégné de 6.5% et des tensions de 500 et 1000V. Les séquences charge/décharge pour du papier à 6.5% imprégné sont représentées sur les figures 4.12 et 4.13 pour des tensions de 500 et 1000V respectivement.

Que le papier soit imprégné ou pas, le courant de la première séquence présente une augmentation. Cette augmentation est présente sur un temps plus lent, quand la tension appliquée est de 1000 V. Cette augmentation a déjà été attribuée à l'augmentation des porteurs de charge par dissoaciation ionique [62]. Toutefois cette dissociation ne pouvant se poursuivre indéfiniment, nous remarquons une autre allure à la seconde séquence de charge.

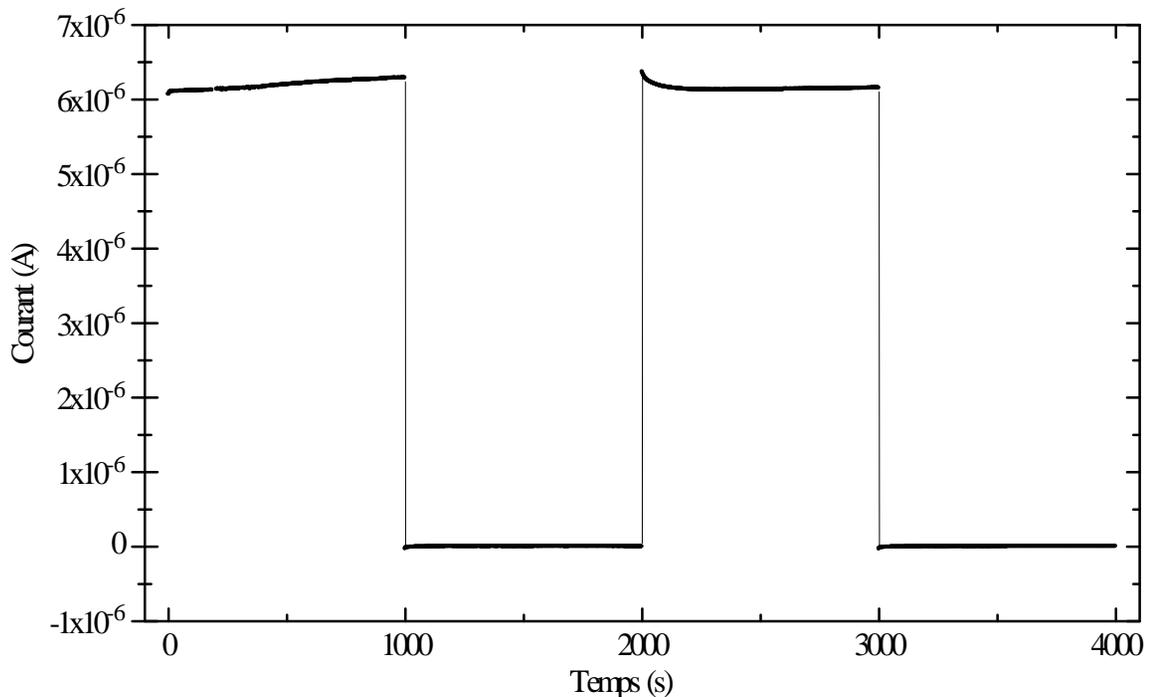


Figure 4.10. Séquences de charge/décharge pour une teneur en eau de 6.5%.

Papier non imprégné et une tension d'essai de 500 V.

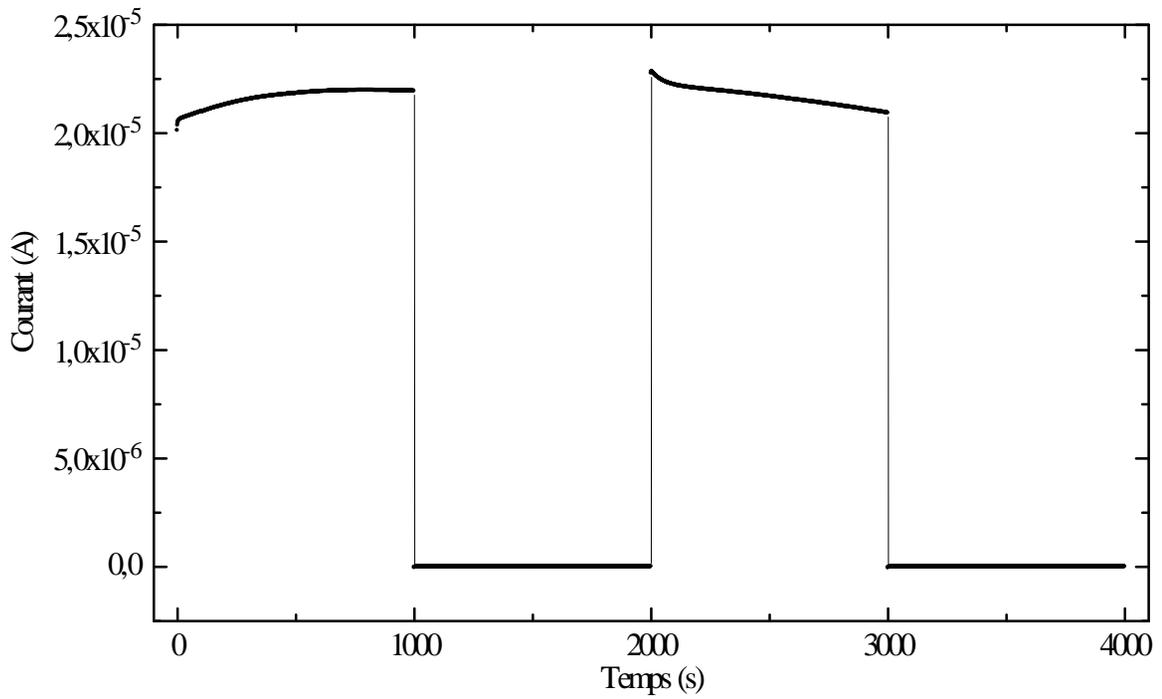


Figure 4.11. Séquences de charge/décharge pour une teneur en eau de 6.5%.
Papier non imprégné et une tension d'essai de 1000 V.

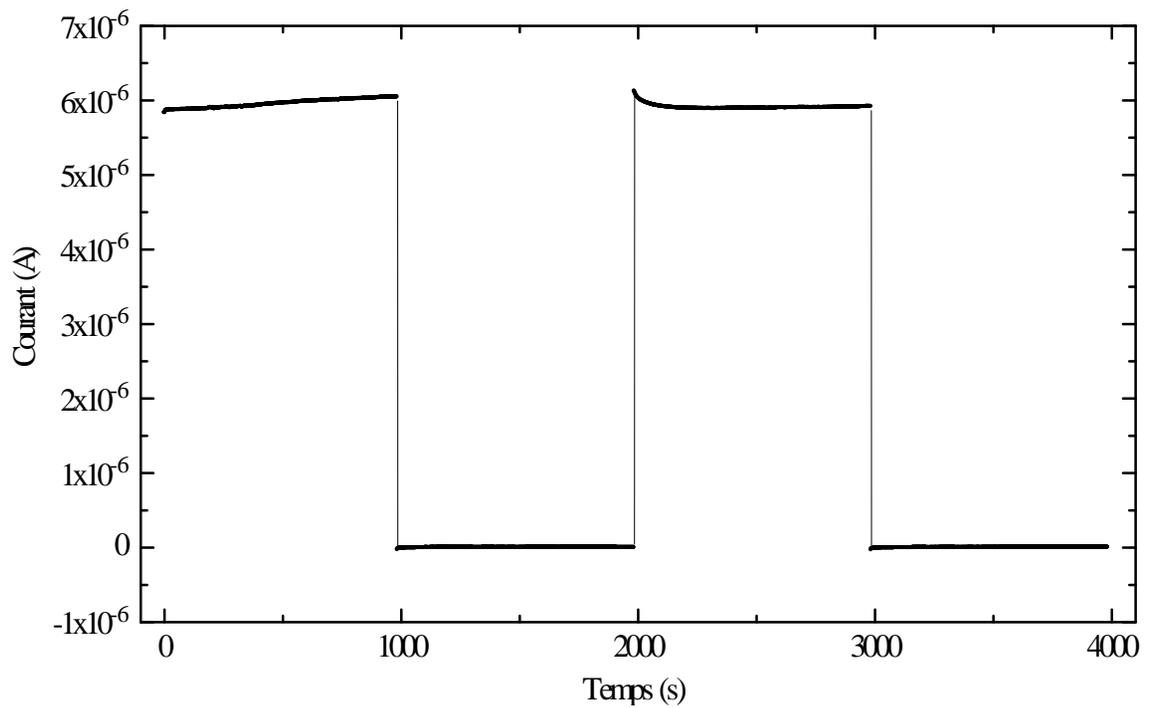


Figure 4.12. Séquences de charge/décharge pour une teneur en eau de 6.5%.
Papier imprégné et tension d'essai de 500 V.

