

## **Mémoire**

Présenté par

**Mademoiselle Hamouimeche Kaissa**

Pour l'obtention du diplôme de

## **Magister**

en Electrotechnique  
Option : Machines Electriques

Thème

# **Etude de l'interaction entre une barrière de papier et une décharge couronne en géométrie pointe-plan**

Jury :

Mr. Benamrouche	Nacereddine	Professeur, UMM Tizi-Ouzou	Président
Mr. Megherbi	Mohammed	Maître de Conférences, UMM Tizi-Ouzou	Rapporteur
Mr. Haddad	Salah	Professeur, UMM Tizi-Ouzou	Examineur
Mr. Zebboudj	Youcef	Professeur, Université de Béjaïa	Examineur
Mr. Belassel	Mohand-Tahar	Maître de Conférences, UMM Tizi-Ouzou	Examineur

## Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Monsieur Mohammed MEGHERBI, Maître de Conférences A au Département d'Electrotechnique pour m'avoir proposé ce sujet. Je lui suis reconnaissante de la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ce travail. Je le remercie pour sa disponibilité et pour les précieux conseils qu'il m'a prodigués pendant le déroulement de ce travail.

Je remercie avec enthousiasme Madame Ferroudja BITAM-MEGHERBI, Maître de Conférences A au Département d'Electrotechnique, de m'avoir donné la possibilité de réaliser ce travail dans les meilleures conditions possibles.

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

Je remercie également le Professeur Salah HADDAD, Chef du Département d'Electrotechnique qui a accepté de faire partie du jury d'examen.

Le Professeur Youcef Zebboudj a accepté de faire partie du jury et me faire partager son expérience, je l'en remercie vivement.

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

## Sommaire

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

## **Chapitre 1: Le papier isolant**

1.1. Introduction	4
1.2. Composition et mise en œuvre du papier	4
1.2.1. La cellulose	4
1.2.2. L'hémicellulose	5
1.2.3. La lignine	5
1.3. Fabrication des papiers et cartons	6
1.4. Propriétés du papier	7
1.4.1. Les propriétés physiques	7
1.4.1.1. Epaisseur	7
1.4.1.2. Masse volumique	7
1.4.1.3. Hygroscopicité du papier	8
1.4.2. Les propriétés électriques du papier	8
1.4.2.1. La permittivité et le facteur de pertes diélectriques	8
1.4.2.2. Conductivité	9
1.4.2.3. Rigidité diélectrique	9
1.4.3. Les propriétés mécaniques du papier	10
1.4.3.1. Résistance à la traction	10
1.4.3.2. Résistance au déchirement	11
1.4.3.3. Résistance au pliage	11
1.4.3.4. Résistance à l'éclatement	11
1.4.4. Propriétés thermiques du papier	11
1.4.4.1. La conductibilité thermique	11
1.5. Séchage du papier	12
1.6. La teneur en eau	12
1.6.1. Détermination de la teneur en eau du papier	13
1.7. Imprégnation du papier	13

---

1.7.1. Imprégnant	13
1.7.2. Rôle des huiles isolantes	14
1.7.3. Propriétés physiques de l'imprégnant	14
1.7.4. Propriétés chimiques	15
1.7.5. Propriétés électriques	15
1.7.5.1. La permittivité relative	15
1.7.5.2. La conductivité	16
1.7.5.3. La rigidité diélectrique	16
1.7.6. Caractéristiques thermiques	16
1.7.6.1. La viscosité	16
1.7.6.2. Le point d'écoulement	16
1.7.6.3. La capacité et la conductivité thermique	17
1.7.7. Teneur en eau	18
1.7.8. Dégradation de l'huile	19
1.8. Papier imprégné	19
1.8.1. Hygroscopicité du papier imprégné	19
1.8.2. Propriétés diélectriques du papier imprégné	20
1.8.2.1. Permittivité relative	20
1.8.2.2. Les pertes diélectriques	21
1.8.2.3. La rigidité diélectrique	21
1.9. Application du papier	21

## **Chapitre 2: Généralités sur la décharge couronne**

2.1. Introduction	22
2.2. Décharge couronne	22
2.3. Topographie de la décharge couronne	23
2.4. Les mécanismes de la décharge couronne	24
2.4.1. Décharge de Townsend	24
2.4.2. Décharge par streamer	28

---

2.5. Décharge couronne en géométrie pointe-plan	29
2.6. Décharge couronne en pointe positive	30
2.7. Décharge couronne en pointe négative	30
2.8. Caractéristique courant-tension	31
2.9. Champ Seuil de l'effet couronne	32
2.10. Facteurs influençant la décharge couronne	34
2.10.1. Facteurs électriques	35
2.10.1.1. Polarité positive	35
2.10.1.2. Polarité négative	35
2.10.2. Facteurs physico-chimiques du gaz	35
2.10.2.1. Nature du gaz	36
2.10.2.2. Effet de la pression	36
2.10.2.3. Influence de la température	36
2.10.2.4. Influence de l'humidité	36
2.10.3. Influence des paramètres géométriques	36
2.10.3.1. Influence du rayon de courbure	36
2.10.3.2. Influence de la forme d'électrodes	37
2.10.3.3. Distance inter-électrodes	37
2.11. Conclusion	37

### **Chapitre 3: Influence de la barrière sur la décharge couronne**

3.1. Introduction	38
3.2. Décharges à barrière diélectrique	38
3.3. Différents types de configuration de DBD	38
3.4. Configuration d'une DBD en géométrie pointe-plan	39
3.5. Différents types de décharge à barrière diélectrique	40
3.5.1. Décharges à barrière diélectrique volumique	41
3.5.1.1. La décharge à barrière diélectrique silencieuse	41

---

3.5.1.2. La décharge lumineuse homogène	41
3.5.2. Décharges à barrière diélectrique surfacique	41
3.6. Influence de la décharge à barrière diélectrique dans l'intervalle d'air	42
3.6.1. Influence du diélectrique	42
3.6.2. Influence de la position de la barrière dans l'intervalle d'air	42
3.6.3. Influence de l'épaisseur de la barrière et de la permittivité	43
3.6.4. Influence de la largeur de la barrière	43
3.6.5. Influence de la polarité de l'électrode pointe	43
3.6.6. Influence de l'accumulation de la charge d'espace	44
3.6.7. Influence de la pollution	44
3.7. Applications	44
3.7.1. Production d'ozone	44
3.7.2. Réduction des émissions nocives des gaz d'échappement	45
3.7.3. Traitement de surface	45
3.8. Conclusion	46

#### **Chapitre 4: Etude expérimentale**

4.1. Introduction	47
4.2. Description de la procédure expérimentale	47
4.3. Résultats expérimentaux	50
4.3.1. Caractérisation de l'intervalle de référence	50
4.3.1.1. Caractéristique courant-tension	50
4.3.1.2. Evolution temporelle du courant	51
4.3.1.3. Forme du courant	52
4.3.2. Caractérisation de l'intervalle d'air avec barrière en papier et une teneur de 6.5%	53
4.3.2.1. Caractéristique courant-tension	54
4.3.2.2. Evolution temporelle du courant	54

---

4.3.2.3. Forme du courant	55
4.3.3. Caractérisation de l'intervalle d'air avec barrière en papier et une teneur en eau de 1%	57
4.3.3.1. Caractéristique courant-tension	57
4.3.3.2. Evolution temporelle du courant	58
4.3.3.3. Forme du courant	58
4.3.4. Caractérisation de l'intervalle d'air avec barrière en papier imprégné et une teneur en eau de 6.5%	60
4.3.4.1. Caractéristique courant-tension	60
4.3.4.2. Evolution temporelle du courant	61
4.3.4.3. Forme du courant	61
4.3.5. Caractérisation de l'intervalle d'air avec barrière en papier imprégné et une teneur en eau de 1%	63
4.3.5.1. Caractéristique courant-tension	63
4.3.5.2. Evolution temporelle du courant	64
4.3.5.3. Forme du courant	64
4.3.6. Effet de la décharge couronne prolongée	66
4.3.6.1. Papier non imprégné	66
4.3.6.1.1. Résistivités superficielles	66
4.3.6.1.2. Résistivités transversales	67
4.3.6.2. Papier imprégné	68
4.3.6.2.1. Résistivités superficielles	68
4.3.6.2.2. Résistivités transversales	68
4.4.7. Etat de surface du plan suite à une décharge couronne	69
4.4.8. Etat de surface des échantillons de papier imprégné suite à une décharge couronne	71
Conclusion générale	73
Références bibliographique	75

## Introduction générale

## Sommaire

Le bon fonctionnement des transformateurs haute tension repose en grande partie sur leur isolation électrique et sur le contrôle de leur température. Les transformateurs contiennent deux types de matériaux isolants majoritaires : de l'huile minérale, liquide diélectrique qui permet l'évacuation de la chaleur et des matériaux lignocellulosiques. Parmi ces derniers figurent les papiers de guipage disposés sur les fils de cuivre des bobinages ainsi que des écrans en carton permettant le support mécanique des bobinages et l'isolation électrique entre les différentes phases du transformateur. La surface des cartons est soumise à un écoulement d'huile permanent. Lorsque l'huile est en contact avec les constituants celluloses, des charges électriques apparaissent à l'interface, par triboélectricité. L'huile se trouve alors chargée positivement alors que sur le carton apparaissent des charges négatives. L'écoulement de l'huile entraîne les charges positives alors que la surface du carton conserve ses charges négatives. Ce phénomène est appelé électrisation statique ou encore électrisation par écoulement. L'huile ne reste pas longtemps chargée car son écoulement permet aux charges positives de s'écouler vers la terre, une fois en contact avec une partie métallique à la masse (cuve du transformateur par exemple). En revanche, le carton étant isolé, il accumule les charges négatives. Une accumulation trop importante de charges à sa surface peut engendrer des potentiels de surface élevés capables d'initier des décharges électriques vers des points de potentiel moins élevé. Ces décharges, plus ou moins importantes, détériorent les propriétés diélectriques de l'huile et du matériau cellulosique. Elles sont considérées comme responsables de claquages destructifs observés dans les parties inférieures des bobinages [1]. Comme nous l'avons signalé plus haut le complexe papier/huile demeure l'élément essentiel dans l'isolation en haute tension. Ce système isolant organique peut aussi être affecté par la décharge couronne et cela en raison de la forte activation que ce type de décharge confère aux différentes espèces contenues dans l'air ou dans les vapeurs organiques [2]. Dans les systèmes d'isolation, l'effet couronne peut se manifester du fait de la présence d'aspérités sur la surface des conducteurs des enroulements. C'est partant de ces considérations que notre travail est dédié à l'étude de l'interaction entre une décharge

couronne négative et le papier d'isolation pour transformateurs. Cette étude fait suite à une première étude déjà réalisée [2,3].

Dans un premier chapitre nous donnons les principales caractéristiques du papier destiné aux applications en haute tension et dont l'imprégnant associé est de l'huile minérale.

Le développement des systèmes de haute tension a donné une grande impulsion à la recherche sur la décharge couronne pour différents intervalles d'air. Ces décharges regroupent tous les processus d'ionisation, d'attachement et la photo-émission qui interviennent dans un gaz lorsqu'un champ électrique suffisamment important lui est appliqué. Les phénomènes mis en jeu dans ces décharges sont complexes et variés selon la nature et la pression du gaz, la polarité de la tension appliquée et le champ électrique. La connaissance des paramètres de la décharge ont une grande importance pour concevoir un bon système d'isolement. De nombreux travaux ont été orientés dans la direction de l'analyse des différents paramètres caractérisant cette décharge : courant de décharge, champ électrique ou encore tension appliquée. Tous ces travaux plus ou moins récents sur la décharge couronne montrent que la théorie de la décharge couronne n'est pas établie de manière indiscutable, surtout si l'on veut tenir compte des effets de surfaces [2,4,5]. Le deuxième chapitre a donc été consacré aux généralités sur la décharge couronne.

Le recours pour des raisons économiques, à des tensions de plus en plus élevées pour le transport de l'énergie électrique a nécessité et nécessitera encore des distances d'isolement dans l'air de plus en plus grandes. L'introduction des barrières isolantes entre les parties sous tension améliore la rigidité des systèmes et réduit les distances d'isolement. L'influence de la barrière est surtout liée à l'accumulation des charges sur la surface de l'isolant [6]. D'autre part, le papier isolant dans un transformateur pourrait être assimilé à une barrière entre des parties portées à des potentiels différents, le troisième chapitre est donc consacré à l'étude d'une décharge couronne avec barrière diélectrique.

Le quatrième chapitre, quant à lui, est consacré à l'étude expérimentale de l'interaction entre une décharge couronne négative et le papier d'isolation pour

transformateurs. Les résistivités transversale et superficielle du papier suite à une décharge couronne ont également été mesurées.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale où sont brièvement rappelés les résultats de nos expériences, nous y indiquerons aussi les possibles perspectives pouvant faire suite à notre travail.

# Chapitre 1

## Papier isolant

## 1.1. Introduction

Bien que de nouveaux produits synthétiques soient apparus, le papier continue à jouer un rôle majeur dans l'isolation électrique. C'est un matériau utilisé dans l'isolation des câbles électriques, des condensateurs et des transformateurs à chaque fois que l'on a affaire à des puissances élevées générant des échauffements importants. De part ses qualités, le papier se présente comme un matériau de choix pour l'isolation électrique. Non seulement le matériau est assez bon marché, il présente aussi de bonnes propriétés électriques et mécaniques [7]. Sa structure cellulosique poreuse le prédispose à une imprégnation facile et son association avec un imprégnant lui confère des propriétés remarquables [8]. L'imprégnant le plus souvent associé au papier est généralement de l'huile minérale [9]. Dans notre étude, on s'est intéressé à l'utilisation du papier imprégné d'huile minérale pour étudier l'interaction entre une barrière en papier et une décharge électrique de type couronne en géométrie pointe plan et en polarité négative. Ce type de papier utilisé dans nos essais est conçu pour des applications en haute tension particulièrement dans l'isolation des transformateurs de puissance.

## 1.2. Composition et mise en œuvre du papier

Le papier presspahn ou bien les cartons comprimés (pressboard) sont fabriqués à partir de la pâte de bois. Ils sont constitués de plusieurs couches de feuilles minces, moulées ou pressées à chaud. Cette constitution confère au produit des caractéristiques électriques et mécaniques optimales.

Le papier utilisé dans la construction des transformateurs est constitué de 90 % de cellulose, 6 à 7 % d'hémicellulose et de 3 à 4 % de lignine [10].

### 1.2.1. La cellulose

La cellulose est une substance organique naturelle, on la trouve dans le lin, le chanvre ainsi que dans le bois. Elle se présente sous forme de longues chaînes comprenant jusqu'à 1200 anneaux de glucose reliés par des ponts d'oxygène [11, 12, 13].

Ces chaînes peuvent être disposées d'une manière compacte et ordonnée (zone cristalline), qui est stable par des liaisons d'hydrogènes et relativement résistante aux agents chimiques. Souvent, la cellulose se présente avec une structure fortement désorientée (zone amorphe) qui est plus vulnérable [14].

Le papier cellulosique est un polymère naturel, qui se présente sous la formule représentée sur la figure suivante :

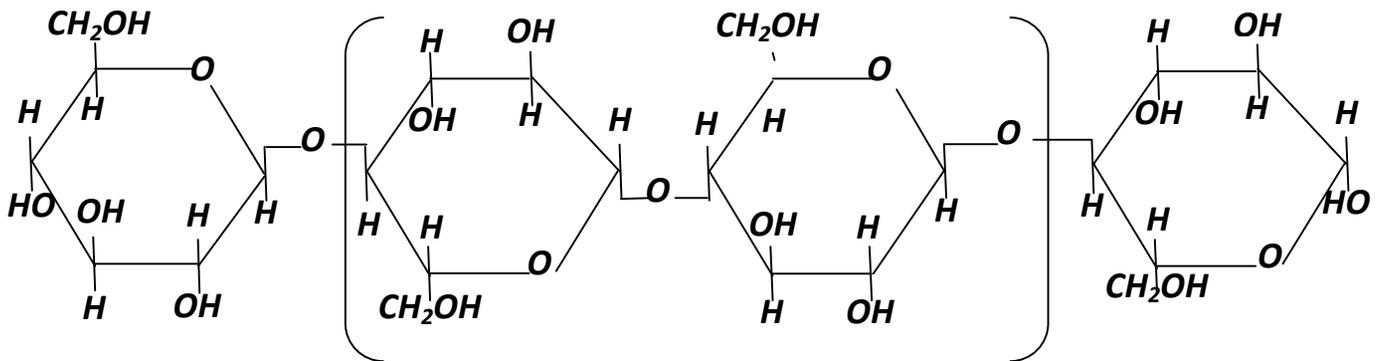


Figure 1.1. Molécule de cellulose [15, 16, 17]

### 1.2.2. L'hémicellulose

Les hémicelluloses sont des polysaccharides ayant un degré de polymérisation (DP) 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. Les hémicelluloses sont constituées d'hexoses (glucose, galactose, mannose) et de pentoses (xylose, arabinose)[1].

### 1.2.3. La lignine

La lignine, vient du mot « lignum » qui signifie bois, c'est la matière qui « cimente » les polysaccharides du bois. Elle représente entre 17 et 33 % de la matière sèche. A l'état naturel, la lignine est toujours associée aux polysaccharides.

De ce fait, toutes les caractéristiques de la lignine ont été établies à partir de lignine isolée connue [1].

La composition de divers types de papier utilisé dans l'industrie électrique est donnée dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1. Composition de divers types de papier utilisé dans l'industrie électrique [9].

Constituants	Papier kraft pour câbles (%)	Papier 100% Manille (%)	Papier coton (%)	Papier kraft pour condensateurs (%)
-cellulose.....	88,3	78,6	95	91
Hémicellulose.....	2,9	11,4	0,5	1,5
Lignine.....	4,3	8,9	0,9	2,3
Cendre.....	0,5	0,7	0,1	0,1
Teneur en sulfate	0,02	–	0,1	0,01
Teneur en chlorure...	0,02	–	0,1	0,01
Autres impuretés.....	3,96	0,4	3,3	5,08

### 1.3. Fabrication des papiers et cartons

Ils sont fabriqués à partir de 100 % de la pâte de bois. La préparation de cette pâte consiste à diviser le bois en fibres primaires en évitant le plus possible de les dégrader. La division se fait en supprimant la lignine qui est la colle naturelle du bois et qui lui donne sa robustesse, en assemblant entre elles toutes les fibres de cellulose. Cette séparation est obtenue soit par des moyens mécaniques, soit par action de réactifs chimiques comme dans le cas du procédé kraft. Après l'obtention de cette pâte, on procèdera à un traitement au cours duquel les fibres sont plus au moins rompues selon la masse volumique désirée, puis vient la formation de la feuille par encollage, ensuite l'élimination de l'eau par égouttage, essorage et enfin séchage entre rouleaux chauffés [14].

## **1.4. Propriétés du papier**

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 principales propriétés sont les propriétés physiques, électriques, mécaniques et thermiques.

### **1.4.1. Les propriétés physiques**

Les propriétés physiques du papier non imprégné sont fortement influencées par sa teneur en eau, qui dépend elle-même de l'humidité de l'atmosphère ambiante [18].

#### **1.4.1.1. Epaisseur**

L'épaisseur du papier est toujours définie par l'application à laquelle il est destiné. Cette épaisseur varie de 5 à 25  $\mu\text{m}$  pour le papier destiné aux condensateurs et de 75 à 200  $\mu\text{m}$  pour le papier destiné aux câbles électriques. Les papiers de guipage des conducteurs que l'on rencontre dans les enroulements des transformateurs sont assez fins, ne dépassant pas 75  $\mu\text{m}$  [9]. L'épaisseur du papier servant de séparation entre couche dans les transformateurs varie de 0,1 à 1 mm [19]. Toutefois, la meilleure rigidité diélectrique est obtenue en réalisant une isolation constituée par la superposition de plusieurs couches d'un papier très fin plutôt que par l'utilisation d'une seule couche de papier d'épaisseur plus grande [9].

#### **1.4.1.2. Masse volumique**

Le papier est constitué d'une association de cellulose et de l'air. La masse volumique varie selon la qualité de papier et le procédé de fabrication. La masse volumique de la cellulose est de 1,4  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Pour le papier destiné à la construction des transformateurs de puissance et des câbles électriques, elle est plus faible, variant de 0,85 à 1,25  $\text{g}/\text{cm}^3$  [20,21]. La masse volumique du papier pour condensateur se situe quant à elle entre 1,1 et 1,3  $\text{g}/\text{cm}^3$ . La masse volumique et l'imperméabilité à l'air sont des caractéristiques importantes à considérer dans la mesure où le papier, une fois imprégné, doit supporter une tension élevée et assurer une bonne tenue aux ondes de chocs [9].

### 1.4.1.3. Hygroscopicité du papier

L'hygroscopicité élevée du papier est due au caractère polaire de la cellulose. Une partie de l'eau est fixée aux groupements hydroxyle (OH) par des liaisons hydrogènes [3], tandis qu'une autre partie pénètre librement dans les capillaires par absorption classique lorsque le papier est plus humide [9].

## 1.4.2. Les propriétés électriques du papier

### 1.4.2.1. La permittivité et le facteur de pertes diélectriques

La permittivité relative  $\epsilon_r$  d'un isolant est le rapport de la capacité  $C_x$  d'un condensateur dans lequel l'espace entre les électrodes et au tour 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 [1]:

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (1.1)$$

La permittivité relative et le facteur de dissipation diélectrique dépendent de la masse volumique du papier, de la présence des groupements hydroxyle dans la cellulose qui provoque l'apparition d'une bande d'absorption diélectrique localisée à basse température, c'est pourquoi l'on observe une augmentation des pertes de papier vers les faibles températures. 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<sup>3</sup> [9].

La permittivité et le facteur de pertes diélectriques du papier, ont été particulièrement étudiés en vue d'élaborer des méthodes de mesure permettant de déterminer la teneur en eau du papier au cours du séchage [14].

### 1.4.2.2. Conductivités

Sous de faibles contraintes électriques, le papier non imprégné peut être considéré comme l'association en série de deux condensateurs dont les diélectriques sont respectivement la cellulose et l'air.

Cette association conduit aux températures élevées et aux basses fréquences, à un phénomène de dispersion du type Maxwell-Wagner. En effet, la conductivité de la cellulose est susceptible de provoquer une accumulation de charges aux interfaces cellulose-air. Pour un papier pur, ce phénomène ne peut être observé qu'aux basses fréquences de l'ordre de  $10^{-4}$  Hz à  $100^\circ$  C.

La présence des impuretés ioniques provenant du bois ou absorbées pendant la fabrication du papier ainsi que la présence d'humidité dans le papier provoquent, à la fréquence de 50 Hz, une augmentation des pertes vers les hautes températures [9].

#### 1.4.2.3. Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un isolant représente la valeur maximale du champ (V/m) que l'isolant peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique (donc un court circuit) conduisant à la destruction de l'isolant. Cette valeur maximale de la tension appliquée aux bornes est appelée tension de claquage  $U_c$  (rupture du diélectrique). La rigidité du milieu est définie par l'équation suivante [1]:

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

Avec  $d$  : c'est l'épaisseur de l'isolant placé entre les électrodes d'essai auxquelles est appliquée la tension  $U_c$ .

Les papiers font l'objet d'un certain nombre de contrôles ayant pour but de détecter des points faibles, en particulier la présence d'inclusions conductrices susceptibles de réduire la tenue diélectrique du papier quand il sera à l'état imprégné [9].

La rigidité diélectrique du papier non imprégné peut être considéré médiocre, elle est à peine supérieure à celle d'un film d'air de même épaisseur, elle est de l'ordre de 50kV/cm pour le papier presspahn et de 30 kV/cm environ pour l'air à 50 Hz. Cette rigidité s'améliore considérablement lorsque le papier est imprégné [3].

### 1.4.3. Les propriétés mécaniques du papier

Lors de la mise en œuvre des papiers ou des cartons comprimés, les principales propriétés mécaniques à prendre en compte sont la résistance à la traction et au déchirement, la résistance au pliage et pour certains usage, la compressibilité [14].

#### 1.4.3.1. 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 suspendue par l'une de ses extrémités, elle se rompe sous son propre poids [14]. Dans la fabrication des transformateurs, la résistance à la traction d'un papier de classe A en fonction de la température de séchage est représentée à la figure 1.2. Cette résistance est déterminée après 6 heures de séchage aux différentes températures. Si nous augmentons la température de séchage de  $T_1$  à  $T_2$ , il faut diminuer le temps de séchage de  $t_1$  à  $t_2$  tel que :

$$t_2 = t_1 \cdot e^{-k(T_2 - T_1)} \quad (1.3)$$

: coefficient qui dépend de la nature du matériau et des conditions où il se trouve.

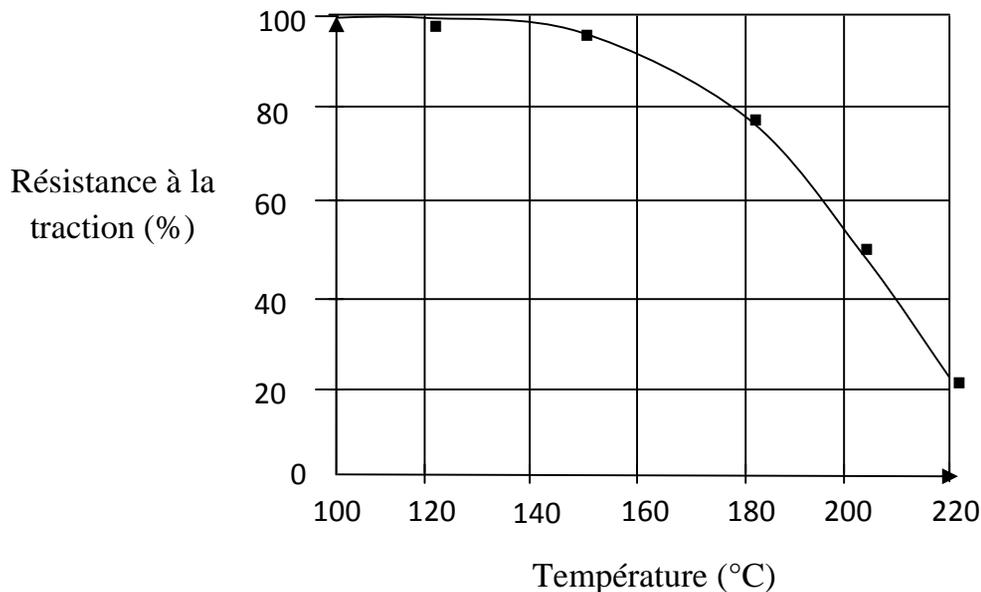


Figure 1.2. Variation de la résistance à la traction en fonction de la température de séchage [14].

#### **1.4.3.2. Résistance au déchirement**

Elle est définie comme étant la force moyenne exercée pour poursuivre le déchirement amorcé par une taille initiale dans une éprouvette généralement constituée d'une liasse de feuille de papier [9].

#### **1.4.3.3. Résistance au pliage**

On la détermine au moyen d'un dispositif normalisé par le nombre de doubles pliages que peut supporter une bande de papier, sous tension constante sans se rompre [9].

#### **1.4.3.4. Résistance à l'éclatement**

Elle est évaluée par son indice qui est égal au quotient de la pression hydraulique exprimée en millibars, exercée sur une éprouvette par l'intermédiaire d'une membrane en caoutchouc à l'instant de l'éclatement, par la masse de papier en gramme par mètre carré [9].

#### **1.4.4. Propriétés thermiques du papier**

Les propriétés thermiques du papier sont un facteur très important pour le bon comportement en service d'une isolation. L'une des contraintes thermique à laquelle sont soumis les matériaux isolants utilisés en électricité est l'échauffement des parties actives. Cet effet concerne, à court terme le comportement instantané d'isolant aux températures élevées qui est le claquage thermique et à long terme la dégradation de l'isolant qui s'opère progressivement au cours du temps rendant compte du vieillissement. Parmi ces propriétés il est impératif de citer :

##### **1.4.4.1. La conductibilité thermique**

La conductibilité thermique permet de limiter l'élévation de la température de l'isolation et par suite d'éviter le claquage thermique et d'atténuer le vieillissement de l'isolation.

Le papier doit avoir une bonne stabilité thermique dont il faut tenir compte lors du séchage et du traitement sous vide d'une isolation avant imprégnation afin d'éviter une dégradation éventuelle du papier lors de ce traitement [9].

### **1.5. Séchage du papier**

Le séchage du papier entraîne l'extraction de l'eau de la masse du papier. Pour pouvoir briser les liaisons existantes entre l'eau et la cellulose, il faut maintenir le papier sous vide et à température élevée pendant plusieurs heures.

Dans l'industrie des transformateurs, le séchage d'une isolation d'un transformateur HT s'effectue en deux phases :

- La première est un pré séchage en présence d'air vers 90 à 100° C.
- La deuxième étape est un séchage à 120° C sous vide.

Après séchage, l'huile minérale utilisée comme imprégnant remplace l'eau et les gaz qui étaient présents dans le papier, sans qu'il soit possible d'éliminer totalement les molécules d'eau les plus solidement fixées à sa structure [14].

### **1.6. La teneur en eau**

Le papier est très hygroscopique, il absorbe la vapeur de l'air. Sa teneur en eau dépend de l'état hygrométrique de l'air et de la température [14]. En équilibre, avec une atmosphère à température et humidité contrôlées, la teneur en eau du papier est gouvernée par la température et la pression partielle de la vapeur d'eau.

Il est à noter, qu'une teneur en eau élevée du papier aura une influence très forte sur ses propriétés, telle que la résistance à la traction qui décroît avec l'augmentation de sa teneur en eau ainsi que sa tension de claquage qui diminue considérablement. L'eau a également pour effet d'accélérer le vieillissement du papier [3].

### **1.6.1. Détermination de la teneur en eau du papier**

La détermination de la teneur en eau du papier se fait par des méthodes directes et indirectes [9, 22, 23].

- Les méthodes directes sont basées sur la séparation de l'eau de la matrice du matériau en essai. La méthode la plus utilisée est celle dite de Karl Fischer qui est une méthode chimique, basée sur l'extraction de l'eau du papier à l'aide de méthanol dont on dose ensuite l'humidité.
- Les méthodes indirectes, utilisent les variations de certaines caractéristiques du matériau en fonction de l'humidité, la méthode la plus répandue est la méthode pondérale. Celle si consiste à mesurer la perte de masse suite a une température voisine de 105 °C à la pression atmosphérique.

## **1.7. Imprégnation du papier**

### **1.7.1. Imprégnant**

Le choix de l'imprégnant est important puisque c'est de lui que dépendent les caractéristiques de l'isolation, nous distinguons les huiles minérales et les liquides diélectriques chlorés [24].

Les huiles minérales isolantes sont des diélectriques les plus répandus dans l'isolation des équipements électriques en particulier dans les transformateurs de haute et moyenne tension. Elles sont obtenues à partir de fractions lourdes issues de la distillation fractionnée sous vide de pétrole brut. Ces derniers doivent passer par divers stades de raffinage pour donner des huiles isolantes conformes pour les applications électrotechniques. Ces distillats appelés huile de base serviront de matières premières pour la fabrication des différentes huiles qui seront choisies selon les propriétés et les caractéristiques que l'on veut leur conférer. 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. Au niveau international, la norme CEI 60296 spécifie les propriétés requises pour les huiles minérales utilisées dans les transformateurs [1].

Dans notre étude, nous avons choisi l'huile minérale comme imprégnant puisque nous avons travaillé sur le papier utilisé dans la fabrication des transformateurs de puissance. L'huile minérale dans les transformateurs de 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. Elle assure au papier une bonne tenue à la tension [21], des pertes diélectriques faibles et pour certaines applications, une permittivité relative élevée [9]. Elle est considérée comme un frein très efficace à la reprise d'humidité par une isolation cellulosique [25].

### **1.7.2. Rôle des huiles isolantes**

L'huile minérale isolante joue le rôle d'isolant entre différentes parties actives des transformateurs ; isolation entre les enroulements basse et haute tension, isolation entre enroulements et cuve (terre). Le rôle principal des huiles est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer les propriétés diélectriques. Elle joue aussi le rôle de refroidisseur en captant la chaleur dissipée par les éléments actifs pour la rejeter dans le milieu ambiant [26].

### **1.7.3. Propriétés physiques de l'imprégnant**

Les propriétés physiques de l'huile minérale sont [14] :

- Couleur jaune claire.
- Densité variable de 0,85 à 0,95.
- Viscosité variable suivant la température et la nature de l'huile.
- Point de congélation variable suivant la composition de l'huile et sa pureté, il doit être inférieur à (-30° C).

- Chaleur massique à 50° C est de 0,4 à 0,5 kcal /kg.
- Conductibilité thermique est de 3 à 4.10<sup>-2</sup> cal/ms.
- Coefficient de dilatation 7 à 8.10<sup>-4</sup>.
- Point d'éclair (température d'inflammation des vapeurs d'huile) doit être supérieur à 155° C.
- Point de feu (température de combustion continue) doit être supérieur à 165° C.
- L'huile absorbe l'humidité d'air.

#### 1.7.4. Propriétés chimiques

L'huile doit avoir une acidité minérale nulle et organique très faible. L'huile s'oxyde au contact avec l'air et sous l'effet de la température, il y a formation de produits acides et de boues qui se déposent. On évite l'oxydation par réduction de la surface en contact avec l'air [14].

#### 1.7.5. Propriétés électrique

L'huile pure est un excellent isolant, sa rigidité diélectrique peut atteindre 90 à 100 kV/mm. Toutefois la présence d'impuretés comme l'humidité et les produits acides peut diminuer considérablement. Sa résistivité se situe entre 5 et 10 10<sup>15</sup> .cm [14].

##### 1.7.5.1. La permittivité relative

Comme pour le papier, la permittivité relative  $\epsilon_r$  de l'huile isolante est définie comme 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 d'huile isolante en question, à la capacité  $C_0$  de la même disposition d'électrodes dans le vide [1]:

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (1.4)$$

La permittivité absolue est le produit de la permittivité relative  $\epsilon_r$  par la permittivité du vide  $\epsilon_0$  ( $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ ).

La permittivité est une caractéristique intrinsèque d'un produit. Elle dépend essentiellement de la structure chimique et du caractère polaire. Elle décroît légèrement avec la température et la fréquence. La permittivité des huiles minérales varie légèrement autour de 2 à 25 °C [1].

### **1.7.5.2. La conductivité**

La conductivité d'un liquide isolant est due à la présence d'impuretés résiduelles inusables en très faible concentration. Sous l'effet du champ électrique, les ions migrent, provoquant ainsi un courant de conduction. Plus la température est élevée, plus la viscosité du liquide est faible et, par conséquent, plus la mobilité des ions est grande. De plus, la dissociation des impuretés en ions est d'autant plus forte que la température est élevée. La conductivité d'un liquide augmente donc quand la température augmente. Le vieillissement d'un liquide isolant conduit à la formation de sous-produits qui contribuent à l'augmentation de la conductivité. Les huiles isolantes ont une conductivité de l'ordre de  $10^{-11}$  à  $10^{-13} \text{ S.m}^{-1}$  [1].

### **1.7.5.3. La rigidité diélectrique**

La rigidité diélectrique (V/m) est le champ électrique minimal qui provoque le claquage d'un matériau. Le claquage d'un liquide conduit à la décomposition de ses molécules par rupture des liaisons chimiques entre les atomes.

### **1.7.6. Caractéristiques thermiques**

Les caractéristiques thermiques les plus importantes sont :

### **1.7.6.1. La viscosité**

La viscosité, et sa variation avec la température, sont des paramètres très importants dans le transfert thermique. Plus le liquide est visqueux, plus il est difficile de le faire circuler dans l'appareil pour refroidir les parties actives. La viscosité des hydrocarbures est corrélée à leur masse moléculaire : plus un produit est léger, plus sa viscosité est faible.

Cependant, plus un produit à une faible masse moléculaire, plus il est volatil, et plus il est inflammable. Le choix du liquide doit donc être toujours gouverné par un compromis [1].

### **1.7.6.2. Le point de l'écoulement**

Le point de l'écoulement est aussi un paramètre important dans le choix du liquide destiné à évacuer des calories. Il est défini comme une température maximale au-dessous de laquelle la circulation du liquide ne peut s'établir. Cette température ne doit pas être considérée comme une température de solidification de l'huile dans les équipements en exploitation. Car le point d'écoulement est associé aux problèmes potentiels de surchauffe locale et donc à la dégradation thermique accélérée des matériaux (papier et l'huile) [1].

### **1.7.6. La capacité et la conductivité thermique**

La capacité et la conductivité thermique sont des paramètres importants dans l'isolation électrique, ils déterminent la capacité de l'huile à évacuer la chaleur. Une évolution anormale de ces paramètres peut engendrer des échauffements qui peuvent entraîner la réduction des propriétés électriques ou mécaniques des matériaux isolants. La capacité thermique croît avec la température et décroît avec la masse volumique. Dans les huiles minérales, cette capacité varie entre 1600 et 2100 J.kg<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup> à 20°C. La conductivité thermique est inversement proportionnelle à la masse volumique et décroît avec la température. Elle est comprise entre 0,11 et 0,16 W. m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> [1].

### 1.7.7. Teneur en eau

Les propriétés diélectriques de l'huile sont fortement tributaire de son niveau d'humidité. L'eau peut se trouver sous forme de vapeur d'eau, ou de gouttelettes lorsque la saturation est atteinte. La figure 1.3 représente les variations de la teneur en eau en fonction de la température pour une huile neuve et une huile altérée.