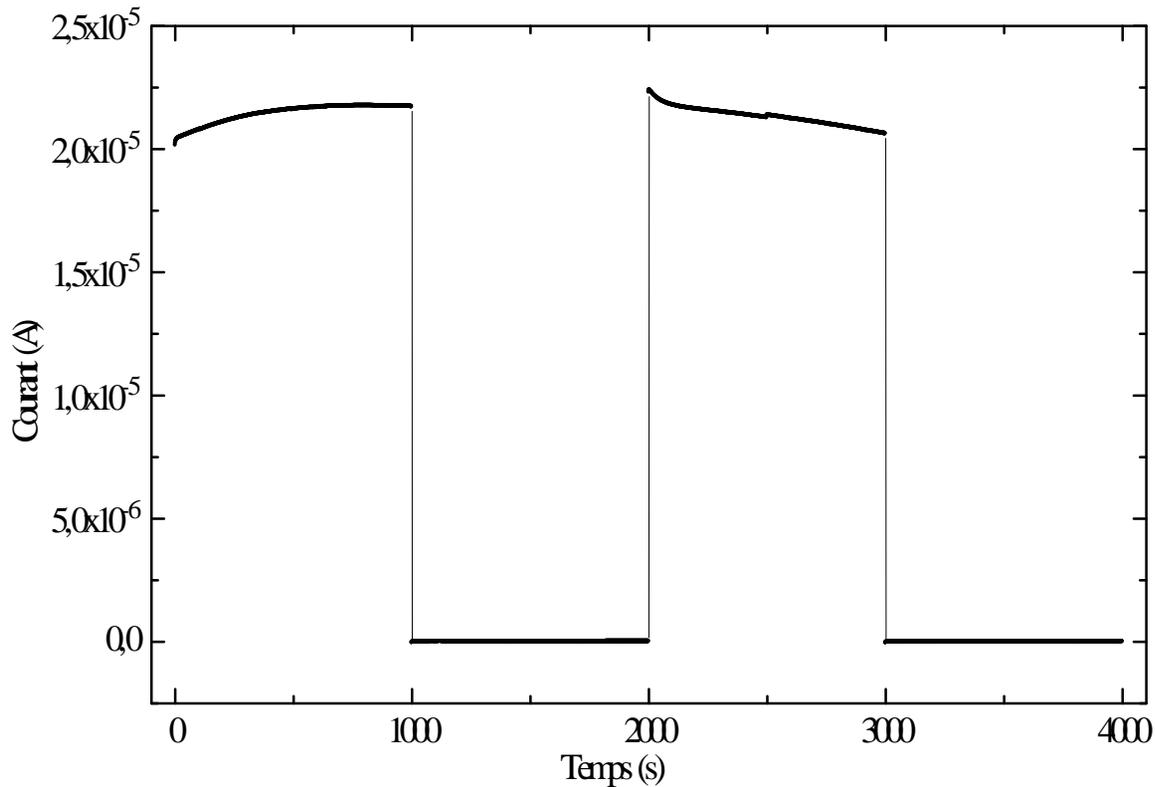


Figure 4.13. Séquences de charge/décharge pour une teneur en eau de 6.5%.
Papier imprégné et une tension d'essai de 1000 V.

4.3. Discussion des résultats expérimentaux

4.3.1. Influence de la teneur en eau

La forme des séquences charge/décharge est très affectée par la teneur en eau. Dans le cas des faibles teneurs en eau, l'imprégnation n'affecte pas la forme du courant et cela semble indiquer que c'est la teneur en eau du papier qui détermine la forme du courant de charge et de décharge. Cela pourrait s'avérer très intéressant puisque une corrélation entre la teneur en eau du papier et la forme du courant pourrait être mise à profit pour caractériser l'isolation dans un transformateur. Cela est d'autant plus valable si l'on sait que l'eau présente dans l'huile dans un transformateur migre vers le papier.

4.3.2. Séquences de charge

En vue d'examiner la différence entre les différents courants, nous avons tracé séparément les séquences de charge pour chaque échantillon.

4.3.2.1. Teneur en eau de 1%

Les séquences de charge pour une teneur en eau de 1% sont représentées sur la figure 4.14 pour le papier imprégné et 4.15 pour le papier non imprégné.

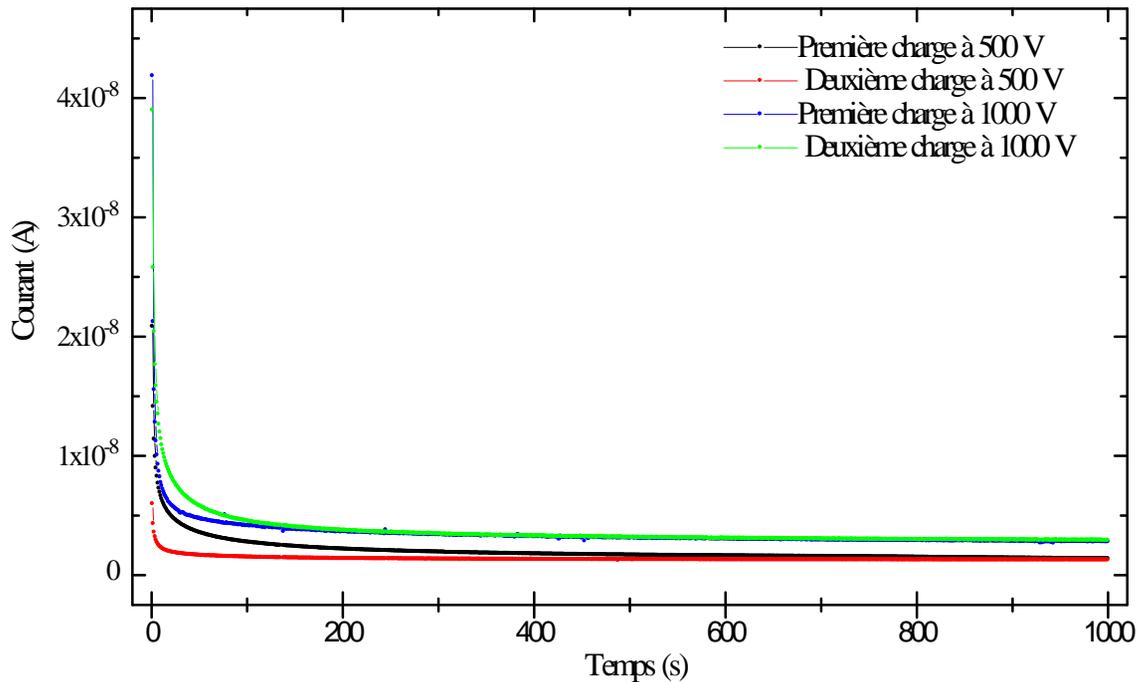


Figure 4.14. Séquences de charge pour le papier non imprégné
Teneur en eau : 1%.

Nos résultats appellent certaines remarques :

- Pour une tension de 500 V appliquée à l'échantillon, le courant de première charge passe au dessus du courant de la deuxième charge jusqu'à 400 s environ pour le papier non imprégné. On retrouve ce phénomène dans le papier imprégné jusqu'à 50 s environ. Ceci pourrait provenir d'impuretés conductrices que la première charge aurait réorganisées. Au-delà de 50 s, les courants stationnaires se superposent. Notons que le courant correspondant à la deuxième charge tend rapidement vers le courant stationnaire.
- Dans le cas d'une tension d'essai de 1000 V, le courant lors de la seconde charge passe au dessus de celui mesuré lors de la première charge jusqu'à un temps de 100 s dans

le cas du papier non imprégné. Après cela, les courants de charge se superposent. Dans le cas du papier imprégné, la deuxième charge fait apparaître des courants plus élevés à partir de 100 s. L'écart entre les courants de charge pourrait être associé à la présence de charges résiduelles n'ayant pas pu être neutralisées pendant le court-circuit.

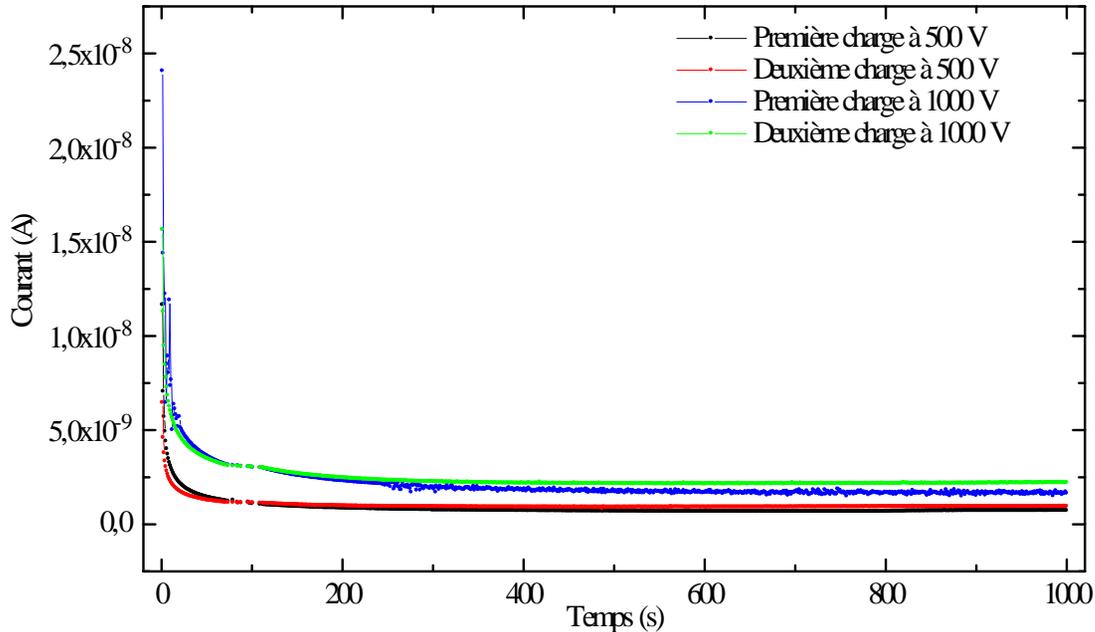


Figure 4.15. Séquences de charge pour le papier imprégné

Teneur en eau : 1%.