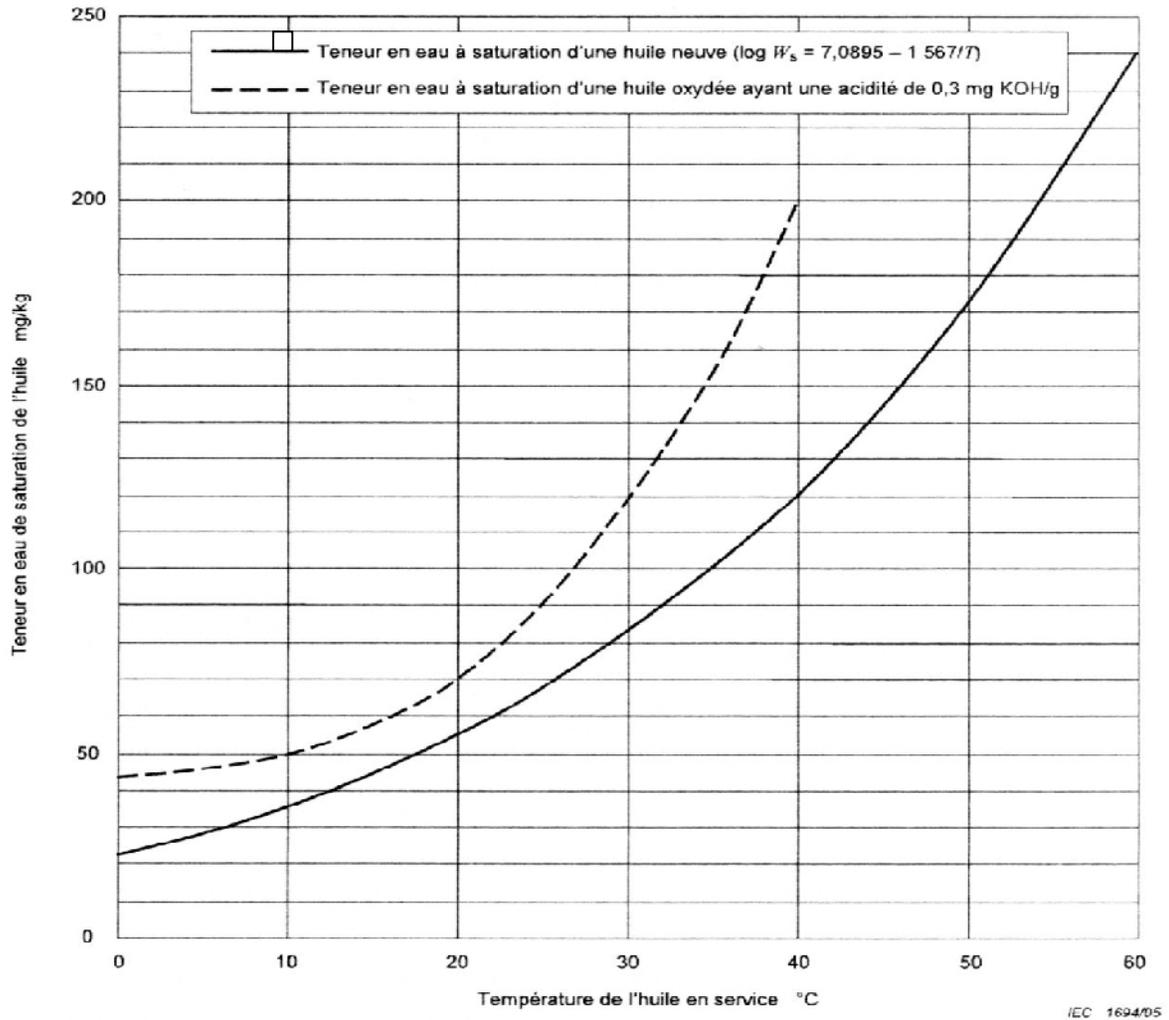


Figure 1.3. Variation de la teneur en eau à saturation, en fonction de la température, pour une huile neuve et une huile âgée, conformément à la norme CEI 60296 [1].

### 1.7.8. Dégradation de l'huile

La constitution chimique très complexe de l'huile minérale rend très difficile l'explication des mécanismes qui régissent les réactions d'oxydation pouvant l'affecter.

Le vieillissement de l'huile et son altération en service sont dues à l'oxydation de certains constituants sous l'action de l'oxygène et de la température et sont accentués par des facteurs extérieurs comme l'eau, les métaux dissous, le dioxyde de carbone et autre facteurs. Les conséquences de la dégradation sur l'isolant se manifestent par [27]:

- Une mauvaise évacuation de la chaleur.
- Une augmentation des pertes diélectriques et de la conductivité.
- Une dégradation plus rapide de l'isolation cellulosique.
- Une possible corrosion des pièces métalliques.

## 1.8. Papier imprégné

Nous avons présenté les différentes propriétés du papier et de l'imprégnant (huile minérale). Dans ce qui suit, nous examinerons les principales modifications apportées à ces propriétés en particulier sur le plan électrique lorsque le papier est imprégné d'huile minérale. Les propriétés diélectriques du complexe ainsi constitué dépendent de l'imprégnant mais aussi de la qualité du papier et de sa masse volumique [9].

### 1.8.1. Hygroscopicité du papier imprégné

L'huile et l'air ambiant, ont à l'équilibre, des teneurs en eau sensiblement égales. Un papier imprégné, immergé dans l'huile, s'humidifiera comme s'il était à l'air quand le complexe papier-huile est exposé à une atmosphère humide. Il y a échange d'humidité entre l'air et l'huile d'une part et entre le huile et le papier d'autre part.

L'échange d'humidité entre air et huile obéit à une loi s'exprimant par [9] :

$$dE = vS(h_m - h)dt \quad (1.5)$$

$dE$  : la quantité d'eau qui pénètre dans l'huile pendant un temps  $dt$ .

$v$  : la vitesse de diffusion.

$S$  : la surface de séparation l'air /huile.

$h_m$  et  $h$  : les teneurs en eau de l'huile a l'équilibre et a l'instant considéré respectivement.

L'échange d'humidité entre le papier et l'huile dépend du taux d'humidité du papier. Lorsque le papier est sec la vitesse d'échange d'humidité est faible.

Elle devient plus élevée dès que le papier devient plus humide. L'établissement d'un équilibre entre l'air, huile et le papier dépend de quelques paramètres parmi lesquels:

- Le rapport entre les volumes du papier et l'huile.
- Le rapport entre le volume et la surface du papier.
- Le rapport entre la surface d'huile en contact avec l'atmosphère et le volume d'huile.
- L'état hygrométrique de l'atmosphère.
- Les températures respectives de l'atmosphère, du papier et d'huile.

## **1.8.2. Propriétés diélectriques du papier imprégné**

Les propriétés diélectriques du papier imprégné dépendent non seulement de l'imprégnant mais aussi de la qualité du papier lui-même, surtout de sa masse volumique [9]. Les trois facteurs principaux définissant les propriétés diélectriques du complexe papier-huile sont sa permittivité, son facteur de pertes diélectriques et sa rigidité diélectrique.

### **1.8.2.1. Permittivité relative**

La permittivité du papier imprégné dépend essentiellement de la masse volumique du papier. Elle est plus faible pour l'imprégnant, comparée a celle du papier. C'est le cas rencontré pour l'huile minérale utilisé pour le remplissage des transformateurs [9].

### **1.8.2.2. Les pertes diélectriques**

Le papier imprégné peut être considéré comme étant une association électrique en série de la cellulose et de l'imprégnant.

Les pertes diélectriques du papier imprégné sont très sensibles à sa teneur en eau. Celle-ci intervient surtout sur l'évolution de ces pertes avec la température.

Elles dépendent aussi de la masse volumique du papier. Ces pertes sont plus faibles pour l'imprégnant que pour le papier [9]. Plusieurs facteurs peuvent influencer sur la mesure de ces pertes diélectriques tels que la densité du papier, la pureté de l'eau ainsi que le traitement chimique de la pâte de bois lors de la fabrication. La mesure de pertes diélectriques en fonction de la température nous renseigne sur la contamination d'une isolation par des impuretés ioniques [9].

### **1.8.2.3. La rigidité diélectrique**

La présence d'un imprégnant participe à l'amélioration notable de la rigidité diélectrique du papier. La rupture diélectrique dans les papiers imprégnés débute par des décharges au niveau de l'imprégnant conduisant à la rupture totale de l'isolation. Cette rupture est influencée par des modalités d'application de la tension ainsi que de la géométrie de l'éprouvette. Cette caractéristique dépend aussi de l'épaisseur, de la densité et des impuretés qui sont liées aux matériaux ainsi que les conditions dans lesquelles elle a été déterminée [9]. D'après les expériences effectuées par Auckland et Al sur l'influence de la teneur en eau de l'huile d'imprégnation sur la rigidité diélectrique du complexe papier-huile [28]. Il a été constaté que la rigidité diélectrique diminue avec l'augmentation de la teneur en eau dans l'huile et une forte décroissance des tensions de claquage pour des teneurs en eau relativement faibles.

## **1.9. Application du papier**

Le papier presspahn est utilisé comme isolant entre spires et entre les enroulements des transformateurs de haute et moyenne tension. Il est utilisé aussi comme cales de fermetures des moteurs, joints et pièces divers.

## Chapitre 2

### Généralités sur la décharge couronne

## 2.1. Introduction

Le terme décharge couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans l'environnement d'un conducteur porté à une haute tension. Du point de vue physique, ce phénomène résulte de l'ionisation de l'air au voisinage immédiat d'un conducteur porté à un potentiel suffisamment élevé.

L'appellation « effet couronne » vient du fait que, dans le cas d'un fil conducteur assez fin le phénomène se manifeste par l'apparition d'une couronne lumineuse bleue violette autour du fil, lorsque la tension atteint un certain seuil. L'épaisseur de cette gaine lumineuse augmente au fur et à mesure que le potentiel du conducteur s'élève. Ce phénomène d'ionisation localisé est dû à des avalanches électroniques générées par les champs électriques élevés au voisinage du conducteur à faible rayon de courbure. Dans la pratique de l'isolation, le même phénomène peut apparaître au niveau de certaines aspérités ou imperfections des conducteurs.

A la différence des décharges électriques non autonomes, la décharge couronne appartient à la classe des décharges dites autonomes ou entretenues ne nécessitant aucune source extérieure d'ionisation pour persister. Toutefois, la présence d'un électron germe au bon endroit dans le voisinage de l'anode est nécessaire. Dans l'air atmosphérique, ce genre d'électron peut être le résultat de différentes causes (rayonnement UV, infrarouges, cosmiques...). Sur le plan expérimental, les systèmes les plus répandus pour la génération de l'effet couronne sont les systèmes pointe/plan, fil/plan et fil/cylindre.

## 2.2. Décharge couronne

La décharge couronne peut également être décrite comme une décharge électrique se développant dans un intervalle gazeux séparant deux électrodes fortement asymétriques. Dans ce cas il s'établit un champ électrique non homogène générant une ionisation locale pour des pressions allant de quelques torrs à plusieurs bars. On désigne sous le nom d'électrode active celle qui possède le plus petit rayon de courbure, la décharge étant alors positive ou négative selon que cette électrode joue le rôle d'anode ou de cathode. Le phénomène fondamental est toujours la dissociation

des atomes ou molécules en paires d'électrons et ions positifs. Les charges de signes opposés à celui du conducteur sont instantanément attirées vers lui et neutralisées alors que les charges de même signe sont repoussées. Si l'électrode active est anode, les ions positifs sont repoussés et traversent l'espace entre les deux électrodes. Pour une électrode active cathode, comme les électrons peuvent se prêter rapidement au phénomène d'attachement avec atomes ou molécules neutres, des ions négatifs sont formés et tout se passe comme si des ions de même polarité que l'émetteur étaient nés sous l'effet d'ionisation [29]. Notons que ce processus d'attachement a pour effet de diminuer fortement la mobilité des espèces négatives.

### 2.3. Topographie de la décharge couronne

Dans une configuration pointe-plan, la décharge couronne se décompose en deux régions [30, 31], comme l'indique la figure 2.1.

1. Une région avoisinant l'électrode à faible rayon de courbure dite active, où le champ intense permet l'ionisation du gaz. Cette zone existe toujours et cela pour tous les types de décharges dans les gaz. Elle est qualifiée de bipolaire puisqu'on y rencontre des porteurs de charge des deux signes.

2. Une région de dérive ionique où le champ n'est pas assez intense pour permettre des réactions d'ionisation. Par attachement électronique sur les particules du gaz, il y a formation d'ions qui se déplacent le long des lignes de champ et pouvant interagir chimiquement avec des molécules neutres. Ce phénomène est souvent appelé activation des espèces qui voient leur réactivité augmentée avec les molécules du gaz. Cette région joue le rôle d'une grande impédance en série avec la zone d'ionisation et assure ainsi la stabilité de la décharge. Cette zone de dérive, passive de point de vue électrique, sera donc le siège d'une activité physico-chimique complexe et intense. De nombreux radicaux et espèces activées produites par la décharge sont entraînés par les ions.

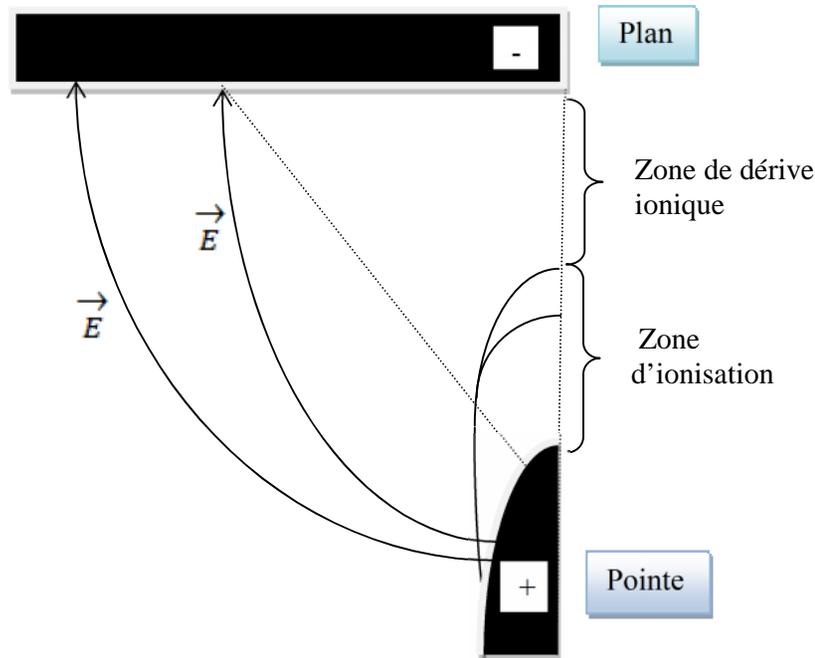


Figure 2.1. Topographie de la décharge couronne [31].

## 2.4. Les mécanismes de la décharge couronne

Pour bien expliquer le mécanisme du développement de la décharge couronne, les recherches antérieures ont abouti à sérier les phénomènes en deux catégories [32].

1) Décharge à long rayon d'action faisant intervenir l'intervalle inter-électrode tout entier, notamment les effets d'électrons secondaires à la cathode : c'est la décharge de Townsend.

2) Décharge à court rayon d'action, faisant intervenir la situation locale, charge d'espace et électrons secondaires extraits localement du gaz puis de la cathode : c'est la décharge par streamers.

### 2.4.1. Décharge de Townsend

Considérons un gaz (exemple l'air ambiant) à basse pression remplissant l'espace séparant deux électrodes planes. Il peut s'y trouver, en l'absence de tout champ appliqué, un certain nombre de particules chargées. Elles sont produites soit par des mécanismes artificiels (par exemple en bombardant la surface de la cathode avec

une source de rayonnement ultraviolet pour extraire des électrons), soit par des mécanismes naturels (par exemple la radioactivité ou les rayons cosmiques). Quelle que soit leur origine, ces charges primaires seront sensibles à la tension  $U$  appliquée à l'intervalle c'est-à-dire au champ électrique  $E$ . Elles vont générer l'apparition, dans le circuit extérieur, d'un courant de très faible intensité augmentant avec la tension appliquée  $U$  [33].

Considérons un système d'électrodes planes, créant un champ homogène  $E$  dans un gaz à basse pression, figure 2.2. Un électron germe, accéléré par le champ électrique  $E$  appliqué, acquiert une énergie cinétique. A partir d'une certaine valeur du champ électrique, cette énergie devient suffisante pour pouvoir ioniser une espèce neutre, par collision. Les nouveaux électrons créés vont participer, à leur tour au mécanisme d'ionisation des molécules neutres, produisant ainsi une multiplication électronique.

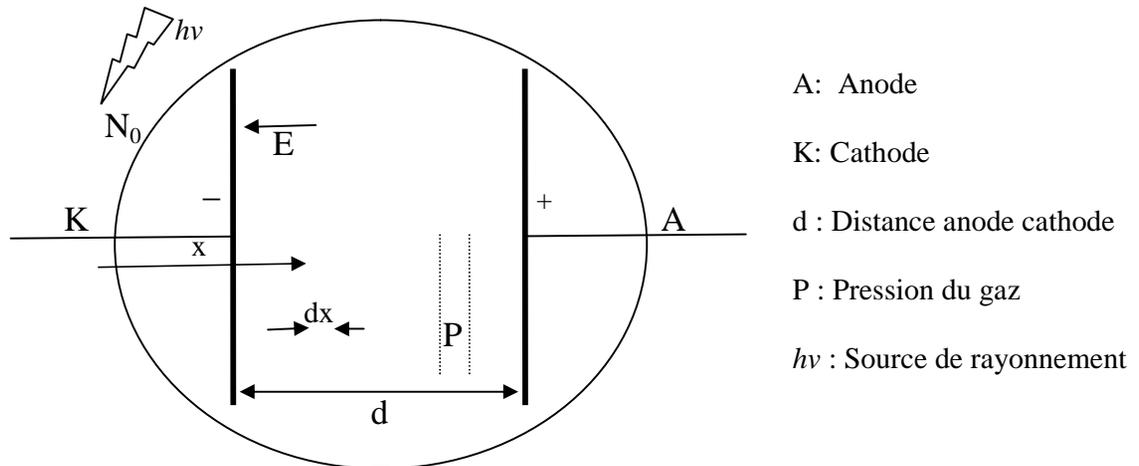


Figure 2.2. Réalisation d'une décharge de Townsend à courant continu.

Si les électrons primaires sont produits par extraction à partir de la cathode, avec un taux de production  $N_0$ , et si  $N_x$  est le nombre d'électrons produits par avalanche à la distance  $x$  de la cathode, le nombre  $dN$  de nouveaux électrons produit entre  $x$  et  $(x + dx)$  sera donné par :

$$dN = N \cdot \alpha dx \quad (2.1)$$

$\alpha$  : est appelé le premier coefficient de Townsend. Il représente le nombre d'ionisations par unité de longueur de parcours d'un électron soumis au champ électrique E. Le coefficient  $\alpha$  dépend de la nature du gaz, du champ électrique E ainsi que de la pression P du gaz. La valeur de  $\alpha$  étant constante, l'intégration de la relation (2.1) donne :

$$N = N_0 \cdot e^{\alpha x} \quad (2.2)$$

Le courant d'électrons produit à une distance x de la cathode est :

$$I_e(x) = I_0 \cdot e^{\alpha x} \quad (2.3)$$

Pour une distance inter-électrodes d, le courant mesuré à l'anode c'est-à-dire dans le circuit extérieur est donné par la relation suivante :

$$I = I_0 \cdot e^{\alpha d} \quad (2.4)$$

Nous voyons que le courant de décharge tend vers une limite,  $\alpha d$  étant constant. Le coefficient  $\alpha$  dépend de la pression qui régit le libre parcours moyen. Il y a donc un élément important dont il faudra tenir compte. C'est le champ réduit E/P, en somme l'effet combiné de la distance et de la pression.