4.3.2.2. Teneur en eau de 3.5%

Les séquences de charge pour une teneur en eau de 3.5% sont représentées sur les figures 4.16 et 4.17. Les courants correspondant à la deuxième charge sont supérieurs à ceux de la première charge pour les deux niveaux de tension. L'écart entre les deux charges est plus accentué dans le cas de la tension de 1000 V. Dans le cas de la tension de 500 V, les courants tendent vers le courant stationnaire au bout de 50 s environ. Les courants correspondant à la tension de 1000 V augmentent à partir de 100 s environ.

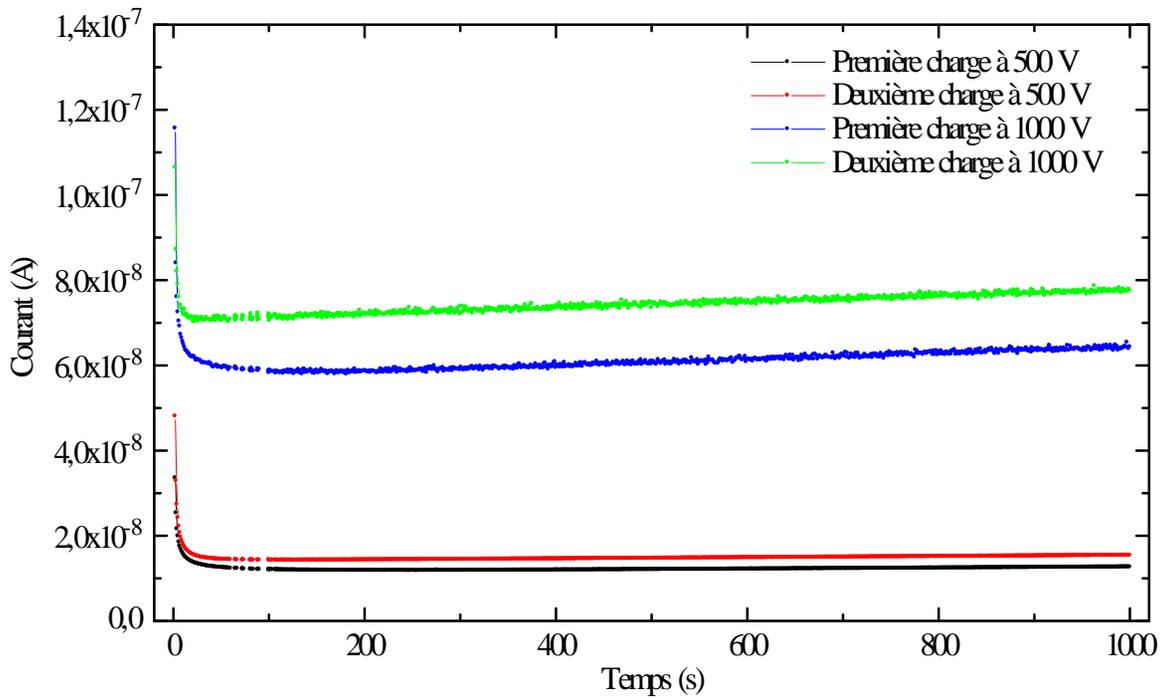


Figure 4.16. Séquences de charge pour le papier non imprégné

Teneur en eau : 3.5 %.

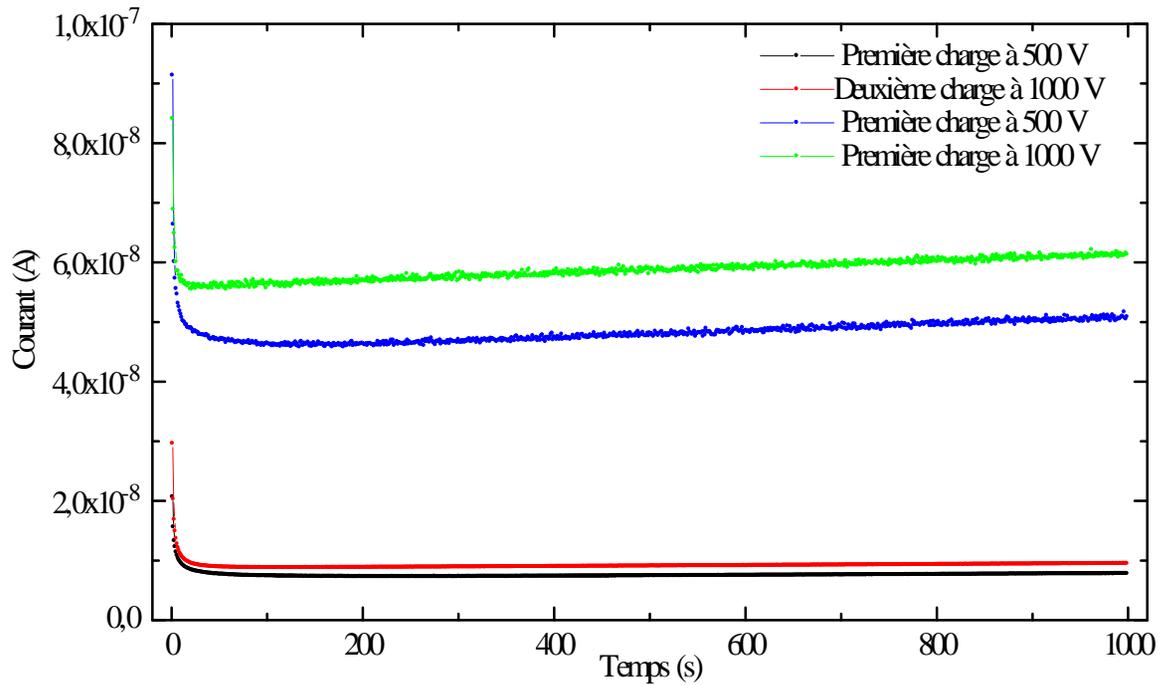


Figure 4.17. Séquences de charge pour le papier imprégné

Teneur en eau : 3.5 %.

4.3.2.3. Teneur en eau de 6.5%

Les séquences de charge pour du papier ayant une teneur en eau de 6.5% sont données par les graphes des figures 4.18 et 4.19. Pour cette teneur, les courants de charge sont du même ordre de grandeur. Ceci semble faire prévaloir le fait que c'est le papier qui détermine la tenue d'une isolation imprégnée à court terme alors que l'imprégnant intervient pour empêcher l'absorption d'air par le papier. Dans le cas du papier imprégné ou non et une tension de 500 V, le courant de conduction (courant stationnaire) est assez rapidement atteint. Pour une tension de 1000 V, la première et la deuxième charge se comportent différemment. Le courant de la première charge augmente et celui de la deuxième charge diminue et le régime stationnaire n'est pas atteint au bout de 1000 s dans les deux cas. Le courant de la deuxième charge est supérieur au courant de la première et la tendance s'inverse au bout de 500 s environ dans le cas du papier non imprégné et au bout de 380 s environ dans le cas du papier imprégné.

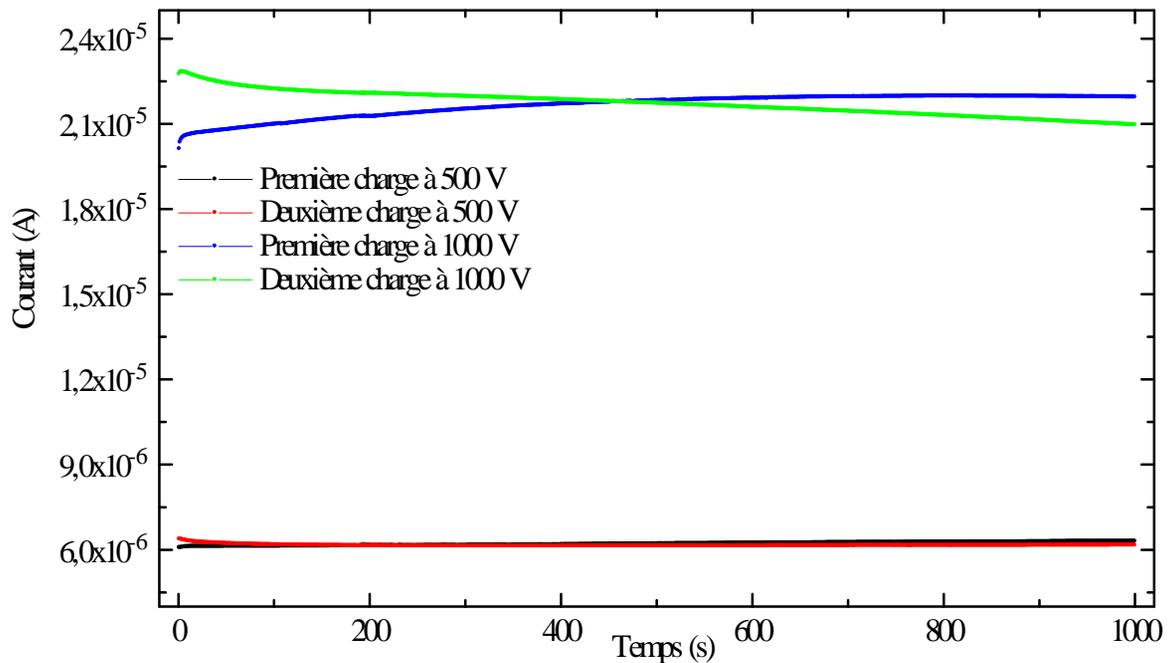


Figure 4.18. Séquences de charge pour le papier non imprégné

Teneur en eau : 6.5 %.