Si dans le dispositif de la figure 2.2, nous faisons varier d tout en gardant constant le rapport E/P, nous remarquerons une augmentation, d'abord linéaire puis une augmentation beaucoup plus forte pour une certaine distance. Cela est illustré par la figure 2.3. Cette brusque augmentation s'explique par l'impact d'ions positifs sur la cathode. Cet impact va extraire des électrons nouveaux qui viendront participer à l'augmentation du courant. Nous définissons alors un autre coefficient appelé deuxième coefficient de Townsend. Il représente le rapport ou le nombre moyen d'électrons émis à la cathode par les ions positifs incidents.

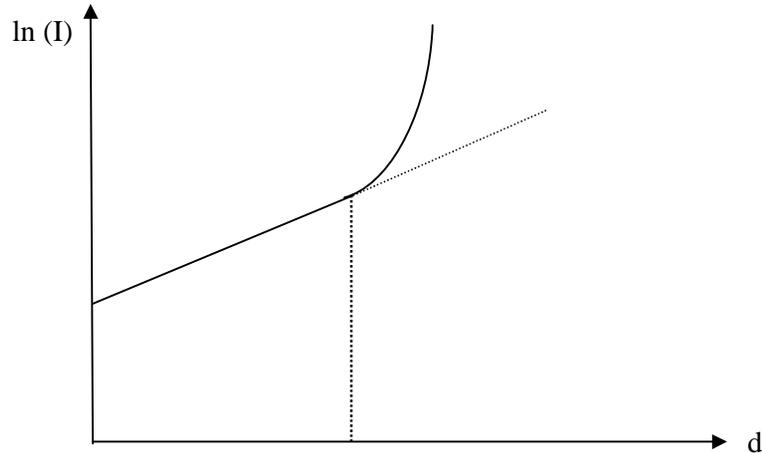


Figure 2.3. Courant de décharge en fonction de la distance inter-électrode [34].

Les  $N_0$  électrons primaires émis par la cathode donnent en retour  $N_0 [e^{-\alpha d} - 1]$  ions positifs. Ces derniers vont produire, par bombardement de la cathode  $\gamma N_0 [e^{-\alpha d} - 1]$  électrons secondaires ; c'est-à-dire de nouveaux électrons qui se multiplieront à leur tour comme les électrons initiaux. Le nombre d'électrons atteignant l'anode est donné par l'équation suivante :

$$N = N_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.5)$$

Le critère de claquage de Townsend se traduit par l'existence d'une distance critique  $d$  pour laquelle le courant  $I$  croit vers l'infini. Ce critère s'écrit.

$$1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1) = 0 \quad (2.6)$$

Dans les zones à faible champ, l'attachement électronique ne peut être négligé. Ce phénomène est caractérisé par le coefficient d'attachement  $\beta$  qui s'oppose au processus  $\alpha$ . Il représente le nombre d'électrons captés, par les molécules du gaz, par unité de longueur. On définit alors le coefficient effectif d'ionisation  $\bar{\alpha}$  comme étant égal à :

$$\bar{\alpha} = \alpha - \beta \quad (2.7)$$

La théorie de Townsend fait intervenir tout l'intervalle inter-électrodes. Elle prévoit à des pressions élevées, des temps de transition des charges entre les électrodes beaucoup plus grand que le temps de formation de la décharge. Ceci permet d'écartier

le processus secondaire « », car les ions positifs sont freinés et leur énergie cinétique n'est plus suffisante pour extraire des électrons supplémentaires de la surface cathodique. Les travaux de Fletcher, confirment la non validité de la théorie de Townsend pour les pressions élevées du gaz et en champ uniforme. Cependant cette théorie conserve sa validité pour des valeurs du produit  $P.d$  inférieures à 200 Torr.cm [33].

Il est clair que, dans le cas des fortes pressions, les processus mis en jeu ne sont plus ceux de la décharge de Townsend. Des études utilisant des techniques de photographie ultra rapide ont conduit à invoquer un nouveau mécanisme de claquage lié à l'existence de dards lumineux ou streamers constituant des canaux conducteurs.

#### **2.4.2. Décharge par streamer**

Dans certains cas, il a été observé que la décharge se manifeste par la formation de filaments lumineux se propageant d'une électrode à l'autre. C'est la formation du streamer ou du dard [33]. Leur formation s'explique par le mécanisme de photo ionisation du gaz au sein de la charge d'espace générée par la première avalanche de Townsend au voisinage de la cathode. Les électrons accélérés par le champ électrique excitent par collision des molécules neutres qui, en revenant à leur état fondamental, émettent des photons. Ces derniers sont absorbés par le gaz inter-électrodes avec émission de photo électrons. Les électrons produits vont créer de nouvelles avalanches secondaires selon le même mécanisme de multiplication électronique décrit par Townsend. Ces avalanches secondaires vont se développer en charges d'espace en formant des dards lumineux qui, par une succession de phénomènes semblables, se propagent rapidement avec formation d'un filament continu de plasma (canal d'étincelles). Ce phénomène de streamer est caractérisé par un temps de développement d'environ  $10^{-8}$  secondes, alors que la décharge de Townsend nécessiterait un temps plus long de l'ordre de  $10^{-5}$  secondes pour entraîner un claquage [33].

Des critères ont été proposés par Meek [33] et Raether pour estimer le champ électrique permettant la transformation d'une avalanche en streamer. Raether a établi

un critère simple qui explique que l'avalanche doit atteindre une taille critique  $L_c$  pour que le streamer puisse se développer.

La décharge couronne peut être considérée comme la superposition de deux régimes de décharge. Le premier est celui de Townsend qui se développe près de l'anode, le second est le processus de streamer qui prend naissance avec la photo ionisation dans le gaz inter-électrodes à la fin de la première avalanche de type Townsend.

### 2.5. Décharge couronne en géométrie pointe-plan

Le système d'électrodes pointe-plan est constitué, d'une électrode cylindrique de faible rayon de courbure tendue à une distance  $d$  d'un plan mis à la terre ; figure 2.4.

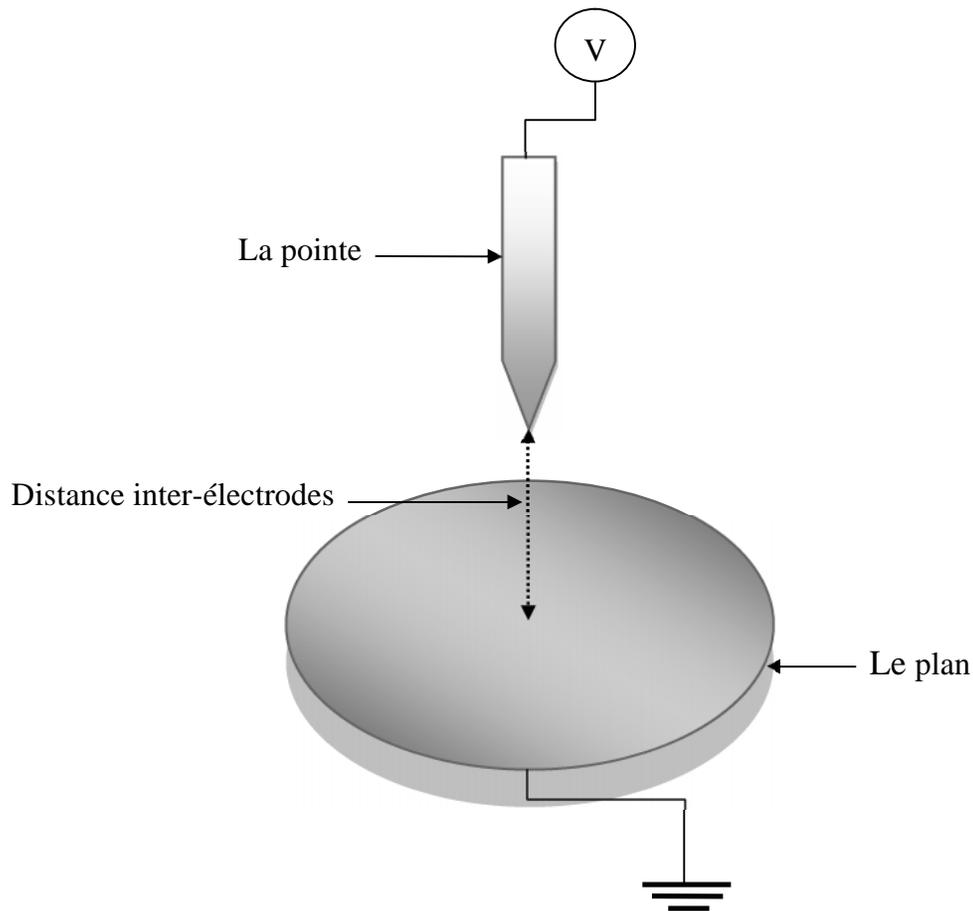


Figure 2.4. Système d'électrodes pointe-plan.

## 2.6. Décharge couronne en pointe positive

La décharge se développe par l'apparition de la première avalanche au niveau de la pointe. Les électrons vont vers l'anode où ils sont neutralisés et les ions positifs forment une charge d'espace devant la pointe. Cette charge d'espace constitue un canal ionisé dont l'aspect visuel est celui d'une chevelure issue d'une électrode positive, qui est appelée streamer. Le champ électrique est renforcé à la pointe de la charge d'espace qui constitue un prolongement fictif de l'électrode positive. D'autres avalanches secondaires prennent naissance devant la charge d'espace. Elles constituent des streamers qui vont s'allonger. Au point de jonction de ces streamers, le courant électrique peut devenir très intense. Il se forme en ce point une zone à très forte conductivité dont les caractéristiques sont similaires à celles d'un arc. Cette zone de forte conductivité se développe pour former un canal appelé « leader ». Ce canal transmet le potentiel de l'électrode jusqu'à sa pointe, ce qui permet la formation de nouveaux streamers en avant de cette pointe. Lorsque les streamers atteignent l'électrode opposée, commence le processus appelé « saut final ». A cet instant le leader se propage très rapidement jusqu'à la cathode et un pont de forte conductivité est ainsi établi dans l'espace inter-électrodes. Un courant intense peut circuler, le leader se transforme en un arc très lumineux qui constitue un véritable court-circuit de l'intervalle d'air [35].

## 2.7. Décharge couronne en pointe négative

L'avalanche prend naissance sur la pointe et se dirige vers l'électrode plane. Les électrons s'éloignent de la pointe et créent d'autres avalanches mais de plus en plus difficilement car, plus ils s'éloignent plus le champ diminue. Pour que la décharge se développe, il est nécessaire d'appliquer une tension plus grande que celle appliquée en polarité positive. Un canal de plasma « leader » constitué des charges issues des différentes avalanches se forme et se développe vers l'anode. Un arc s'établit lorsque le canal de forte conductivité atteint l'anode.

Finalement, l'effet couronne apparaît à des tensions plus faibles en pointe négative qu'en pointe positive :

$$U_0^- < U_0^+$$

Mais la décharge complète intervient à des tensions plus faibles en polarité positive qu'en polarité négative :

$$U_d^+ < U_d^-$$

## 2.8. Caractéristique courant-tension

Lorsqu'un champ électrique est appliqué à un intervalle gazeux, des charges résiduelles circulent en suivant ou en s'opposant au champ selon la polarité de la tension appliquée, pour former un courant de conduction. Au delà d'un certain seuil, le gaz présente une conductivité supérieure due à une ionisation complémentaire qui s'effectue par des collisions entre ses particules et les électrons et photons qui y sont créés. Des réactions en chaîne s'établissent au sein du gaz et ce phénomène de multiplication des électrons libres dans l'avalanche est appelé le «premier mécanisme de Townsend». L'allure de la caractéristique courant-tension d'un système d'électrodes très asymétrique est donnée par la figure 2.5, On distingue quatre régimes [30] :

Le premier régime (I) : consiste en la collecte des espèces chargées présentes naturellement dans le milieu (l'ionisation naturelle du gaz). Ces espèces sont produites par l'action des rayons cosmiques ou de particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes (radioactivité naturelle) sur le gaz dans l'intervalle de décharge. Il est caractérisé par un courant proportionnel à la tension appliquée tendant vers un courant de saturation déterminé par le mécanisme de renouvellement des électrons germes.

Le second régime (II) : qui se produit à partir d'une tension seuil  $V_0$ , traduit le déclenchement de l'avalanche électronique de Townsend mais ne répond pas encore au critère d'auto-entretien de la décharge. La décharge est qualifiée de non autonome car elle dépend de processus d'ionisation externes donnant naissance aux électrons germes. Pendant ce régime, le courant augmente très fortement pour une très faible variation de la tension appliquée.

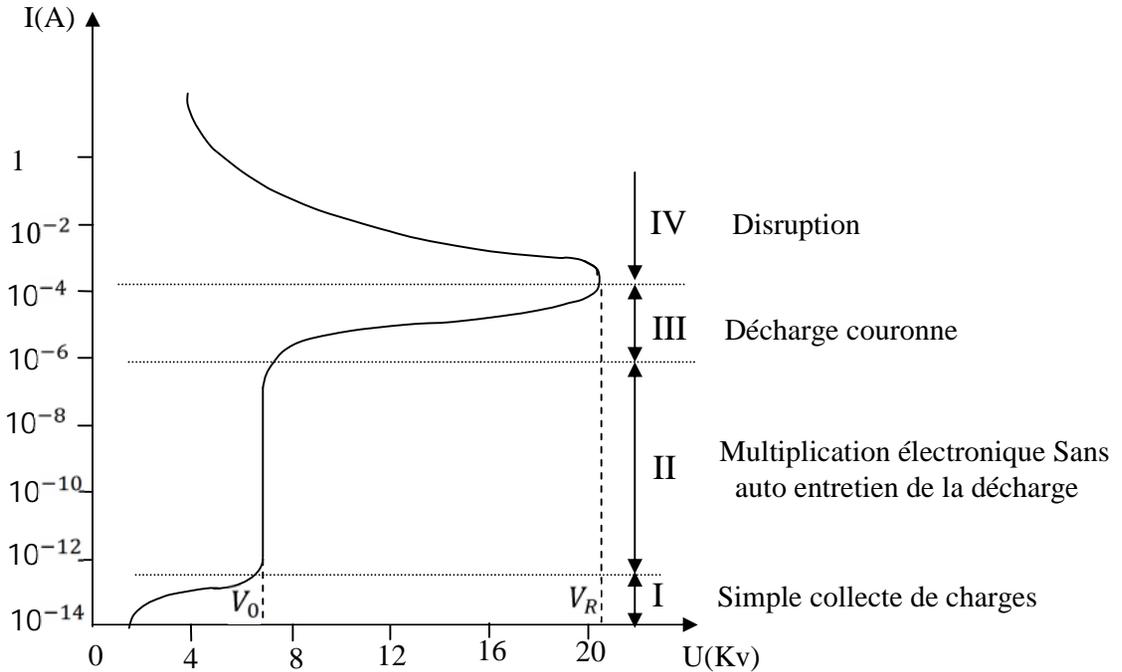


Figure 2.5. Caractéristique-courant tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique

(configuration pointe-plan, distance inter-électrodes de 13 mm) [36].

Le troisième régime (III) : l'ionisation du gaz par la décharge est suffisante pour ne plus nécessiter de phénomènes d'ionisation extérieurs ; la décharge est auto entretenue. C'est le régime de la décharge couronne, où apparaissent les dards appelés aussi « steamers » responsables de la composante impulsionnelle du courant.

Le quatrième régime (IV) : quand la tension dépasse une certaine valeur ( $V_r$ ), la température du canal augmente fortement, ce qui provoque la dilatation du gaz. Le champ est alors important pour que les phénomènes d'ionisation deviennent majoritaires par rapport à l'attachement électronique. On observe la transition du régime couronne au régime d'arc.

## 2.9. Champ Seuil de l'effet couronne

Lorsqu'un conducteur est soumis à une tension appliquée croissante, le champ seuil d'effet couronne est défini par l'apparition brusque d'une importante conductivité

de l'air dans son voisinage immédiat. Ce phénomène est observé depuis fort longtemps. On peut considérer que le véritable pionnier de l'étude scientifique de l'effet couronne est le chercheur américain R.W.PEEK. En s'inspirant de la loi théorique que Townsend a proposée en 1920 [37], il a suggéré pour la première fois une loi empirique établie en géométrie cylindrique dans l'air ambiant et en tension alternative [38]. Peek observera que l'apparition de la couronne était fonction du champ superficiel, du rayon du conducteur et de la densité de l'air. Il donna à sa loi la forme empirique suivante [34,37] :

$$E_{\text{Peek}} = 31.m.\delta \left( 1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta.R_0}} \right) \quad (\text{kV /cm}) \quad (2.8)$$

Dans cette équation constituant la loi de Peek :

$m$  : est un facteur dépendant de l'état de la surface de l'électrode active. En particulier,  $m = 1$  pour une électrode bien polie.

$R_0$  : rayon du conducteur (en cm).

$\delta$  : densité de l'air qui est égale à  $\delta = \frac{P}{760} \frac{298}{273 + T}$

$P$  : pression atmosphérique (en mmHg).

$T$  : température de l'air ambiant (en °C).

Depuis, d'autres formules empiriques et semi empiriques du champ seuil de l'effet couronne ont été proposées à l'issue de travaux expérimentaux et théoriques [29]. Ces expressions sont données sous la forme générale suivante :

$$E_s = F \left( 1 + \frac{G}{R^B} \right) \quad (2.9)$$

Où  $F$ ,  $G$  et  $B$  sont des constantes qui diffèrent d'un auteur à l'autre et  $R$  le rayon de l'électrode active.

Cependant, ces formules ne sont pas tout le temps valables. En effet, leurs auteurs ont tous utilisé la configuration fil-cylindre dans l'air sec. Ils ont fait

abstraction de l'humidité de l'air qui est un paramètre important. Quant aux lois semi-empiriques, elles se basent sur le critère de Townsend qui n'est pas justifié pour les grandes distances inter-électrodes, car le processus  $\gamma$  n'intervient pas.

D'autres études plus approfondies ont été menées ces dernières décennies [39]. Ces travaux s'inspirent de ceux de G. Hartmann [34] qui proposa dès 1984, un modèle physico-mathématique pour le calcul du seuil de l'effet couronne. Toutefois ce modèle ne tient pas compte de la photo-ionisation du gaz. Il se base d'une part sur la notion de la longueur critique de l'avalanche  $L_c$  définie par Nasser [38] et d'autre part sur un critère proposé à l'origine par Meek [37] amélioré ensuite par Hartmann [40] qui suppose qu'à la tête de l'avalanche, près de l'anode, les électrons ne peuvent se multiplier. Cela en raison des champs  $\vec{E}_s$  à la surface de l'anode et  $\vec{E}_p$ , dû à la charge d'espace en tête de l'avalanche, qui s'opposent et dont la somme algébrique est égale au champ critique du minimum d'ionisation  $E_c$  correspondant à ( $-\eta = 0$ ).

$$E_s + E_p = E_c \quad (2.10)$$

L'expression du champ seuil, à la surface de l'anode est donnée par l'équation suivante :

$$E_s = E_c \left( 1 + \frac{L_c}{R_0} \right) \quad (2.11)$$

$R_0$  est le rayon de l'électrode active en géométrie fil/cylindre et  $L_c$  la longueur critique de l'avalanche.