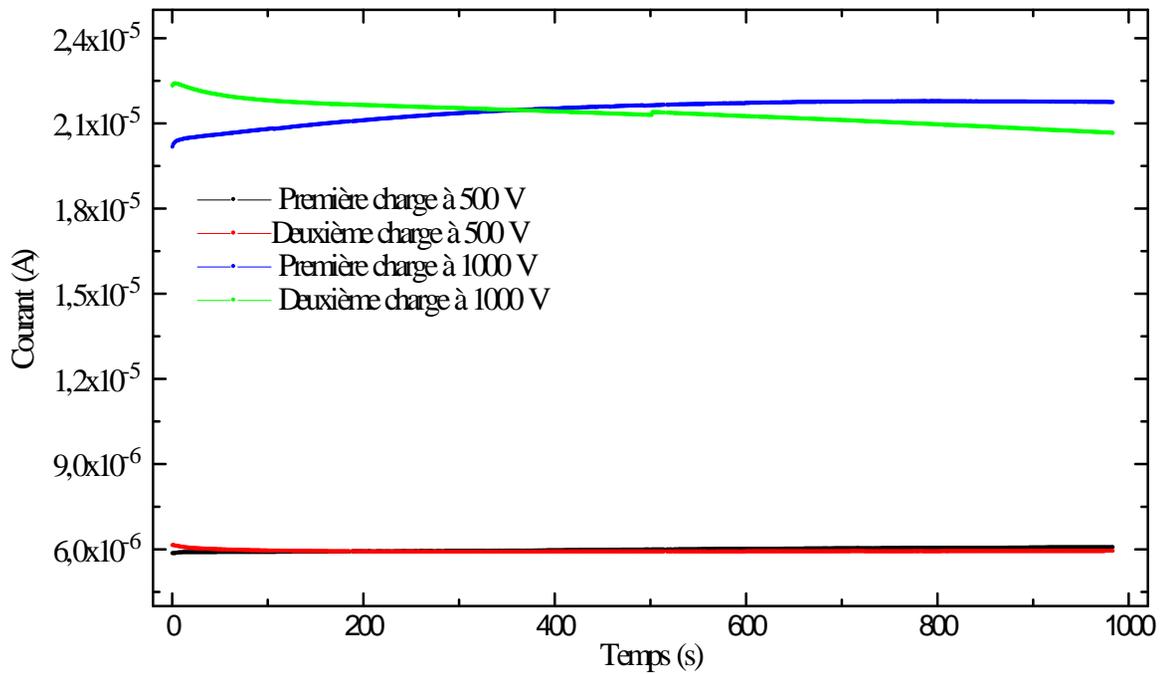


Figure 4.19. Séquences de charge pour le papier imprégné

Teneur en eau : 6.5 %.

4.3.3. Séquences de décharge

Les séquences de décharge ont été tracées séparément pour les différents teneurs en eau.

4.3.3.1. Teneur en eau de 1%

Les différentes séquences de décharge pour une teneur en eau de 1% sont données sur les figures 4.20 et 4.21 pour le papier non imprégné et imprégné respectivement.

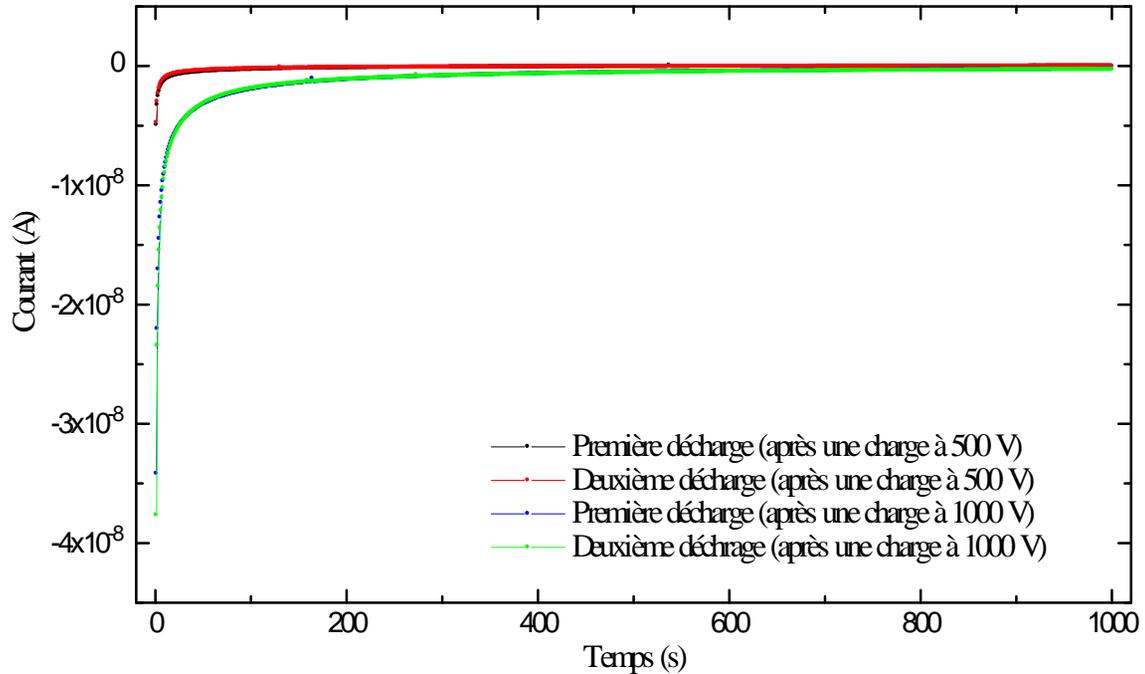


Figure 4.20. Séquences de décharge pour le papier non imprégné.

Teneur en eau : 1%.

Que se soit dans le cas du papier imprégné ou dans celui du non imprégné, le courant de décharge succédant à une charge à 1000 V est supérieur à celui obtenu avec une charge à 500 V. Notons toutefois que les courants de décharge se superposent dans le cas du papier imprégné. Dans ce cas également, la deuxième décharge donne des courants légèrement au dessus de ceux obtenus pour la première charge à 1000 V. Ce décalage disparaît après un temps de 300 s environ.

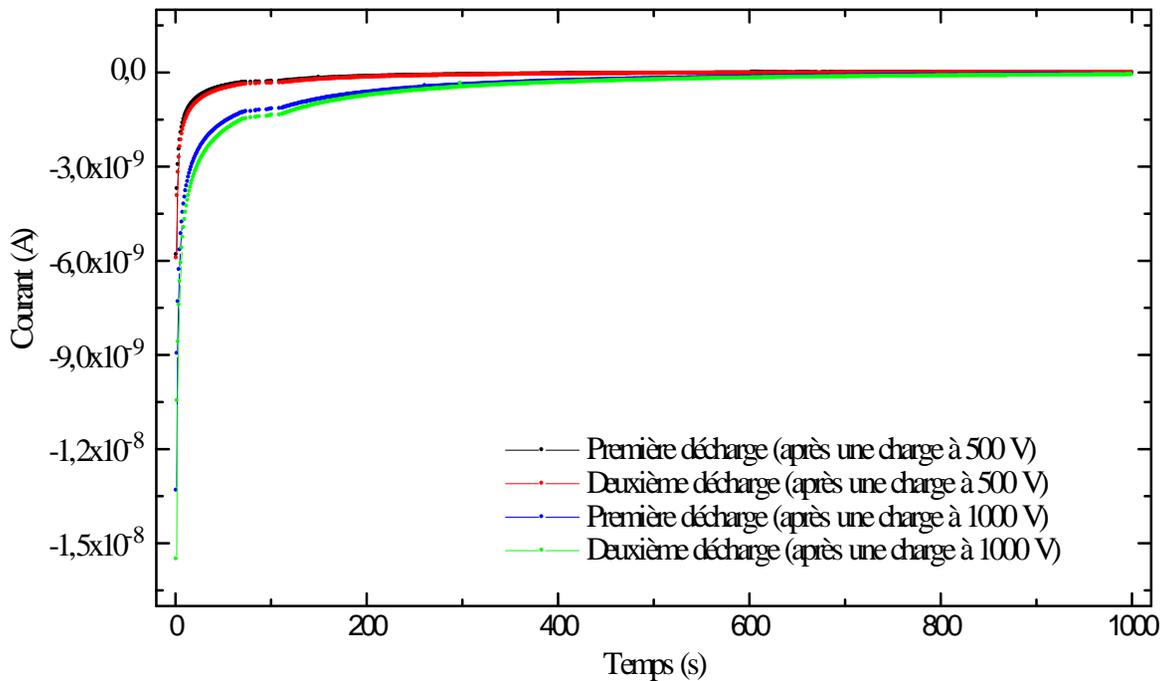


Figure 4.21. Séquences de décharge pour le papier imprégné.

Teneur en eau : 1%.

4.3.3.2. Teneur en eau de 3.5%

Les séquences de décharge pour une teneur en eau de 3.5% sont représentées sur les figures 4.22 et 4.23. Hormis un léger décalage au départ, les séquences de décharge se superposent pour le papier non imprégné comme pour le papier imprégné et cela pour les deux tensions de charge.

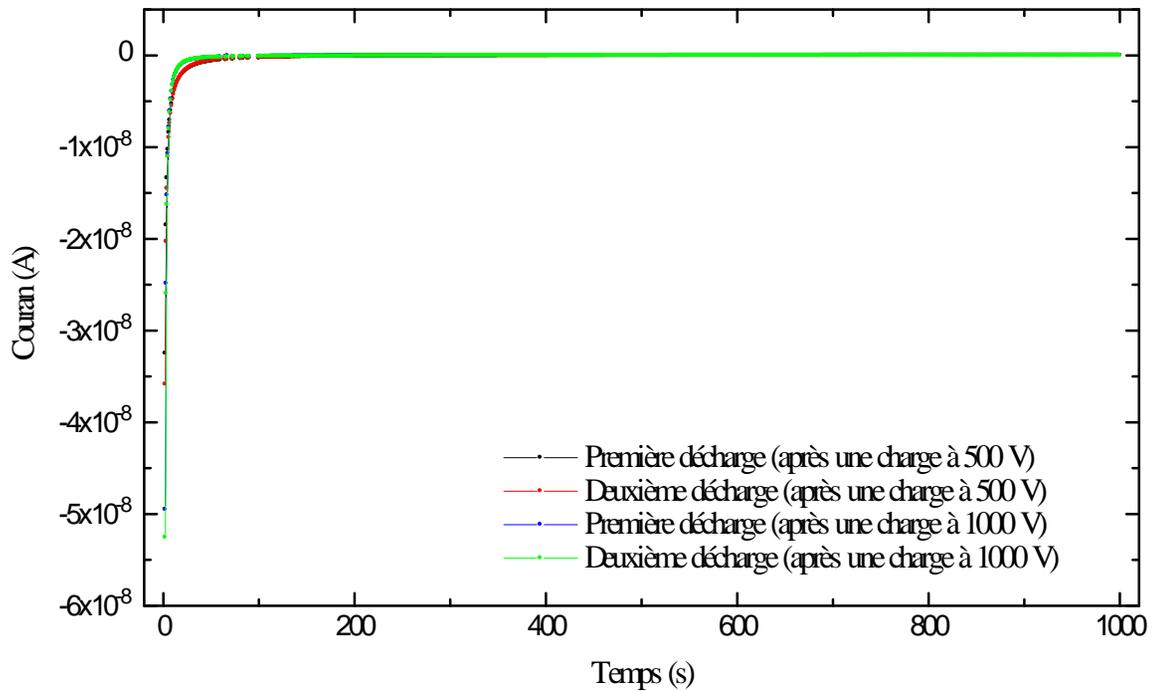


Figure 4.22. Séquences de décharge pour le papier non imprégné.

Teneur en eau : 3.5%.

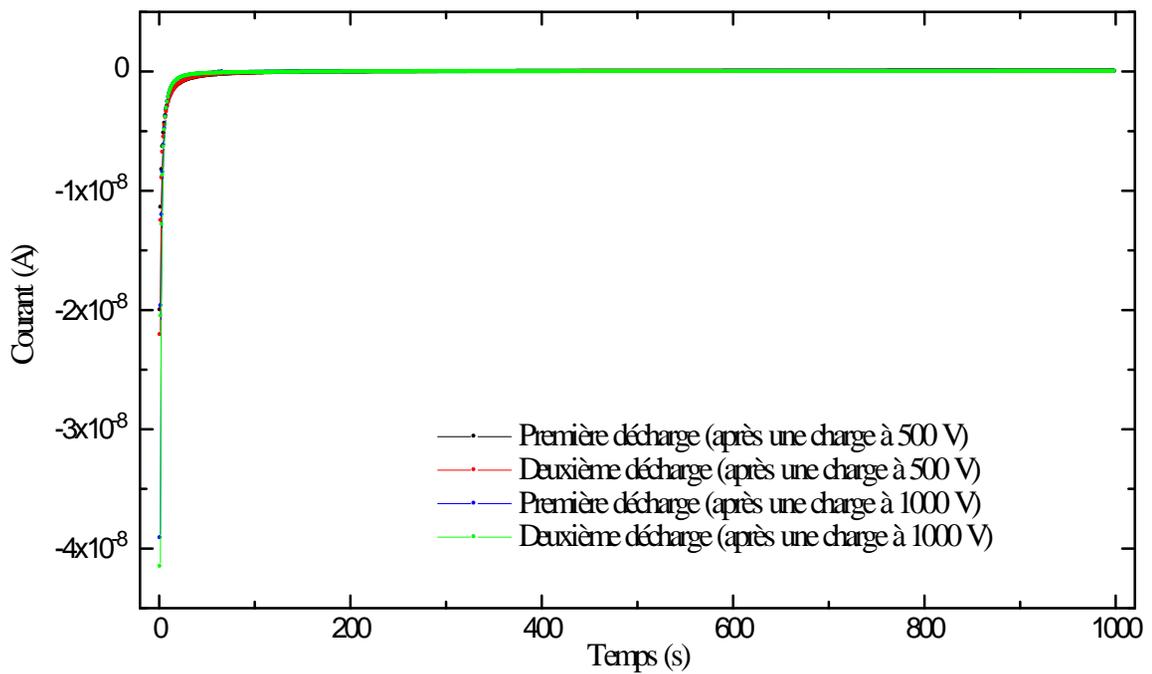


Figure 4.23. Séquences de décharge pour le papier imprégné.

Teneur en eau : 3.5%.

4.3.3.3. Teneur en eau de 6.5%

Les séquences de charge pour une teneur en eau de 6.5% sont représentées sur les figures 4.24 et 4.25.

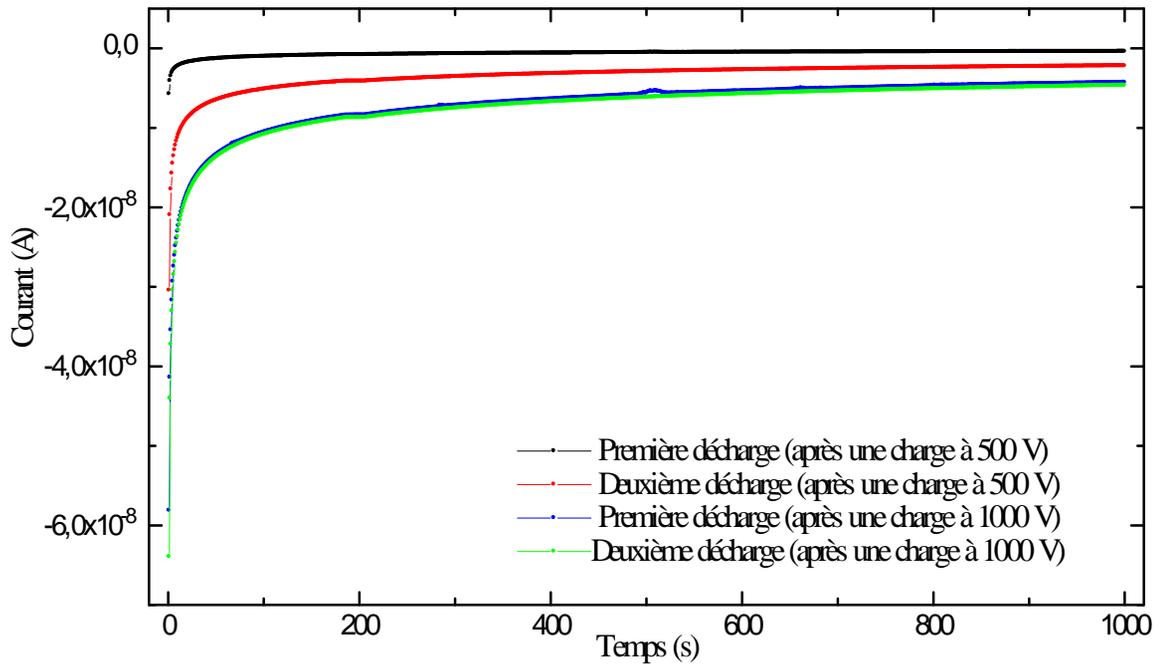


Figure 4.24. Séquences de décharge pour le papier non imprégné.

Teneur en eau : 6.5%.

Pour le papier non imprégné avec une teneur en eau de 6.5%, le courant de la deuxième décharge est supérieur à celui de la première après les charges à 500 V. Les deux décharges succédant aux charges à 1000 V se superposent avec un courant nettement supérieur aux deux courants précédents.