## 2.10. Facteurs influençant la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil de la décharge couronne. Nous distinguons trois facteurs essentiels : électriques, géométriques et physico-chimiques du gaz.

### **2.10.1. Facteurs électriques**

Les études antérieures des phénomènes liés à la décharge couronne, montrent l'influence de la polarité sur l'évolution de cette décharge. En effet, pour un système d'électrodes pointe-plan et pour une distance inter-électrodes donnée, la tension seuil d'apparition de l'effet couronne est plus faible en polarité négative qu'en polarité positive, tandis que le développement de cette décharge est plus rapide en polarité positive.

#### **2.10.1.1. Polarité positive**

La charge d'espace en polarité positive est constituée seulement d'ions positifs provenant de l'ionisation du gaz. Pour cela, il faut que la tension appliquée au système d'électrodes soit maintenue de façon à ce qu'un premier électron se dirige vers la pointe, acquiert une énergie suffisante pour ioniser les molécules neutres du gaz, et crée ainsi une première avalanche au voisinage de la pointe. Les électrons se dirigent vers l'anode où ils sont neutralisés, les ions positifs forment alors une charge d'espace. On pourra alors observer au niveau de la pointe une couronne lumineuse qui sera vite accompagnée de petites aigrettes.

#### **2.10.1.2. Polarité négative**

Dans ce cas l'émission d'électrons se fait au niveau de la pointe. La charge d'espace se constitue d'électrons extraits par l'effet de champ de la cathode en plus de ceux résultant des radiations naturelles ou des détachements à partir d'ions négatifs. C'est pour cela que l'effet couronne apparaît pour une tension plus faible en polarité négative.

### **2.10.2. Facteurs physico-chimiques du gaz**

Ces facteurs se résument en la nature du gaz, sa pression, son humidité et sa température.

### **2.10.2.1. Nature du gaz**

Les expériences ont montré que la tension de l'effet couronne diffère d'un gaz à un autre. Le caractère électronégatif des gaz comme le SF<sub>6</sub>, joue un rôle important au niveau des processus d'attachement.

### **2.10.2.2. Effet de la pression**

Une augmentation de la pression du gaz s'accompagne toujours d'une augmentation correspondante de la tension d'apparition de l'effet couronne à cause de la diminution du libre parcours moyen, empêchant les électrons d'acquérir une énergie suffisante entre les chocs.

### **2.10.2.3. Influence de la température**

A la pression normale, lorsque la température augmente, la rigidité diélectrique de l'air diminue, ce qui favorise la décharge couronne. Cela est dû au fait que dans ce cas le libre parcours moyen augmente.

### **2.10.2.4. Influence de l'humidité**

L'influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'air est très importante surtout dans le cas où le champ électrique est non uniforme. Lorsque le taux d'humidité augmente, la tension de décharge augmente. En effet les électrons libres dans l'air deviennent des centres de condensation de la vapeur d'eau, leurs masses augmentent et ils perdent leurs mobilités, donc leurs pouvoirs ionisants.

## **2.10.3. Influence des paramètres géométriques**

### **2.10.3.1. Influence du rayon de courbure**

D'après les travaux expérimentaux antérieurs, les résultats obtenus permettent de conclure que l'augmentation de rayon de courbure a pour conséquence une augmentation de la tension seuil d'apparition d'effet couronne. En effet toute augmentation du rayon de courbure diminue le champ au voisinage de l'électrode active.

### **2.10.3.2. Influence de la forme d'électrodes**

En champ non uniforme, comme c'est le cas en géométrie pointe-plan, la décharge couronne est caractérisée par une tension seuil  $V_s$  d'apparition et une tension  $V_a$  de sa transition vers l'arc électrique. Par contre en champ uniforme, dès son apparition la décharge transite rapidement vers l'arc électrique, autrement dit  $V_s$  et  $V_a$  sont confondues.

### **2.10.3.3. Distance inter-électrodes**

A pression constante, le seuil d'amorçage de la décharge augmente avec la distance inter-électrodes  $d$ . En effet, l'accroissement de cette distance rend plus difficile la transition à l'arc.

## **2.11. Conclusion**

La décharge couronne regroupe l'ensemble des phénomènes électriques qui se développent dans des intervalles gazeux, soumis à des champs fortement non uniformes obtenus par une configuration asymétrique des électrodes. L'une présentant un rayon de courbure très faible dite électrode active par opposition à l'autre appelée électrode passive.

## Chapitre 3

Influence de la barrière sur la décharge couronne

### 3.1. Introduction

Le développement industriel exige de plus en plus une grande consommation d'énergie. Pour le transport d'une puissance électrique élevée, il faudrait utiliser des distances d'isolations importantes engendrant ainsi des contraintes pratiques et économiques. En l'occurrence, l'un des moyens utilisés pour réduire ces distances d'une part et d'augmenter la tension d'autre part, on trouve l'emploi des barrières isolantes entre les parties sous tension et la terre des petits et moyens intervalles. En effet on trouve particulièrement l'emploi des barrières dans les appareils de coupure notamment dans les systèmes d'isolement en SF<sub>6</sub> et les bornes de traversées [41]. Ainsi l'insertion d'une barrière isolante dans un intervalle pointe-plan (air ou isolant liquide) affecte la tension de claquage [42].

L'insertion d'une barrière isolante dans un intervalle d'air pointe-plan affecte la tension disruptive. En effet la barrière permet d'uniformiser le champ électrique entre la barrière et le plan mis à la terre et améliore la rigidité du système pointe-plan [43].

### 3.2. Décharges à barrière diélectrique

La décharge à barrière diélectrique (DBD) est caractérisée par la présence d'au moins une couche diélectrique entre les électrodes. On trouve également des dispositifs à DBD qui comportent une ou deux couches diélectriques directement en contact avec les électrodes [44]. Ce dispositif a été proposé en 1857 par Siemens dans le cadre de la production d'ozone. Les matériaux diélectriques couramment utilisés sont : le verre, le quartz, les céramiques et les polymères [4].

Le diélectrique, en tant qu'isolant électrique, bloque le passage d'un courant de conduction. Le rôle principal du diélectrique est d'éviter la formation d'un arc électrique qui se produit entre les deux électrodes [45].

### 3.3. Différents types de configuration de DBD

Suivant le type d'application envisagée, plusieurs formes et dispositions du couple électrodes-diélectrique sont utilisées. Les électrodes cylindriques sont plus

adaptées au traitement des gaz, alors que les structures coplanaires sont plutôt utilisées pour les problèmes de traitement de surface figure 3.1.

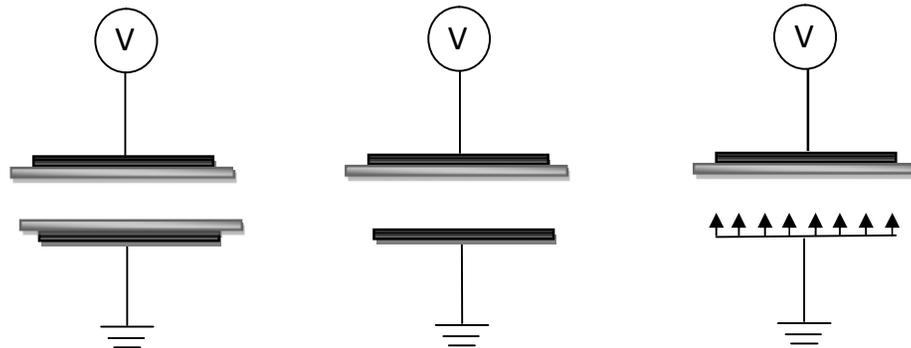


Figure 3.1. Différentes configurations de la décharge à barrière diélectrique.

Lorsque le matériau à traiter est le diélectrique lui-même, il peut être intéressant de le placer au milieu de l'espace inter-électrode, afin que la décharge se produise de part et d'autre de celui-ci, permettant ainsi le traitement des deux faces simultanément [46].

Lorsque le gaz est de nature corrosive, placer un diélectrique sur chacune des électrodes permet d'éviter tout contact entre le gaz et les électrodes [47].

Mais la configuration la plus utilisée « classique » consiste simplement à déposer le diélectrique sur l'une des deux électrodes. C'est ce cas que nous avons adopté dans notre étude où nous avons utilisé le système pointe-plan avec du papier isolant comme diélectrique (figure 3.2).

### 3.4. Configuration d'une DBD en géométrie pointe-plan

Dans cette configuration (figure 3.2), l'insertion de la barrière isolante dans un intervalle pointe-plan modifie la distribution des lignes de champ électrique. En conséquence le champ électrique élevé près de la pointe produit des décharges couronne et conduit à l'accumulation des charges électrostatiques sur la surface de la barrière. Simultanément, une charge opposée apparaît sur la face inverse de la barrière,

ainsi le système pointe-barrière-plan peut être équivalent à deux systèmes : un système pointe-plan et un autre plan-plan [47].

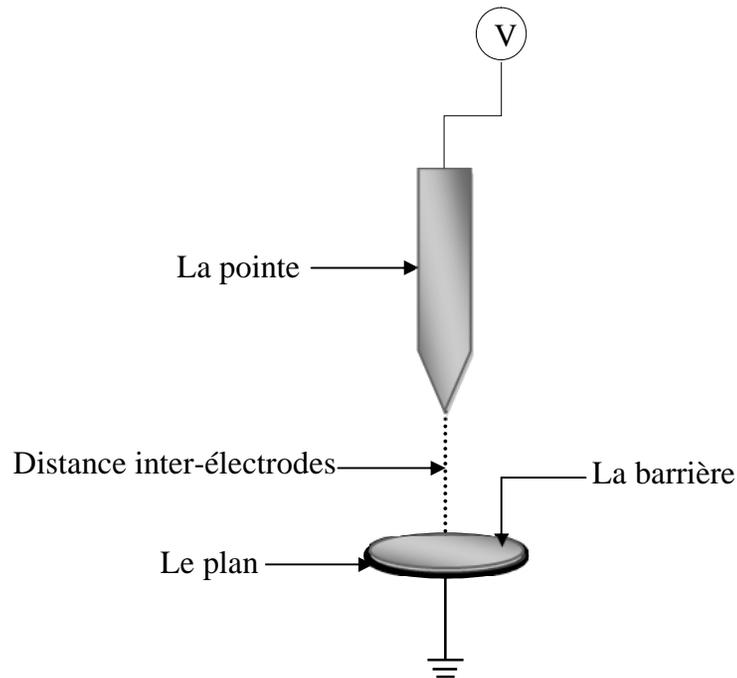


Figure 3.2. Système pointe-plan avec barrière

### 3.5. Différents types de décharge à barrière diélectrique

Dans une décharge, quelle que soit la configuration de l'ensemble électrode/diélectrique, les électrons libres naturellement présents dans le milieu, vont acquérir de l'énergie sous l'effet du champ électrique appliqué, permettant ainsi des réactions d'ionisation, d'excitation etc.... En fonction d'un certain nombre de critères tels que la tension appliquée, la forme et la dimension des électrodes et des diélectriques, la distance inter-électrodes, la nature du gaz et sa pression, les phénomènes physiques entrant alors en jeu seront différents et mèneront à différentes formes de décharge.

### **3.5.1. Décharges à barrière diélectrique volumique**

Les décharges à barrières diélectriques volumiques utilisent généralement des tensions alternatives à valeur moyenne nulle. Elles s'établissent entre deux électrodes séparées l'une de l'autre par un isolant [47].

#### **3.5.1.1. La décharge à barrière diélectrique silencieuse**

C'est la première à être observée, la DBD, également appelée décharge silencieuse peut créer un plasma non thermique très actif dans une large gamme de pression et a été largement utilisée comme source d'UV [44]. Le diélectrique joue le rôle d'un condensateur en série avec le plasma, ce qui a un effet stabilisateur conduisant à un grand nombre de micro décharges et de petites impulsions dans tout l'espace inter-électrodes [47].

#### **3.5.1.2. La décharge lumineuse homogène**

Les décharges luminescentes à pression atmosphérique, ont récemment attiré l'attention des chercheurs parce qu'elles présentent un intérêt particulier dans beaucoup de disciplines scientifiques comme la chimie analytique, la biologie, la médecine et les technologies de reproduction d'images [48]. Ce type de décharge peut être obtenu dans l'air à pression atmosphérique en appliquant des champs électriques de quelques dizaines de kV/cm à des fréquences de l'ordre du kHz et avec des distances inter-électrodes de 0,5 à 3 cm. Dans ce cas la décharge silencieuse est remplacée par un régime lumineux homogène [47].

### **3.5.2. Décharges à barrière diélectrique surfacique**

A la fin des années 90 aux Etats-Unis [47], Roth a mis au point une nouvelle configuration de décharge à barrière diélectrique de surface. L'objectif est d'appliquer sa décharge comme actionneur pour contrôler un écoulement. Cette décharge est établie entre au moins deux électrodes placées de part et d'autre d'un diélectrique. Elle

est dite surfacique car il n'y a plus, comme précédemment, d'espace gazeux entre les électrodes (le diélectrique occupe tout l'espace inter-électrodes).

Les électrodes sont des plaques très fines et sont distantes de quelques millimètres. Une haute tension sinusoïdale à valeur moyenne nulle est appliquée entre les électrodes posées sur la face supérieure du diélectrique et l'électrode de face inférieure reliée à la terre [47].

### **3.6. Influence de la décharge à barrière diélectrique dans l'intervalle d'air**

La barrière isolante permet de limiter les arcs et rend la décharge plus stable [47]. L'influence de la barrière dépend de plusieurs paramètres parmi lesquels nous citons : le type et la position de la barrière par rapport au plan, son épaisseur et ses dimensions ainsi que la tension appliquée aux électrodes [49].

#### **3.6.1. Influence du diélectrique**

La barrière diélectrique est un élément important du dispositif car c'est la charge déposée en surface qui permet l'auto-extinction de la décharge suite à la chute du potentiel dans le gaz. L'écoulement de cette charge en surface (lié à la résistivité de surface du diélectrique) va influencer sur la caractéristique de la décharge. Le diélectrique intervient aussi dans le comportement de la décharge à travers l'émission d'électrons secondaires extraits du matériau. Les photons émis par la décharge permettent l'émission électronique. L'émission électronique secondaire peut aussi se faire suite au choc d'un ion. La nature du diélectrique interviendra aussi de par les réactions chimiques qui s'y dérouleront [4].

#### **3.6.2. Influence de la position de la barrière dans l'intervalle d'air**

Concernant l'influence de la barrière isolante sur les intervalles d'air pointe-plan, il a été obtenu dans des travaux antérieurs, que la position optimale de la barrière se situe entre 0 et 20% à partir de la pointe [50].

La tension de décharge passe par un maximum pour une position de la barrière de 20%. Cette augmentation est due à l'allongement du canal de la décharge. L'amélioration de la rigidité diélectrique des intervalles d'air pointe-plan est due au fait que la barrière forme un obstacle géométrique à la décharge directe [6].

### **3.6.3. Influence de l'épaisseur de la barrière et de la permittivité**

Ces deux paramètres ont une influence sur la distribution des porteurs de charges positifs et sur la tension à la surface de la barrière. Quand ces deux paramètres ont des valeurs importantes, le champ entre la barrière et le plan devient de plus en plus uniforme [6]. Le courant diminue de façon quasi-linéaire avec l'augmentation de l'épaisseur de la barrière isolante pour les deux polarités, mais la diminution est moins importante pour les impulsions négatives [51]. Toutefois, l'influence de ces paramètres est beaucoup moins importante, comparée à l'effet de la largeur et de la position [6].

### **3.6.4. Influence de la largeur de la barrière**

En augmentant la largeur de la barrière isolante, les streamers provenant de la pointe n'atteignent pas facilement l'électrode plane, ce qui permet l'augmentation de la tension appliquée à la pointe. Les charges électriques issues des streamers sont accumulées sur la barrière et le champ électrique entre la barrière et le plan s'accroît graduellement. Le claquage est accompli seulement lorsque le champ électrique entre la barrière et le plan atteint une valeur critique à laquelle de nouveaux streamers sont générés entre la barrière et le plan [42].

### **3.6.5. Influence de la polarité de l'électrode pointe**

Avec la polarité négative, la décharge se déroule par étape pour toutes les positions de la barrière et aucune amélioration de la tension disruptive n'a été obtenue. L'amélioration n'a été mentionnée que pour une polarité positive de la pointe [6].

### **3.6.6. Influence de l'accumulation de la charge d'espace**

L'accumulation des charges d'espace sur un isolant modifie la distribution du champ et les niveaux de tension de décharge. La modification du champ sur la surface peut mener aux décharges glissantes [6].

### **3.6.7. Influence de la pollution**

Les couches semi conductrices sur la barrière correspondent aux cas pratiques de l'emploi de la barrière dans l'air pollué. La pollution s'accumule sur la surface de la barrière et dès que la conductivité superficielle des couches semi conductrices dépasse  $1,6 \mu\text{s}$ , on aura pratiquement les mêmes résultats que la barrière métallique. Avec une barrière semi conductrice, il a été constaté que la tension disruptive des intervalles d'air pointe-plan varie entre les valeurs obtenues avec la barrière isolante à surface propre et celles obtenues avec une barrière métallique de même forme [6].

## **3.7. Applications**

Les décharges à barrière diélectrique sont devenues une méthode d'excitation de plus en plus importante pour leurs avantages pratiques [44]. Le principal avantage des décharges avec barrière est l'établissement d'un plasma hors équilibre à pression atmosphérique. Les applications de cette technique n'ont cessé de se développer : production d'ozone, traitement d'effluents gazeux, traitement de surface des polymères... Le domaine de la production d'ozone est peut être celui qui a suscité le plus de publications ces dernières années, tant d'un point de vue théorique qu'expérimental où de nombreux paramètres ont été étudiés : débit du gaz, nature de l'alimentation et régimes de décharge afin d'optimiser le rendement des ozoneurs industriels [4,46].

### **3.7.1. Production d'ozone**

L'application industrielle la plus ancienne, la production d'ozone est à l'origine des premières études sur les décharges à barrière diélectrique (DBD) dans l'air. Elle

fût longtemps la seule application de ces décharges qui n'étaient alors considérées que comme des décharges ozonisantes.

L'ozone est un puissant germicide et un des plus forts oxydants connu. Il est de plus, moins nocif pour l'environnement que le chlore, car il est modérément stable et se convertit en  $O_2$ , ou éventuellement en  $CO_2$  en présence de matière organique. Comme son utilisation ne produit pas de déchets organiques, il peut dans certaines applications remplacer des traitements chlorés [46].

Le traitement par l'ozone est principalement utilisé dans le traitement de l'eau pour la rendre potable. Ainsi dès 1907, la première installation d'ozone a vu le jour à Nice, suivie en 1910 d'une autre à S<sup>t</sup> Petersburg. Actuellement, de nombreuses villes ayant fait le choix d'un traitement à base de chlore, se réorientent vers un traitement par l'ozone du fait de son moindre coût [46].

Notons que l'ozone est aussi très utilisé dans l'industrie du papier, en association avec de l'oxygène et de l'hydroxyde d'hydrogène. Il permet de traiter la pâte à papier sans intervention de chlore [46].

### **3.7.2. Réduction des émissions nocives des gaz d'échappement**

Cette application n'est encore qu'au stade d'étude, mais semble très prometteuse. Les émissions du moteur diesel contiennent typiquement 13% de  $O_2$ , 5% de  $H_2O$ , et 5% de  $CO_2$ . Aussi, les composés nocifs comme  $NO_x$ , des hydrocarbures non brûlés, ou encore du CO, sont émis avec des concentrations variantes. Pour des problèmes de santé publique et d'environnement, la législation impose une diminution de ces émissions dans les années à venir. Les plasmas semblent fournir une bonne alternative pour les diminuer et les décharges couronne avec barrière peuvent jouer des rôles déterminants de dépollution [46].

### **3.7.3. Traitement de surface**

Sous ce terme générique, se cache un grand nombre d'applications, comme le dépôt de couches minces, la gravure, ou encore la stérilisation. Pour les dépôts de

couches minces, les premières études eurent lieu à la fin des années 1980. Okazaki et Al ont montré qu'une décharge homogène à pression atmosphérique pouvait être utilisée pour polymériser des films organiques de polyéthylène ou de polytetrafluoroéthylène. Ils ont suggéré que la structure chimique des films déposés n'était que très peu influencée par la pression [46].

Dans le domaine de la gravure, les DBD pour plasmas sont aussi de bons candidats. Par exemple, on peut à l'heure actuelle graver des plaques de silicium à des vitesses de 4000  $\mu\text{m}/\text{min}$  [46].

Pour la stérilisation, le traitement par des décharges homogènes à la pression atmosphérique, s'avère très efficace pour stériliser en quelques minutes des surfaces contaminées par des bactéries, en réduisant d'un facteur de  $10^6$  leur nombre. Le traitement par plasma peut aussi s'appliquer à la nourriture ou l'emballage d'instruments médicaux car il permet une stérilisation à basse température [46].

Les applications précédemment citées ont lieu en mode de décharge filamentaire. Depuis quelques années des recherches se sont développées, afin d'obtenir des décharges homogènes (en géométrie plan-plan) dans l'intervalle gazeux (He,  $\text{N}_2$ , air) à pression atmosphérique. L'objectif actuellement visé est de comprendre et de contrôler ces décharges homogènes haute pression qui permettent d'améliorer le traitement de surface des polymères grâce à un traitement plus homogène [4].

### 3.8. Conclusion

L'intérêt majeur de l'insertion d'une barrière isolante entre les électrodes, réside principalement dans la réduction du champ électrique et de la densité de courant entre ces dernières et d'éviter la transition à l'arc électrique.

## Chapitre 4

### Etude expérimentale

#### 4.1. Introduction

Dans cette partie nous exposons les résultats des diverses expériences que nous avons menées au laboratoire de notre département. Nous y rapportons les résultats obtenus dans le cas d'une barrière en papier d'isolation insérée dans un dispositif de décharge couronne entre une pointe et un plan. La polarité négative a été choisie du fait de la forte réactivité qu'elle génère et la distance inter-électrodes a été fixée à 1 cm. Le but visé par nos expériences consiste en des investigations pouvant aider à mieux comprendre voire mieux éviter les problèmes survenant dans un transformateur de puissance.

C'est dans cette optique que nous nous sommes attelés à relever les caractéristiques courant-tension de la décharge couronne dans les conditions spécifiées. Nous avons également étudié l'évolution temporelle des courants de décharge, les conditions de décharge étant maintenues inchangées. La forme des courants est aussi examinée sur la base d'oscillogrammes. La décharge négative pouvant affecter fortement la structure organique du papier, nous avons jugé utile de procéder à des mesures de résistivité tant volumique que superficielle de la barrière avant et après exposition à la décharge. Dans le souci de rester le plus proche de la réalité, nous avons utilisé du papier d'une épaisseur de 0.5 mm, papier le plus utilisé pour réaliser des isolations entre bobines.

#### 4.2. Description de la procédure expérimentale

Le dispositif expérimental mis au point au laboratoire (figure 4.1) est constitué d'un système d'électrodes pointe-plan avec une distance inter-électrodes fixée à 1 cm. Le système est composé d'une pointe ayant une forme conique avec un angle d'ouverture de  $30^\circ$  et d'un plan de diamètre 100 mm. La pointe et le plan sont en cuivre. La décharge couronne négative est obtenue par mise à la terre de la pointe alors que le plan est porté à la source de haute tension.

La caractéristique courant-tension est obtenue en faisant varier la tension de la source et par relevé des valeurs du courant moyen extrait à partir de la tension générée

aux bornes d'une résistance, tension mesurée par un électromètre de très grande impédance d'entrée.

L'évolution temporelle du courant est obtenue en fixant la valeur de la tension au niveau de la source à 10 kV et en relevant les valeurs du courant à intervalles réguliers. L'intervalle choisi est de 15 secondes pour un temps cumulé d'observation de 30 minutes.

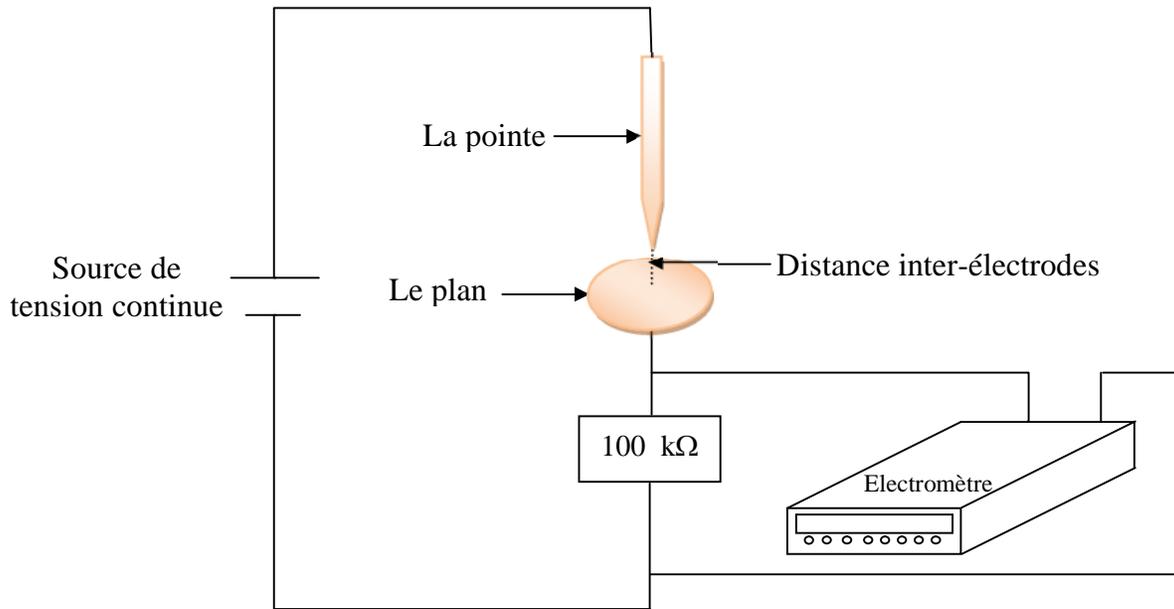


Figure 4.1. Schéma du dispositif expérimental utilisé pour la mesure du courant moyen et de son évolution temporelle.

Nous visualisons la forme de ce courant à l'aide d'un oscilloscope de type TDS 220 de Tektronix, branché aux bornes d'une résistance de 10 kΩ. Cet oscilloscope est raccordé à un ordinateur par le biais d'une interface RS 232 au moyen d'un logiciel fourni par Tektronix figure 4.2.

La mesure de la résistivité est obtenue grâce à un dispositif fourni par Keithley et communiquant avec un ordinateur grâce à un bus GPIB (figure 4.3 et 4.4). Nos différents essais ont été effectués sous les conditions moyennes suivantes :

- Pression : 1020 hPa.
- Température : 25°C.
- Humidité relative : 45%.

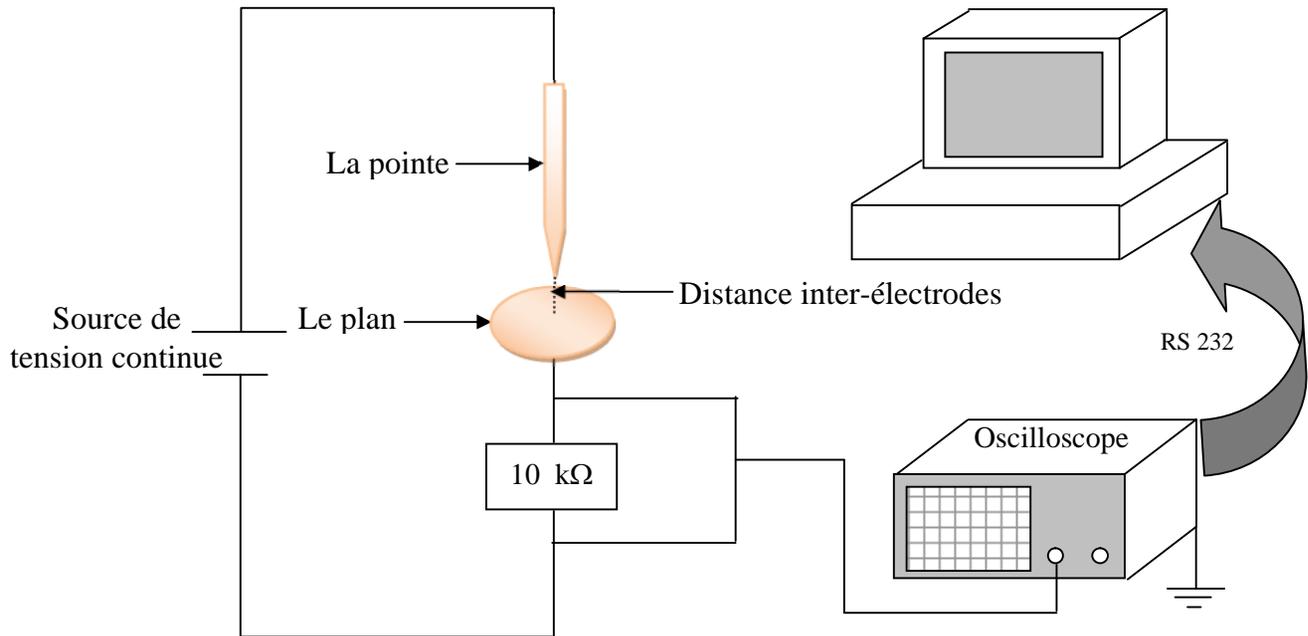


Figure 4.2. Schéma du dispositif expérimental utilisé pour la visualisation de la forme du courant.

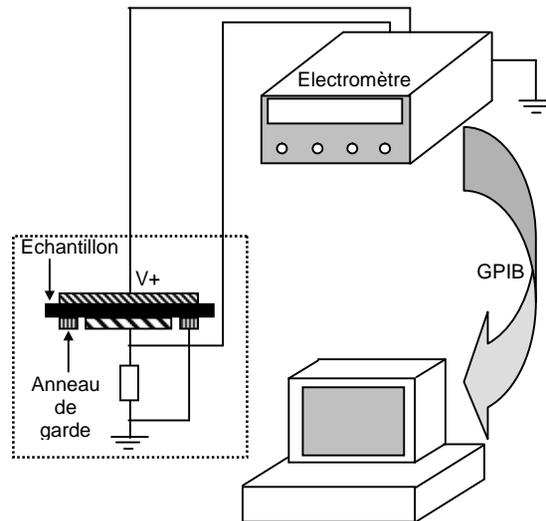


Figure 4.3. Schéma du dispositif expérimental utilisé pour la mesure de la résistivité transversale.

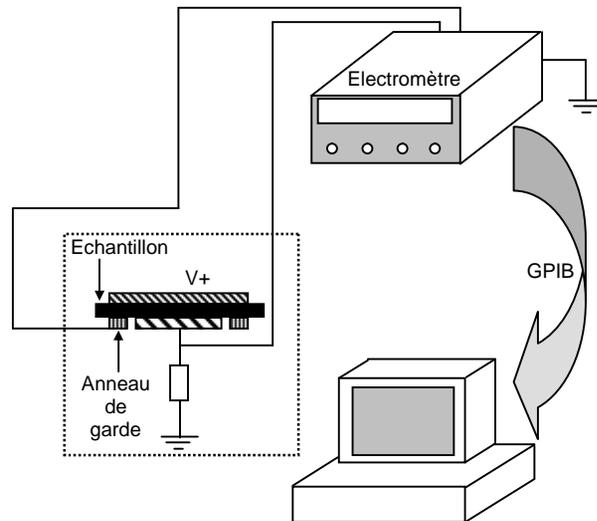


Figure 4.4. Schéma du dispositif expérimental utilisé pour la mesure de la résistivité superficielle.

### 4.3. Résultats expérimentaux

Nous avons débuté notre étude par des essais caractérisant l'intervalle de référence afin de pouvoir appréhender l'effet d'une barrière isolante en papier et en papier imprégné d'huile minérale. La particularité de cet intervalle est d'être dépourvue de barrière.

#### 4.3.1. Caractérisation de l'intervalle de référence

L'intervalle de référence est caractérisé par un système d'électrodes pointe-plan dans l'air avec une distance inter-électrode de 1 cm soumis à une tension négative comme l'indique le schéma de la figure 4.1. Nous avons ainsi l'effet couronne classique qui représente le phénomène de référence.

##### 4.3.1.1. Caractéristique courant-tension

La caractéristique courant-tension dans le cas de l'intervalle de référence sans barrière est représentée sur la figure 4.5.

Cette courbe donne l'allure classique d'une décharge couronne. Elle n'est pas linéaire, ce qui montre un comportement non ohmique.

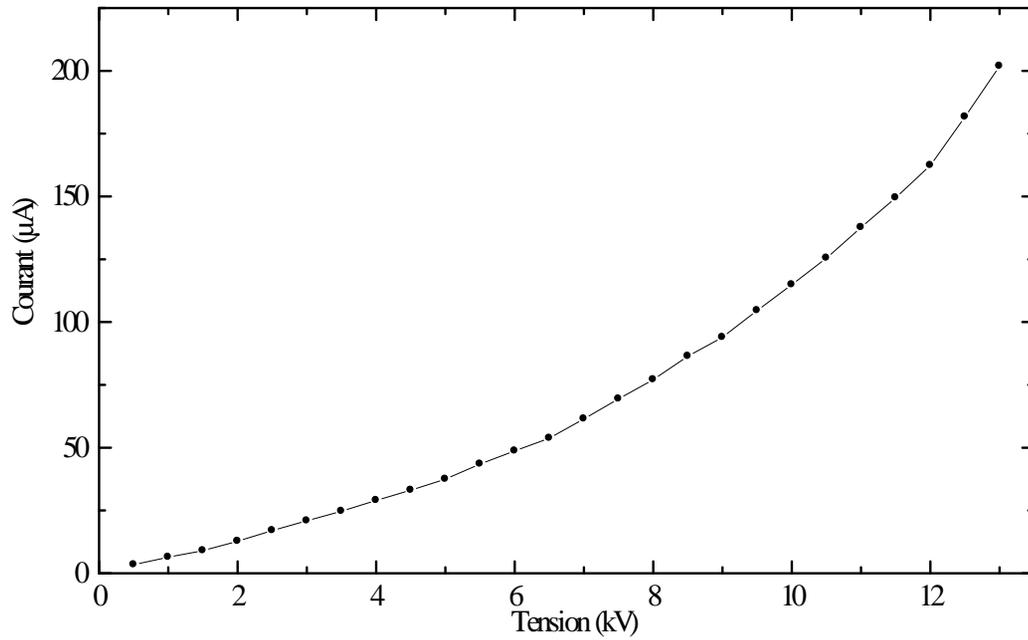


Figure 4.5. Caractéristique courant-tension de l'intervalle de référence.

#### 4.3.1.2. Evolution temporelle du courant

L'évolution temporelle du courant pour l'intervalle de référence considéré est donnée par la figure 4.6.

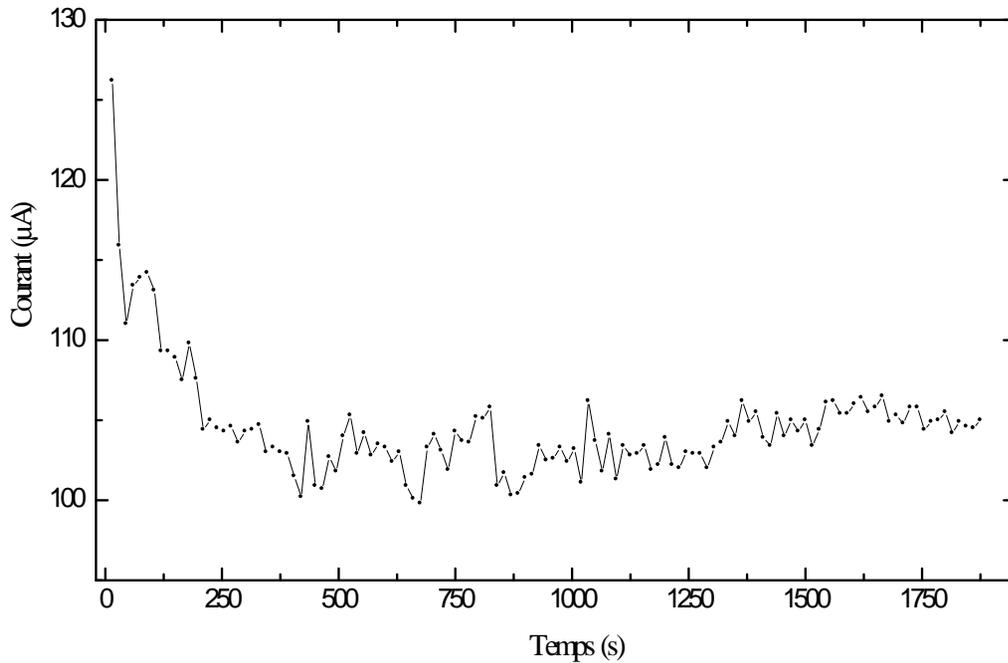


Figure 4.6. Evolution temporelle du courant de l'intervalle de référence.

D'après la courbe, nous remarquons que le courant diminue rapidement au départ pour se stabiliser aux environs de  $105 \mu\text{A}$  à partir de 1500 s.

#### 4.3.1.3. Forme du courant

La forme du courant pour différentes tensions appliquées à l'intervalle de référence est représentée sur les figures 4.7 et 4.8.

Dans ces figures, le courant est constitué d'une succession de pics réguliers. L'amplitude et la fréquence de ces pics augmentent avec le niveau de tension. La valeur moyenne du courant augmente également avec la tension appliquée. A partir de 10 kV, l'amplitude des pics diminue. Lorsque le niveau de tension atteint 12 kV, les pics semblent disparaître pour laisser place à une composante continue élevée.