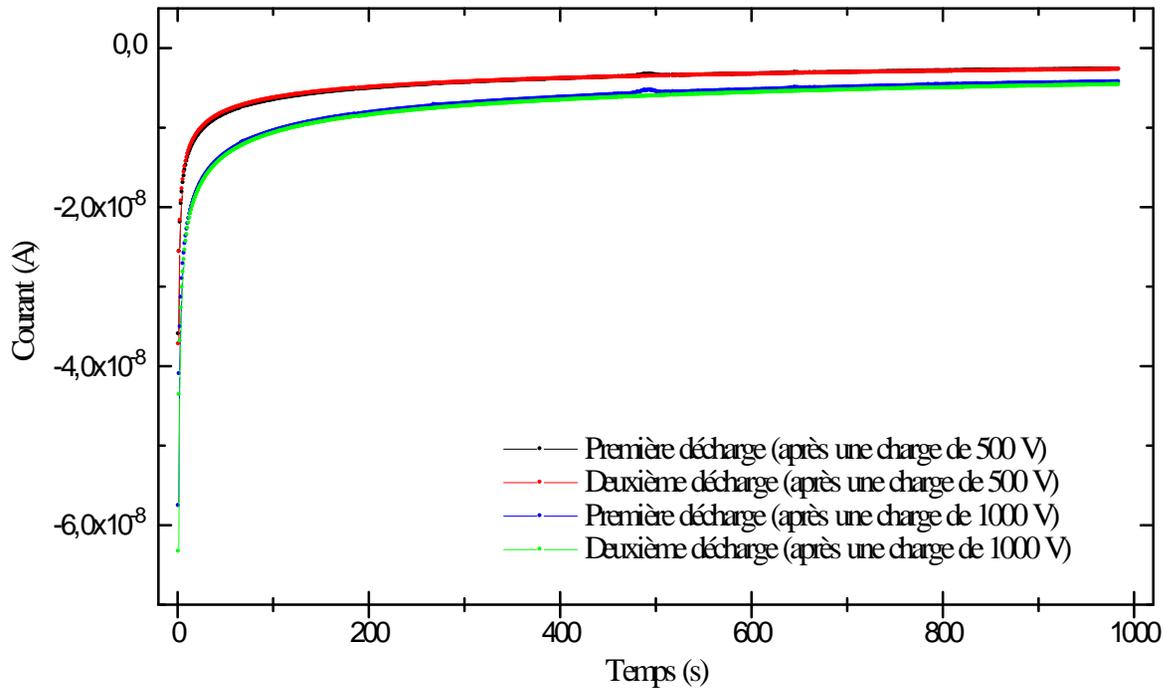


Figure 4.25. Séquences de décharge pour le papier imprégné.

Teneur en eau : 6.5%.

4.4. Interprétation physique des résultats expérimentaux

L'interprétation physique des résultats n'est pas une chose aisée. En effet divers processus interviennent de façon concomitante. Il y a d'abord la présence d'impuretés pouvant générer des porteurs de charge par dissociation ionique. Il y a aussi les différents processus de polarisation dont ceux caractérisés par de grandes constantes de temps comme la polarisation dipolaire ou la polarisation interfaciale. Les effets étant plus accentués à 1000 V, nous avons choisi cette tension lors de nos interprétations.

4.4.1. Forme du courant de charge en fonction de la teneur en eau

4.4.1.1. Cas de la teneur en eau de 1%

Dans ce cas le courant de charge tend rapidement vers un état stationnaire et cela est valable dans tous les cas, imprégné ou non imprégné. En effet pour des niveaux

d'humidité de cet ordre, l'isolation est considérée en bon état et la teneur en eau est acceptable. Le courant de charge est constitué du courant dû aux différents processus de polarisation rapide du papier et du courant de conduction. Dans ce cas le courant peut s'exprimer par la relation classique :

$$I(t) = C_0 U_0 \left[\frac{\sigma}{\epsilon_0} + f(t) \right] \quad (4.1)$$

Où

- C_0 est la capacité géométrique,
- U_0 est l'échelon de tension,
- σ est la conductivité,
- ϵ_0 est la permittivité du vide
- $f(t)$ est la fonction réponse.

Dans l'expression (4.1), la composante $\frac{C_0 U_0 \sigma}{\epsilon_0}$ correspond au processus de conduction et la fonction $f(t)$ rend compte de l'absorption.

Le courant de résorption quant à lui, tend rapidement vers zéro et peut également s'exprimer par une relation classique du type :

$$I_r(t) = - C_0 U_0 [f(t) - f(t + t_c)] \quad (4.2)$$

Avec t_c étant le temps pendant lequel la tension a été appliquée au papier. Nous remarquons l'absence de conduction dans ce cas.

4.4.1.2. Cas de la teneur en eau de 3.5%

Dans ce cas, le courant diminue rapidement puis se met à augmenter progressivement. Cette diminution rapide serait due au courant de déplacement correspondant à l'espace vide faisant abstraction du matériau. L'augmentation qui s'en suit est due à l'orientation progressive des dipôles liés à la cellulose. Bien que la teneur en eau est assez élevée, l'augmentation du courant est faible et ceci est dû au fait que les

molécules d'eau liées à la matrice de la cellulose ont une grande difficulté à prendre position dans le champ électrique. Dans ce cas, le courant peut s'exprimer par l'expression :

$$J(t) = \sigma E + \frac{dD(t)}{dt} \quad (4.3)$$

Où:

$J(t)$: représente la densité du courant total ;

σ : est la conductivité du matériau ;

E : est le champ électrique ;

$D(t)$: est le déplacement électrique.

L'équation qui régit le courant dans ce cas peut également s'écrire :

$$J(t) = \sigma E + \frac{dP(t)}{dt} \quad (4.4)$$

Où $P(t)$ est la polarisation du matériau.

Le courant de décharge peut s'exprimer avec la même expression que pour le premier cas (équation 4.2).

4.4.1.3. Cas de la teneur en eau de 6.5%

Dans ce cas, le courant de la première charge présente une augmentation. Celle-ci serait due à une dissociation électrolytique menant à la génération de porteurs de charge à partir des impuretés contenues dans le papier. L'augmentation du courant peut également être engendrée par les différents processus de polarisation liés à la présence de molécules polaires. Ces dernières proviennent des molécules d'eau libres ou liées à la matrice de cellulose ou des matrices de cellulose elles-mêmes. Ces molécules de grande dimension s'orientent difficilement dans le champ électrique.

4.4.2. Interprétation des séquences de charge

4.4.2.1. Teneur en eau de 1%

La deuxième charge présente une légère augmentation par rapport à la première charge. Cela montre bien que le matériau est affecté par ce qui lui est arrivé auparavant. Cet effet de mémoire présente une similitude avec l'hystérésis des matériaux magnétiques.

4.4.2.2. Teneur en de 3.5%

Un grand décalage est observé entre la première et la deuxième charge. Ceci est certainement dû à un effet cumulatif du champ électrique. Les porteurs de charge produits par électro-dissociation n'ont pas le temps de se recombinaison pour former l'espèce neutre.

4.4.2.3. Teneur en eau de 6.5%

Le courant de la deuxième charge est supérieur à celui de la première charge jusqu'à un temps de 500 s dans le cas du papier non imprégné et jusqu'à 380 s dans le cas du papier imprégné. La tendance s'inverse par la suite. Jusqu'à cette inversion, les porteurs de charge créés par dissociation électrolytique n'ont pas eu le temps de se neutraliser.

4.4.3. Interprétation des séquences de décharge

Le décalage constaté dans certains cas entre la première et la deuxième décharge est dû à l'emprisonnement des porteurs de charge aux différentes interfaces. Ces charges ont besoin d'un temps plus long pour disparaître.

4.5. Approche mathématique des courants d'absorption et de résorption

Nous avons supposé jusqu'ici que les courants d'absorption et de résorption pour plusieurs matériaux diélectriques sont régis par l'équation en puissance négative que nous avons donnée dans le chapitre 3. Nous allons dans ce qui suit, regarder si des équations mathématiques pourraient correspondre à nos courbes expérimentales. L'approximation mathématique des courbes expérimentales a été réalisée en utilisant le logiciel MATLAB et en considérant que les courants d'absorption persistent jusqu'à un temps de 200 s, au-delà le courant pouvant être considéré comme provenant d'une quasi-conduction.

4.5.1. Courants d'absorption

Pour les teneurs en eau de 1% et 3.5%, les courants suivent parfaitement une loi de décroissance en puissance négative du type $i(t) = at^{-n}$, avec a et n des constantes dépendant de la teneur en eau du papier et du niveau de tension appliquée.

4.5.1.1. Teneur en eau de 1%

Nous donnons dans les tableaux 4.1 et 4.2, les paramètres a et n associés aux différentes courbes pour une teneur en eau de 1% dans le cas du papier non imprégné et imprégné.

Tableau 4.1. Paramètres de l'équation d'approximation des courants d'absorption du papier non imprégné pour une teneur en eau de 1%

Tension de charge	a	n
Première charge à 500 V	$1.966 \cdot 10^{-8}$	0.4698
Deuxième charge à 500 V	$4.311 \cdot 10^{-9}$	0.3325
Première charge à 1000 V	$3.116 \cdot 10^{-8}$	0.5623
Deuxième charge à 1000 V	$3.645 \cdot 10^{-8}$	0.4989

Tableau 4.2. Paramètres de l'équation d'approximation des courants d'absorption du papier imprégné pour une teneur en eau de 1%

Tension de charge	a	n
Première charge à 500 V	$1.121 \cdot 10^{-8}$	0.5524
Deuxième charge à 500 V	$5.698 \cdot 10^{-9}$	0.4139
Première charge à 1000 V	$2.187 \cdot 10^{-8}$	0.4953
Deuxième charge à 1000 V	$1.411 \cdot 10^{-8}$	0.3901

4.5.1.2. Teneur en eau de 3.5%

Les paramètres des fonctions d'approximation pour le papier non imprégné et imprégné dont la teneur en eau est de 3.5% sont consignés dans les tableaux 4.3 et 4.4.