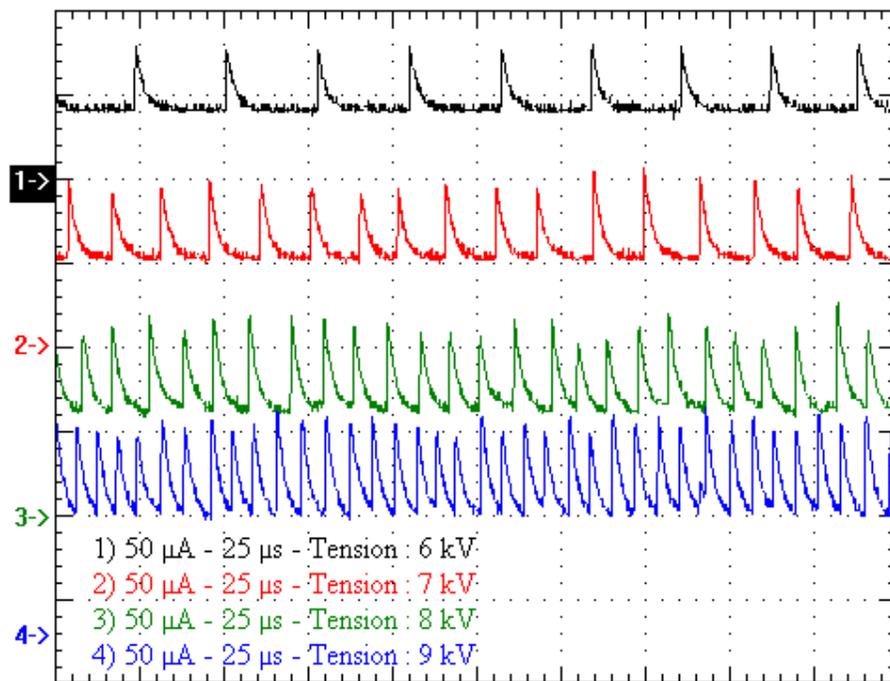


Figure 4.7. Forme du courant de l'intervalle de référence pour des tensions : 6 kV, 7 kV, 8 kV et 9 kV.

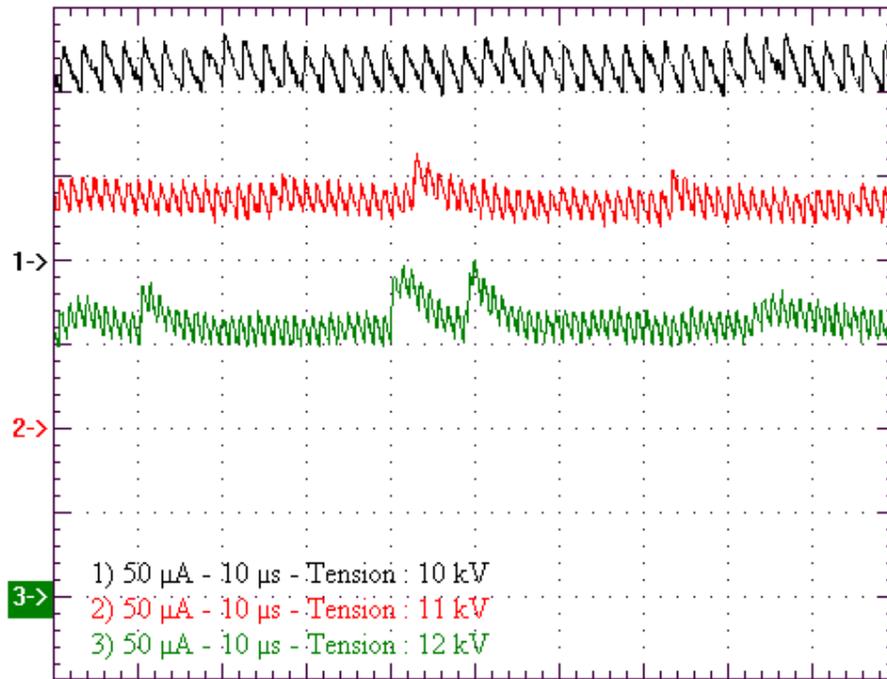


Figure 4.8. Forme du courant de l'intervalle de référence pour des tensions de 10 kV, 11 kV et 12 kV.

#### 4.3.2. Caractérisation de l'intervalle d'air avec barrière en papier et une teneur en eau de 6.5 %.

Le papier utilisé dans nos essais est le papier presspahn d'épaisseur fixe de 0.5 mm destiné à l'isolation des transformateurs de puissance. Il a été mis à notre disposition par l'entreprise Electro-Industries spécialisée dans la construction des transformateurs.

Nous avons utilisé les mêmes dispositifs expérimentaux précédemment décrits (figures 4.1, 4.2), avec introduction d'une barrière en papier posée sur le plan.

### 4.3.2.1. Caractéristique courant-tension

La caractéristique courant-tension pour un intervalle d'air avec barrière de papier est montrée sur la figure suivante :

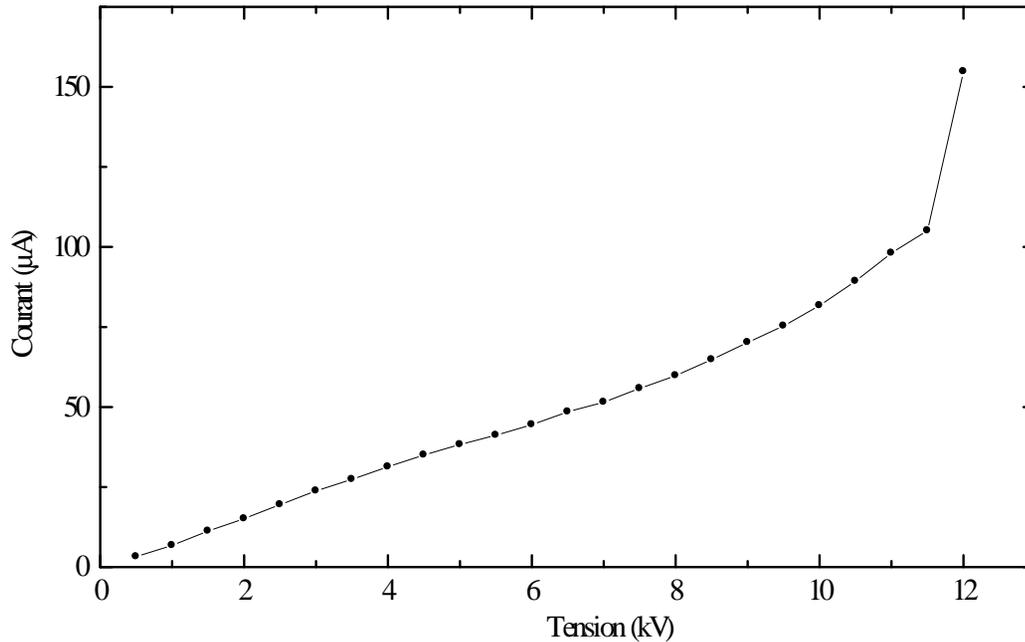


Figure 4.9. Caractéristique courant-tension d'un intervalle d'air avec barrière en papier et une teneur en eau de 6.5%.

L'examen de la figure 4.9 nous montre que la forme de la caractéristique courant-tension avec barrière en papier diffère de celle obtenue pour un intervalle dépourvu de barrière. Le courant augmente de manière quasi-linéaire jusqu'à une tension de 10.5 kV au-delà de laquelle l'augmentation est plus marquée. Les valeurs des courants sont toutefois inférieures à celles obtenues en l'absence de barrière.

### 4.3.2.2. Evolution temporelle du courant

L'évolution temporelle du courant lorsque nous insérons la barrière de papier est représentée sur la figure 4.10.

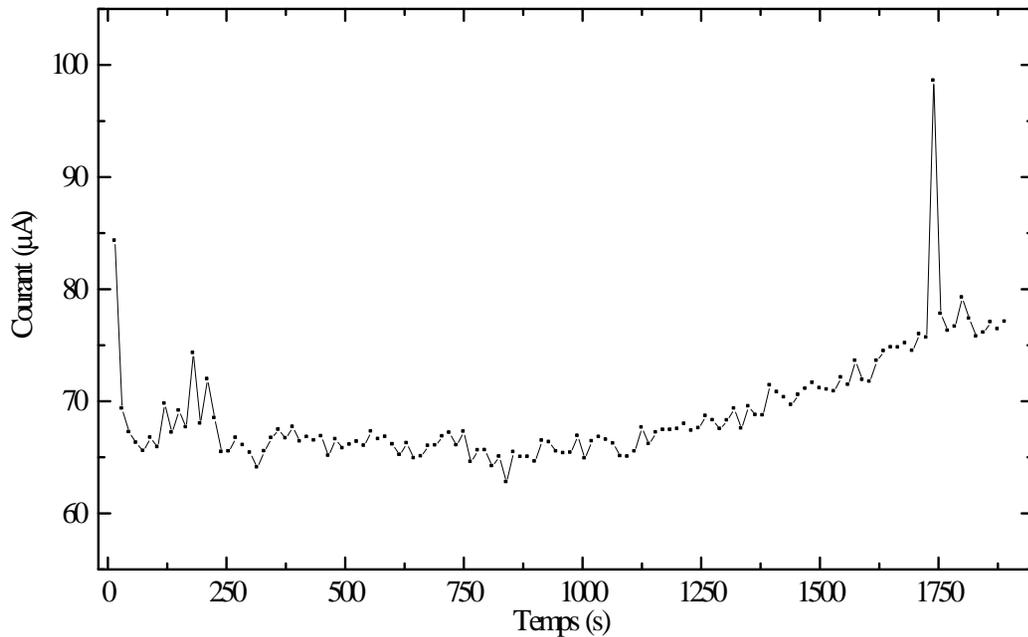


Figure 4.10. Evolution temporelle du courant d'un intervalle d'air avec barrière en papier et une teneur en eau de 6.5%.

Nous remarquons que le courant augmente légèrement d'une quantité de  $20 \mu\text{A}$  entre le début et la fin de l'évolution. Avec un tel processus d'augmentation du courant, un claquage à long terme par échauffement n'est pas à exclure.

#### 4.3.2.3. Forme du courant

Les formes du courant pour différents niveaux de tension sont représentées sur les figures 4.11 et 4.12. Avec une barrière en papier, les pics sont superposés à une composante continue et cela quelle que soit la valeur de la tension appliquée. Ces pics pourraient correspondre à des micros claquages qui pourraient endommager l'isolation dans un transformateur.

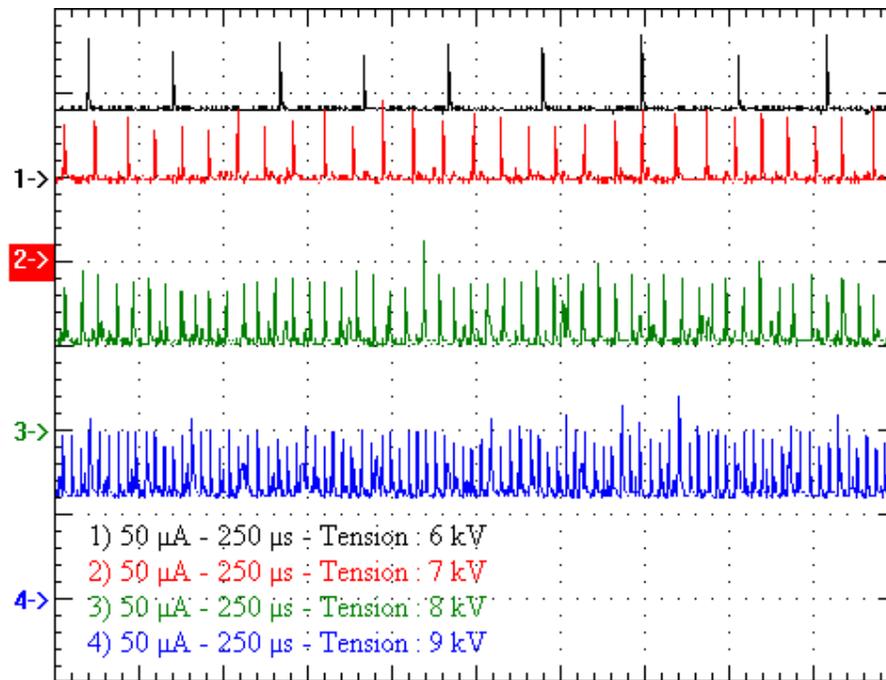


Figure 4.11. Forme du courant d'un intervalle d'air avec barrière en papier et une teneur en eau de 6.5%.

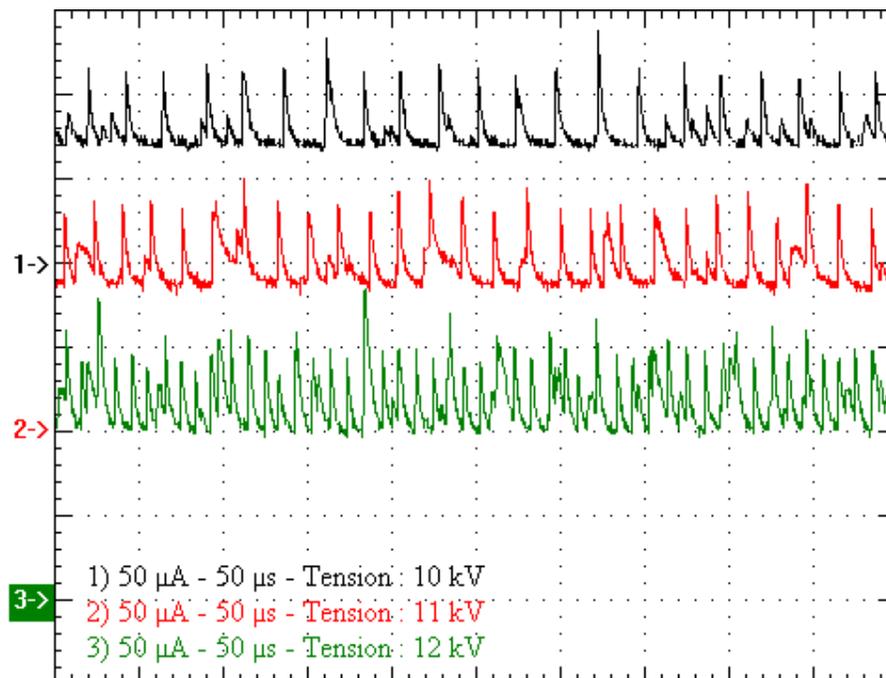


Figure 4.12. Forme du courant d'un intervalle d'air avec barrière en papier et une teneur en eau de 6.5%.

### 4.3.3. Caractérisation de l'intervalle d'air avec barrière en papier et une teneur en eau de 1%.

L'échantillon de papier est placé dans un four jusqu'à ce que sa teneur en eau soit amenée à 1%.

#### 4.3.3.1. Caractéristique courant-tension

La caractéristique courant-tension obtenue avec barrière est représentée sur la figure 4.13.

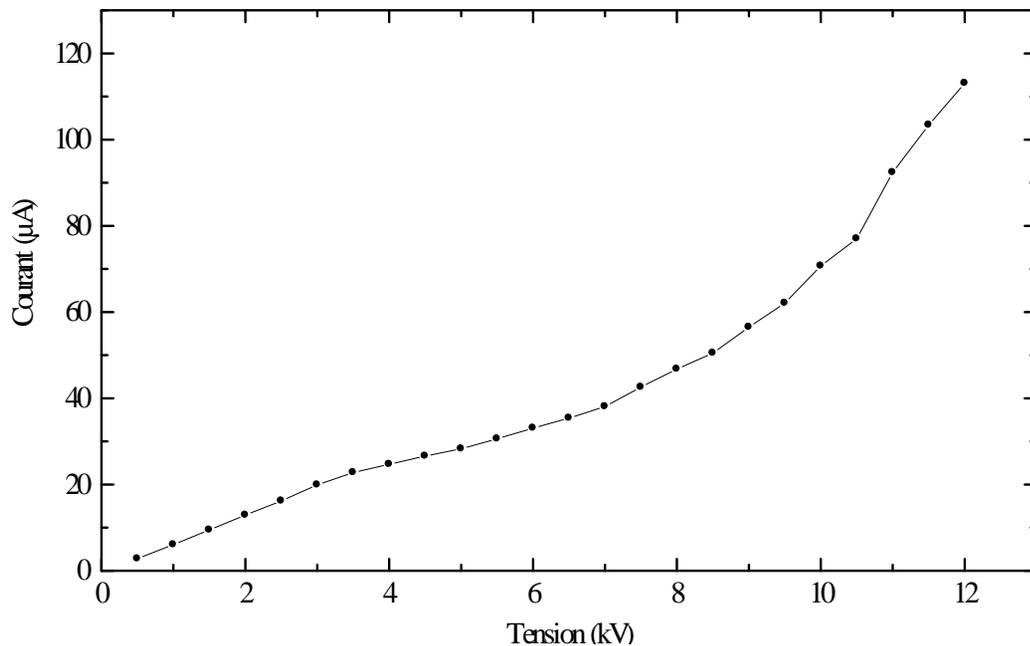


Figure 4.13. Caractéristique courant-tension d'un intervalle d'air avec barrière en papier et une teneur en eau de 1%.

Nous constatons dans ce cas que la caractéristique courant-tension présente une allure assez proche des caractéristiques courant-tension d'un intervalle sans barrière. Elle rappelle aussi celle correspondant à une barrière à 6.5% d'eau sauf que dans le cas présent les courants sont plus faibles.

### 4.3.3.2. Evolution temporelle du courant

L'évolution temporelle du courant d'un intervalle d'air avec barrière en papier avec une faible teneur en eau de 1% est représentée sur la figure 4.14. Le courant présente de grandes fluctuations. Cette présence de fluctuations importantes pourrait trouver son origine dans une accumulation de charges sur la surface du diélectrique conduisant de temps à autre à des micros claquages.

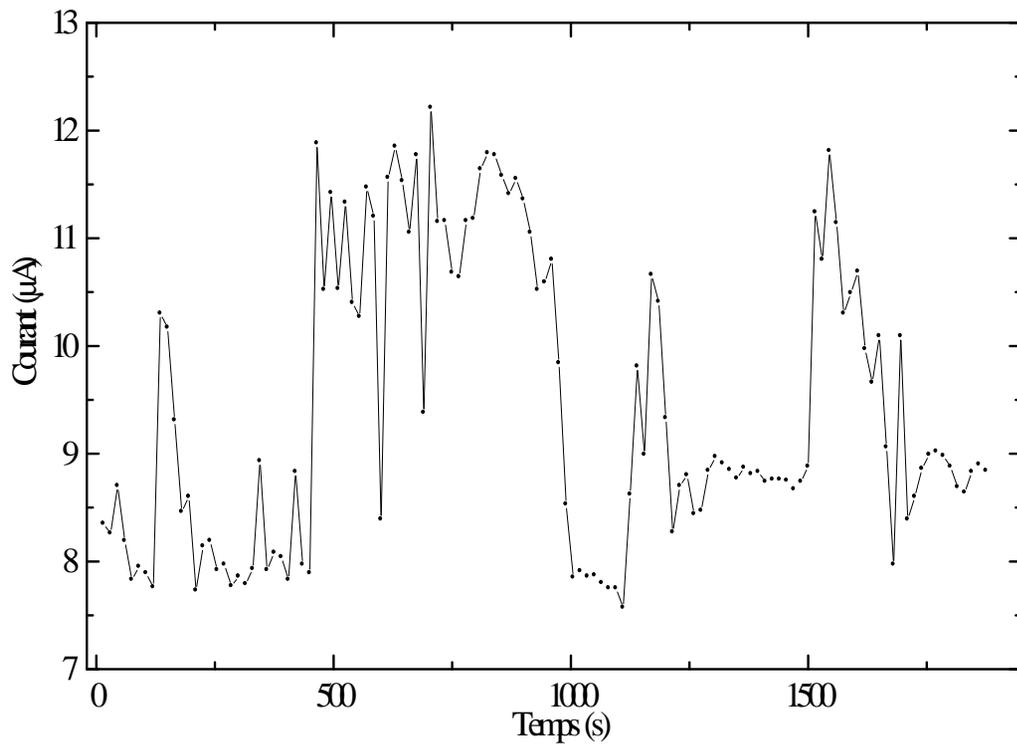


Figure 4.14. Evolution temporelle du courant d'un intervalle d'air avec barrière en papier et une teneur en eau de 1%.