Tableau 4.3. Paramètres de l'équation d'approximation des courants d'absorption du papier imprégné pour une teneur en eau de 3.5%

Tension de charge	a	n
Première charge à 500 V	$2.032 \cdot 10^{-8}$	0.2955
Deuxième charge à 500 V	$2.646 \cdot 10^{-8}$	0.3571
Première charge à 1000 V	$4.289 \cdot 10^{-8}$	0.2027
Deuxième charge à 1000 V	$2.03 \cdot 10^{-8}$	0.1231

Tableau 4.4. Paramètres de l'équation d'approximation des courants d'absorption du papier imprégné pour une teneur en eau de 3.5%

Tension de charge	a	N
Première charge à 500 V	$1.186 \cdot 10^{-8}$	0.2496
Deuxième charge à 500 V	$1.498 \cdot 10^{-8}$	0.3009
Première charge à 1000 V	$3.454 \cdot 10^{-8}$	0.1702
Deuxième charge à 1000 V	$1.786 \cdot 10^{-8}$	0.1031

4.5.1.3. Teneur en eau de 6.5%

Les paramètres de l'équation d'approximation pour le papier d'une teneur en eau de 6.5%, non imprégné et imprégné sont représentés sur les figures 4.5 et 4.6 respectivement. Dans le cas de la première charge, la loi qui rend compte du courant d'absorption est croissante en puissance positive de la forme $i(t) = at^n$. Cette loi est valable pour le papier imprégné et non imprégné, que la tension soit de 500 V ou de 1000 V. Les deux autres courants sont approximés par une loi de puissance négative du même type que celle qui rend compte des courants d'absorption dans le cas des teneurs en eau du papier de 1% et 3.5%.

Tableau 4.5. Paramètres de l'équation d'approximation des courants d'absorption du papier non imprégné pour une teneur en eau de 6.5%

Tension de charge	a	N
Première charge à 500 V	$4.942 \cdot 10^{-6}$	0.0018
Deuxième charge à 500 V	$8.629 \cdot 10^{-6}$	0.0068
Première charge à 1000 V	$2.086 \cdot 10^{-5}$	0.0099
Deuxième charge à 1000 V	$5.089 \cdot 10^{-5}$	0.0044

Tableau 4.6. Paramètres de l'équation d'approximation des courants d'absorption du papier imprégné pour une teneur en eau de 6.5%

Tension de charge	a	N
Première charge à 500 V	$4.723 \cdot 10^{-6}$	0.0018
Deuxième charge à 500 V	$8.322 \cdot 10^{-6}$	0.0068
Première charge à 1000 V	$2.845 \cdot 10^{-5}$	0.0068
Deuxième charge à 1000 V	$5.019 \cdot 10^{-5}$	0.0043

4.5.2. Courants de résorption

Quelque soit la teneur en eau du papier, on s'aperçoit que l'on ne peut pas approcher les courants de résorption par une loi décroissante en puissance négative. La seule approximation qui rend compte des ces courants et encore sans une grande précision est une loi exponentielle du type : $a \exp(bt) + c \exp(dt)$ ou a, b, c et d sont des constantes qui dépendent de la teneur en eau et du niveau de tension appliquée. Etant donné la mauvaise précision de cette approximation, nous avons omis de donner les différents paramètres comme cela a été le cas pour les courants d'absorption

Les courants d'absorption et de résorption pourraient être utilisés pour caractériser un isolant électrique. En effet, les courants d'absorption et de résorption représentent des courants transitoires. Ces derniers donnent une image de l'évolution temporelle de la polarisation depuis un état initial jusqu'à l'état final. L'application d'un échelon de tension modifie l'équilibre des charges présentes dans l'échantillon par un nouveau réaménagement. Dans ce cas le courant total traversant l'échantillon est appelé courant de charge qui englobe le courant d'absorption et le courant stationnaire qui persistera en régime permanent, appelé courant de conduction. Dans le cas de notre étude, le courant d'absorption s'observe jusqu'à un temps de 200 s environ. Lorsque le court-circuit est établi et que l'échelon de tension est supprimé, un courant de dépolarisation qui n'est rien d'autre que le courant de résorption traverse le matériau.

La forme des séquences charge/décharge est très affectée par la teneur en eau. Ceci pourrait représenter un outil de diagnostic pour connaître la teneur en eau d'une isolation. Le fait que la forme des séquences charge/décharge est la même aussi bien pour le papier imprégné ou non imprégné signifie que c'est l'humidité contenue dans le papier qui gouverne la forme du courant.

Dans le cas d'une teneur en eau de 1%, la forme du courant est conservée pour les deux tensions et pour les deux cas imprégné et non imprégné. Pour les deux séquences de charge/décharge, le courant tend vers un courant stationnaire correspondant au courant de conduction. Le courant d'absorption est plus élevé pour une tension de 1000 V pour les deux types d'échantillons. Ceci s'explique par le fait que les charges piégées aux interfaces augmentent avec le niveau de tension.

Dans le cas d'une teneur en eau de 3.5% et que le papier soit imprégné ou non et pour les deux tensions, le courant ne tend pas vers un régime stationnaire mais augmente pour les deux séquences de charge. L'augmentation du courant dans le cas de la deuxième séquence pourrait s'expliquer par une dégradation du papier due à une action simultanée du champ électrique et de réactions chimiques faisant intervenir l'eau.

Dans le cas de la teneur en eau de 6.5%, que le papier soit imprégné ou pas, le courant de la première séquence présente une augmentation. Cette augmentation pourrait être attribuée à l'augmentation du nombre de porteurs de charge provenant d'une dissoaciation ionique. Toutefois cette dissociation ne pouvant se poursuivre indéfiniment, nous remarquons une autre allure à la seconde séquence de charge.

Les courants d'absorption suivent parfaitement la loi empirique de la puissance négative pour les teneurs en eau de 1% et 3.5%. En ce qui concerne la teneur en eau de 6.5%, le premier courant d'absorption lié à chaque niveau de tension est approximé par une loi croissante en puissance positive du type at^n . Le deuxième courant pour chaque niveau de tension est décrit par la même loi que les deux autres teneurs en eau.

Les courants de résorption quant à eux, sont décrits mais sans grande précision par une loi exponentielle du type $aexp(bt) + cexp(dt)$ ou a, b, c et d sont des constantes qui dépendent de la teneur en eau et du niveau de tension appliquée.

Enfin, une corrélation entre la teneur en eau du papier et la forme du courant pourrait être mise à profit pour caractériser l'isolation dans un transformateur. Cela est d'autant plus valable si l'on sait que l'eau présente dans l'huile d'un transformateur migre vers le papier.

A l'issue de ce travail, qui s'est voulu une introduction à l'étude expérimentale des courants de charge et de décharge, nous avons constaté que plusieurs voies peuvent être suivies dans cette optique. Aussi les perspectives ouvertes par ce travail pourraient être :

- la définition des gammes de teneurs en eau associées à chaque forme des séquences charge/décharge ;
- Etude des courants d'absorption et de résorption du papier suite à un vieillissement thermique.

- [1] M. C. Lessard, L. V. Nifiterik, M. Massé, J. F. Penneau, R. Grob, " Thermal aging study of insulating papers used in power transformers", IEEE Conference on Electrical insulation and Dielectric phenomena, pp. 854-859, October 20-23, 1996.
- [2] M. Nikoloski, "The velocity of Drying of the already impregnated oil-paper insulation", Proceedings of the 5th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials, pp. 484-487, Seoul, Korea, May 25-30,1997.
- [3] B. Bouvier, "Papier et papier imprégné", Technique de l'Ingénieur, Traité Génie électrique, D 280, pp 1-22, 1983.
- [4] D. F. Warne, "Newnes electrical Engineer's Handbook", Biddles Ltd Editions, Great Britain, 2000.
- [5] D. W. Auckland, K. chandraker, Z. Shkanti and B. R. Varlow, "degradation of oil-paper systems due to the electrical field enhanced absorption of water", Seventh International Conference on Dielectric Materials Measurement & Applications, Conference publication N° 430, IEE, pp. 197-200, 23-26 September, 1996.
- [6] R. Fournié, "Les isolants en électrotechnique, Essais, Mécanismes de dégradation, Applications industrielles", Edition Eyrolles, Paris 5^{ème}, 1990.
- [7] H. Yoshida, Y. Ishioka, T. Suzuki, T. Yanari, T. Teranishi, "Degradation of insulating materials of transformers", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-22, N°6, pp. 795-800, December, 1987.
- [8] T. K. Saha, P. Purkait, "Investigation of Polarization and Depolarization Current Measurements for the Assessment of Oil-paper Insulation of Aged Transformers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, pp. 9878-1070, 2004.

- [9] J. Jalbert and R. Gilbert, "Decomposition of transformer oils: A New Approach for the determination of dissolved Gases", IEEE transaction. PD Vol. 12, pp 754-760, 1997.
- [10] E. Kuffel, W. S. Zaengl, J. Kuffel, "High Voltage Engineering Fundamentals", second edition, published by Butterworth-Heinemann, 2000.
- [11] Norme de la CEI, "Méthode pour la mesure de la résistivité transversale et de la résistivité superficielle des matériaux isolants électriques solides", publication 93, Deuxième édition, Commission Electrotechnique International, Norme de la CEI, 1980.
- [12] R. Tobazéon, J. C. Filippini, C. Marteau, "In search of a new method to measure the resistivity of insulating solids", IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, pp. 569-572, Vasteras, Sweden, June 22-25, 1998.
- [13] F. Bitam-Megherbi, "Etude d'une isolation combinée huile/papier isolant, approche non destructive", Thèse de doctorat d'Etat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Décembre 2007.
- [14] CEI 167, "Méthodes d'essai pour la détermination de la résistance d'isolement des isolants solides", Genève, Suisse, 1964.
- [15] A. Ozawa, S. Mikami, K. Nitta, M. Shinmura, S. Washizu, Y. Wada, "Electrical Conduction and polarization in cellulose in relation to its water content", IEEE International Conference on conduction and breakdown in Solid Dielectric, pp. 15-19, 3-6 July, 1989.
- [16] T. R. Blackburn, R. E. James, B. T. Phung, S. L. Jones, "Techniques avancées de caractérisation des décharges partielles dans les systèmes imprégné d'huile et ceux

isolés au gaz", Conférence Internationale des grands Réseaux Electriques, pp. 1-9, 28 août-3 Septembre, 1994.

[17] I. Gussenbauer, "Examen de la répartition d'humidité dans des modèles de transformateurs au moyen des mesures diélectriques", Conférence Internationale des grand réseaux Electriques, pp. 1-5, session 1980.

[18] B. K. Gupta, "Direct determination of moisture in solid oil-paper insulation", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 583-586, Arlington, Virginia, USA, June 7-10, 1998.

[19] G. M. Urbani, R. S. Brooks, "Using the recovery voltage method to evaluate aging in oil-paper insulation", IEEE International Conference on conduction and Breakdown in Solid dielectrics, pp. 93-97, Sweden, June 22-25, 1998.

[20] S. M. Islam, P. R. S. Jota, M. Stace, "detection of oil-paper equilibrium moisture content in power transformer using hybrid intelligent interpretation of polarization spectrums from recovery voltage measurements", Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA, pp 16-19, June 7-10, 1998.

[21] M. J. Heathcote, "The J & P Transformer Book", Twelfth edition, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, 1998.

[22] C. Dutriez, "Corrélation entre les propriétés diélectriques et mécaniques des polymères ; influence de la température", Thèse de doctorat en génie des Matériaux de l'Ecole Centrale de Lyon et de l'Ecole Doctorale des Matériaux de Lyon, en Génie Des Matériaux, Lyon, Octobre 2004.

[23] Norme Européenne NF EN 60641-3-1, Indice C26-133-1, "Spécification pour le carton comprimé et le papier comprimé à usages électriques", Novembre 1994.

[24] C. Boidson, M. Carballeira, P. Guuinie, L. Latil, J. Poittevin, "Le conditionnement sur site des transformateurs, son contrôle et son impact sur la tenue diélectrique", Conférence International des Grands Réseaux Electriques, PP.1-8, 28 Aout-3 septembre, 1994.

[25] J .Vergine, R. Grob, P. LE Guennec, D. Dhiba, "Le vieillissement du papier dans les transformateur de puissance", REE N°2, Juillet 1995.

[26] A. Bourgeois, "Etude du phénomène d'électrisation par écoulement sur les cartons des transformateurs de puissance", Thèse de Doctorat, l'école Doctorale Science des Matériaux et Génie des Procédés de Grenoble, Février 2007.

[27] Norme Européenne NF EN 60641-2, Indice C26-131-2, "Spécification pour le carton comprimé et le papier comprimé à usages électriques", Avril 1996.

[28] Norme Européenne NF EN 60641-3-2, Indice C26-133-2, "Spécification pour le carton comprimé et le papier comprimé à usages électriques", Novembre 1994.

[29] S. Assous, "Caractérisation du papier Presspahn utilisé dans l'isolation des transformateurs de haute tension ", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Octobre 2004.

[30] Nynas : Guide des huiles isolantes, Notice interne de l'Entreprise Electro-Idustries, 1990.

[31] H. Berger, "Liquides isolant en électrotechnique ; Présentation générale", Technique de l'ingénieur, D2 470, Paris, Mai 2002.

- [32] P. J. Vuarchex, "Huiles et liquides isolants", Technique de l'ingénieur, D2 305, Paris, 1998.
- [33] D. Dhiba, "Etude du vieillissement de l'isolation papier-huile dans les transformateurs de puissance", Thèse de Doctorat, Toulouse, INP, 1995.
- [34] J. Vergne, "Etude du vieillissement physique du complexe papier-huile dans les transformateurs électriques", Thèse de Doctorat, Toulouse, INP, 1992.
- [35] C. Menguy, "Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides", Techniques de l'ingénieur, Traité génie électrique, D 2310, PP. 1-28, 1997.
- [36] B. Kechaou, "Corrélation entre propriétés diélectriques et mécaniques de composites à matrice époxyde renforcée par des fibres de verre", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon et Faculté des sciences de Sfax, Juin 2003.
- [37] P. Robert, "Matériaux de l'électrotechnique", Traité d'Electricité, Presses Polytechniques et Universitaire Romandes, Troisième Edition, 1999.
- [38] R. Fournié, "Diélectrique – Basses théoriques", Techniques de l'ingénieur, D 213, Juin 1986.
- [39] S. Orlowaska, "Conception et prédiction des caractéristiques diélectriques des matériaux composites à trois phases par la modélisation et la validation expérimentale", Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale, Electronique, électrotechnique, Automatique de Lyon, Janvier 2003.
- [40] Y. Segui, "Diélectriques, Courants de conduction Techniques de l'Ingénieur", Vol. D-2301, pp. 1-12, 2000.

- [41] D. K. Das Gupta, K. Doughty, "Dielectric and conduction process in polyetheretherketone (PEEK)", IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1987, Vol. EI-22, No. 1, pp. 1-7, 1987.
- [42] D. K. Das Gupta, "Conduction mechanisms and high-field effects in synthetic insulating polymers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, Vol. 4. No. 2, pp. 149-156.
- [43] C. Laurent, "Diélectriques solides et charge d'espace", Techniques de l'Ingénieur, Vol. D-2305, 1999.
- [44] E. Semail, "Physique du génie électrique", Edition Lavoisier, Paris, ISBN : 2-7430-0279-4, 1998.
- [45] M. Y. Andrawis, W. A. Davis, S. M. Riad, A. Elshabini-Riad, "Dielectric Loss determination using perturbation", IEEE Conference on Instrumentation and Measurement Technology, pp. 425-429, May 12-14, 1992.
- [46] Q. Li. T. Zhao, "Definition and digital algorithms of dielectric loss factor for condition monitoring of high voltage equipment with harmonics emphasis", IEEE Power Systems Conference and Exposition, pp. 1171-1175, Vol. 2, 10-13 October, 2004.
- [47] T. Wildi, G. Sybille, "Electrotechnique", 4ème Edition, Juin 2005.
- [48] M. Megherbi. F. Bitam-Megherbi. N. Benamrouche, "Experimental Approach of Dielectric Losses Measurement in Insulating Paper under Distorted Voltage Stress", Electric Power Components and Systems, pp. 798-812, Issue 7, Volume 37, June, 2009.

[49] G. Csepes, I. Hamos, I. Kispal, J. Schmidt, A. Bogнар, "Un système expert à courant continu (RVM) permettant de vérifier l'efficacité de la remise à neuf d'un système isolant HT à papier huilé à partir de l'analyse spectrale de polarisation dans la bande des longues constantes de temps", Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, pp. 1-6, 28 Aout- 3 septembre, 1994.

[50] A. K. Jonscher, "The universal dielectric response and its physical significance", IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, Vol. 27, No. 3, pp. 407-423.

[51] T. K. Saha, "Review of Time Domain Polarization Measurements for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers", IEEE Trans. Power Delivery, 2002 (in Press, accepted).

[52] U. Gafvert, L. Adeen, M. Tapper, P. Ghasemi and B. Jonsson, "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain Applied to Diagnostics of Power Transformers", IEEE 6th Intern. Conf. Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), China, Vol. 2, pp. 825-830, 2000.

[53] T. K. Saha, P. Purkait, "Investigation of Polarization and Depolarization Current Measurements for the Assessment of Oil-paper Insulation of Aged Transformers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, pp. 9878-1070, 2004.

[54] R. Coelho, "Les diélectriques", Editions Hermes, 1993.

[55] D. Linhjell, L. Lundgaard, "Dielectric response on mineral oil impregnated cellulose and the impact of aging ", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp. 156-169, Vol. 14 , N°1, February, 2007.

- [56] S. C. Datt, J. M. Keller, R. Singh, "Absorption current studies on ethyl-cellulose", (ISE 7) Proceedings 7th international symposium on (cat. No. 91 CH3029-6), 25-27 Sep. 1991.
- [57] Vahe Der. Houhanessian and W. S. Zaengl, "Time Domain Measurements of Dielectric Response in Oil-Paper Insulation Systems", IEEE Intern. Sympos. Electr. Insul, Canada, Vol. 1, pp. 47-52, 1996.
- [58] M. Takahashi, H. Takenaka, Y. Wada, "Electrical conduction of cellulose under DC field", Proceedings of 3rd IEEE International Conference on conduction and Breakdown in Solid dielectrics, pp. 182-186, 3-6 July, 1989.
- [59] G. M Urbani, R. S. Brooks, "Using the recovery voltage method to evaluate aging in oil-paper insulation", IEEE International Conference on conduction and Breakdown in Solid dielectrics, pp. 93-97, Sweden, June 22-25, 1998.
- [60] J. J. Alff, Vahe Der. Houhanessian, W. S. Zaengl and A. J. Kachler, "A Novel, Compact Instrument for the Measurement and Evaluation of Polarisation-Depolarisation Currents Conceived for On-Site Diagnosis of Electric Power Apparatus", IEEE Intern. Sympos. Electr. Insul, USA, pp. 161-167, 2000.
- [61] T. Leibfried and A. J. Kachler, "Insulation Diagnostics on Power Transformers Using the Polarization and Depolarization Current (PDC) Analysis", IEEE Intern. Sympos. Electr. Insul., USA, pp. 170-173, 2002.
- [62] F. Bitam-Megherbi, M. Megherbi, "Time Evolution of Current through Insulating Paper under DC Voltage Stress", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation , Volume 14, Issue 3, pp. 656-662, June, 2007.