### 4.3.3.3. Forme du courant

La forme du courant pour l'intervalle d'air avec barrière en papier et une teneur en eau de 1% est représentée sur les figures 4.15 et 4.16. Pour les tensions de 6, 7, 8 et 9 kV, le nombre de pics a largement diminué comparé à celui obtenu avec une barrière à forte teneur en eau. Les pics sont devenus irréguliers en fréquence et en amplitude.

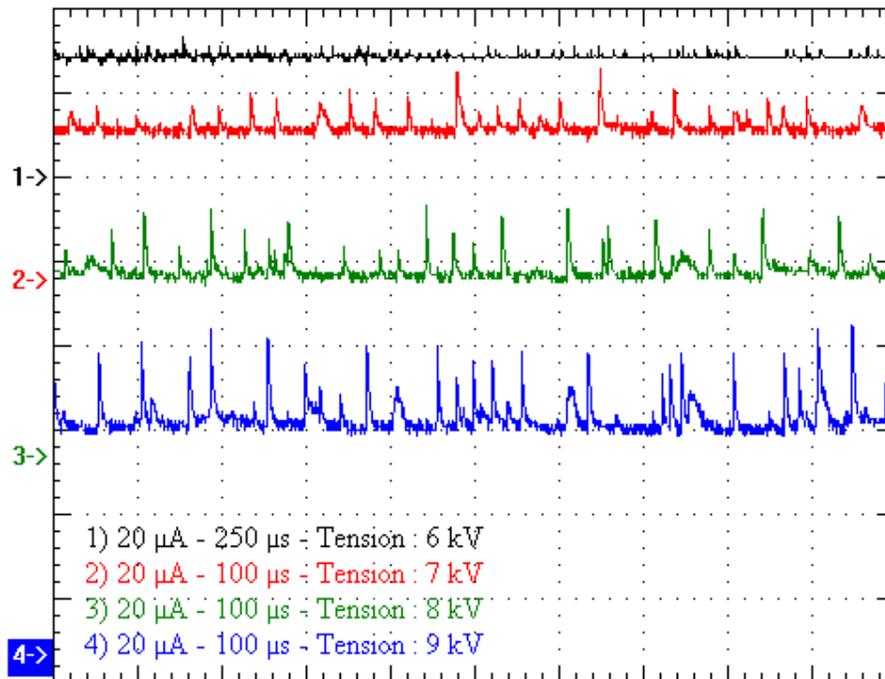


Figure 4.15. Forme du courant d'un intervalle d'air avec barrière en papier et une teneur en eau de 1%.

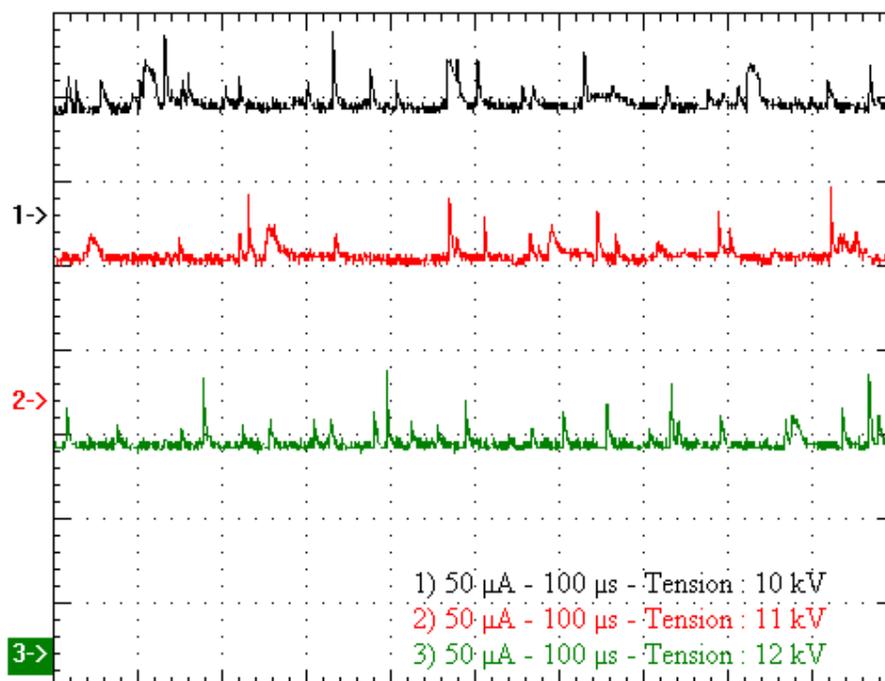


Figure 4.16. Forme du courant d'un intervalle d'air avec barrière en papier et une teneur en eau de 1%.

#### 4.3.4. Caractérisation de l'intervalle d'air avec barrière en papier imprégné et une teneur en eau de 6.5%.

Dans les essais suivants, nous avons introduit une barrière en papier d'épaisseur fixe de 0,5 mm, avec une teneur initiale en eau de 6.5% et imprégné d'huile minérale destinée à l'isolation des transformateurs de puissance. Le système d'électrodes utilisé demeure inchangé.

##### 4.3.4.1. Caractéristique courant-tension

La caractéristique courant-tension d'un intervalle d'air en série avec une barrière en papier imprégné est représentée sur la figure 4.17.

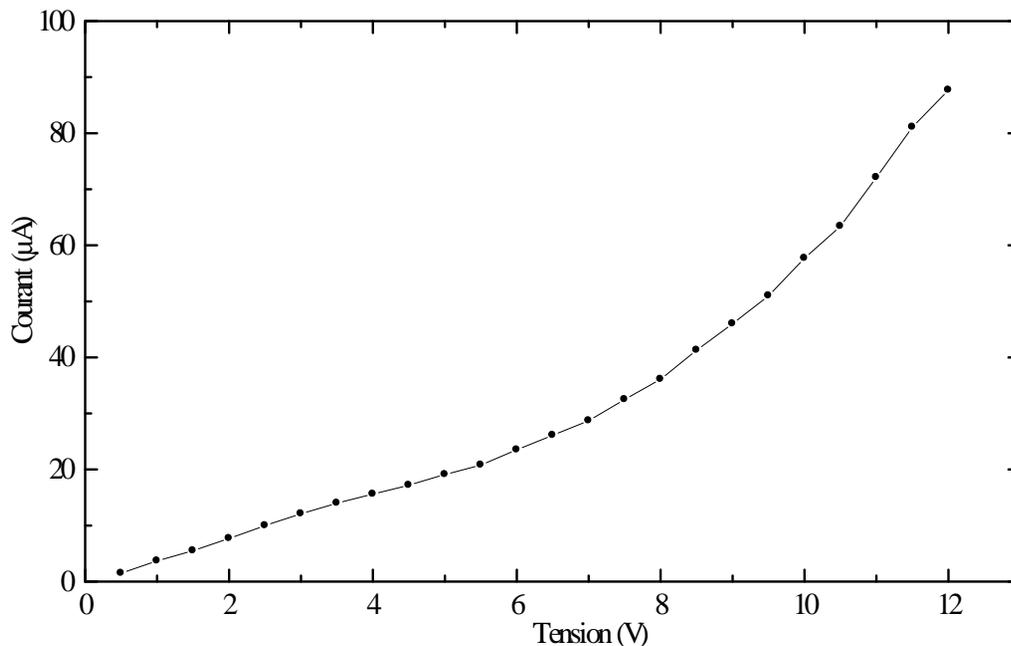


Figure 4.17. Caractéristique courant-tension d'un intervalle d'air avec barrière en papier imprégné et une teneur en eau de 6.5%.

La caractéristique courant-tension présente une allure s'apparentant à une conique. Les changements de pente sont moins accentués que ceux obtenus pour du papier non imprégné cf. figure 4.9.

#### 4.3.4.2. Evolution temporelle du courant

L'évolution temporelle du courant pour un intervalle d'air avec barrière en papier imprégné pour une teneur en eau de 6.5% est représentée sur la figure 4.18.

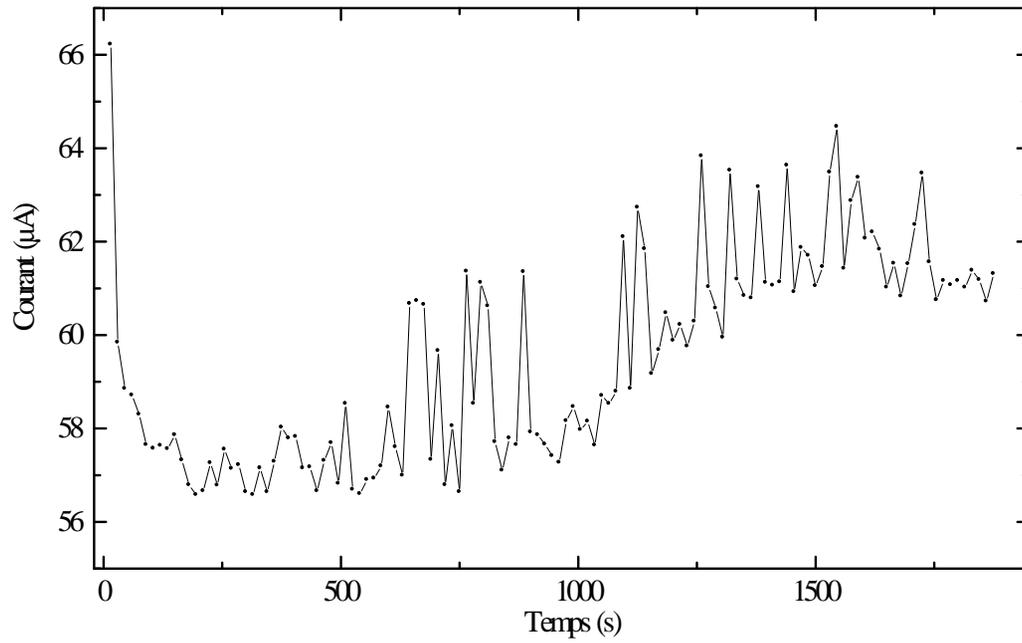


Figure 4.18. Evolution temporelle du courant d'un intervalle d'air avec barrière en papier imprégné et une teneur en eau de 6.5%.

Contrairement au cas de la décharge sans barrière, le courant augmente de façon plus marquée. Cela pourrait être dû à l'interaction physico-chimique entre l'huile, le papier et les espèces gazeuses activées ( $N_2$ ,  $O_2$ ).

#### 4.3.4.3. Forme du courant

Les formes du courant pour différents niveaux de tension pour un intervalle d'air avec barrière en papier imprégné à une teneur en eau de 6.5% sont représentées sur les figures 4.19 et 4.20.

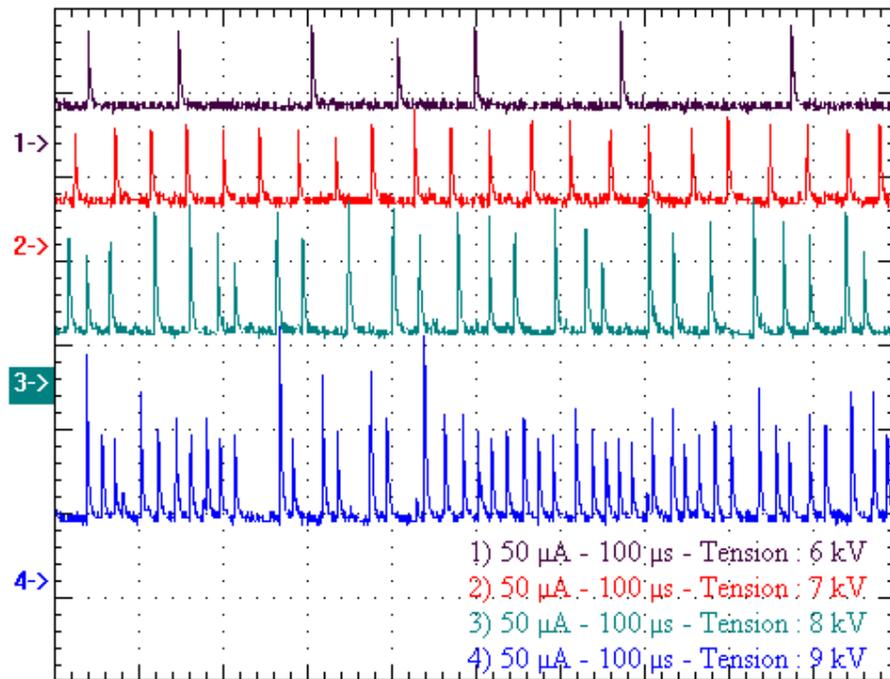


Figure 4.19. Forme du courant d'un intervalle d'air avec barrière en papier imprégné et une teneur en eau de 6.5%.

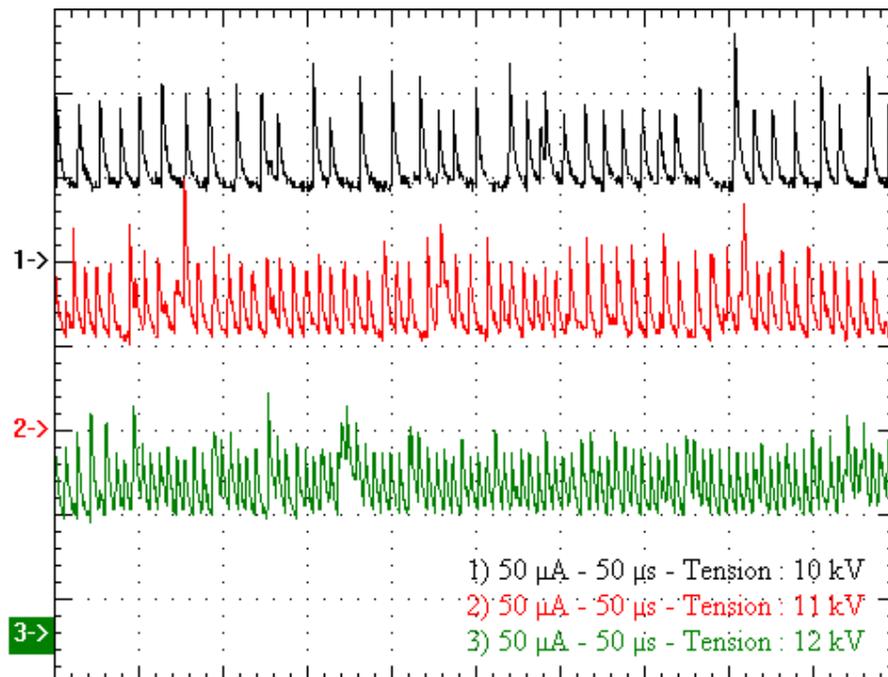


Figure 4.20. Forme du courant d'un intervalle d'air avec barrière en papier imprégné et une teneur en eau de 6.5%.

La comparaison des oscillogrammes obtenus avec les barrières imprégnées et les barrières non imprégnées pour une forte teneur en eau (6.5%) montre une différence de comportement. Ainsi pour des tensions inférieures à 9kV (cf. figures 4.19 et 4.11) la fréquence des pics est réduite par l'imprégnation du papier. Par contre le phénomène inverse est observé lorsque la tension de la décharge est supérieure à 9 kV (cf. figures 4.20 et 4.12).

#### 4.3.5. Caractérisation de l'intervalle d'air avec barrière en papier imprégné et une teneur en eau de 1%.

L'échantillon de papier a été chauffé à une teneur en eau de 1% puis imprégné dans l'huile minérale.

##### 4.3.5.1. Caractéristique courant-tension

La caractéristique courant-tension pour un intervalle d'air avec barrière en papier imprégné pour une teneur en eau de 1% est représentée sur la figure 4.21.

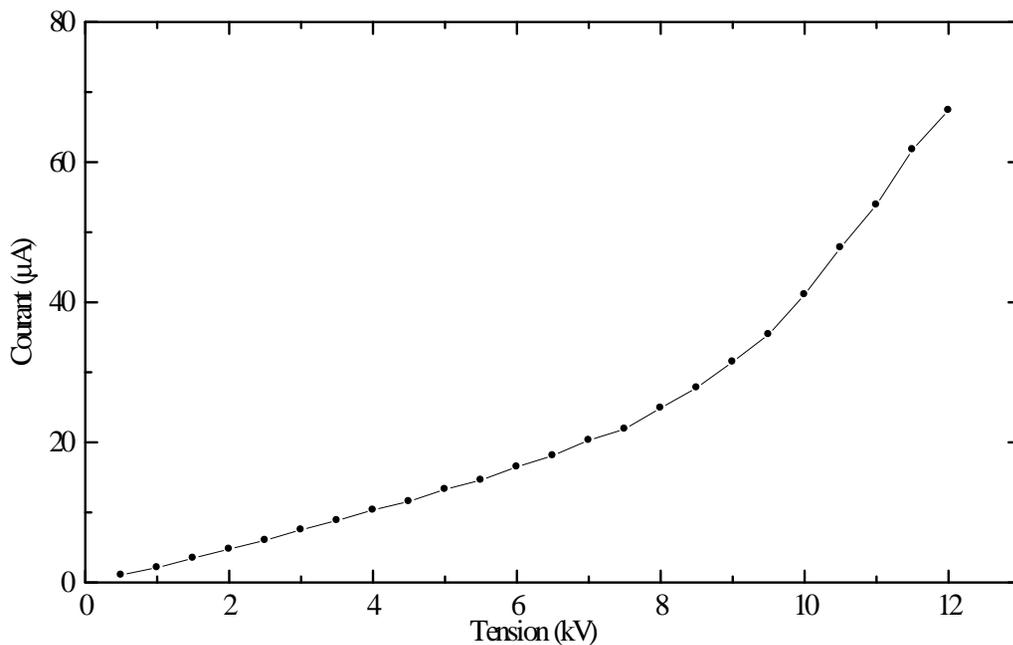


Figure 4.21. Caractéristique courant-tension d'un intervalle d'air avec barrière en papier imprégné et une teneur en eau de 1%.

A l'examen de la figure 4.21, il ressort une parfaite similitude d'allure avec une barrière imprégnée à forte teneur en eau (figure 4.17). Toutefois une observation plus fine montre que les courants moyens sont plus petits pour la teneur de 1%.

#### 4.3.5.2. Evolution temporelle du courant

L'évolution temporelle du courant pour l'intervalle d'air avec barrière en papier imprégné avec une teneur en eau de 1% est représentée sur la figure 4.22. Cette figure nous enseigne que malgré les fluctuations, la tendance générale est une stabilisation du courant dans la limite des (40 à 47  $\mu\text{A}$ ).

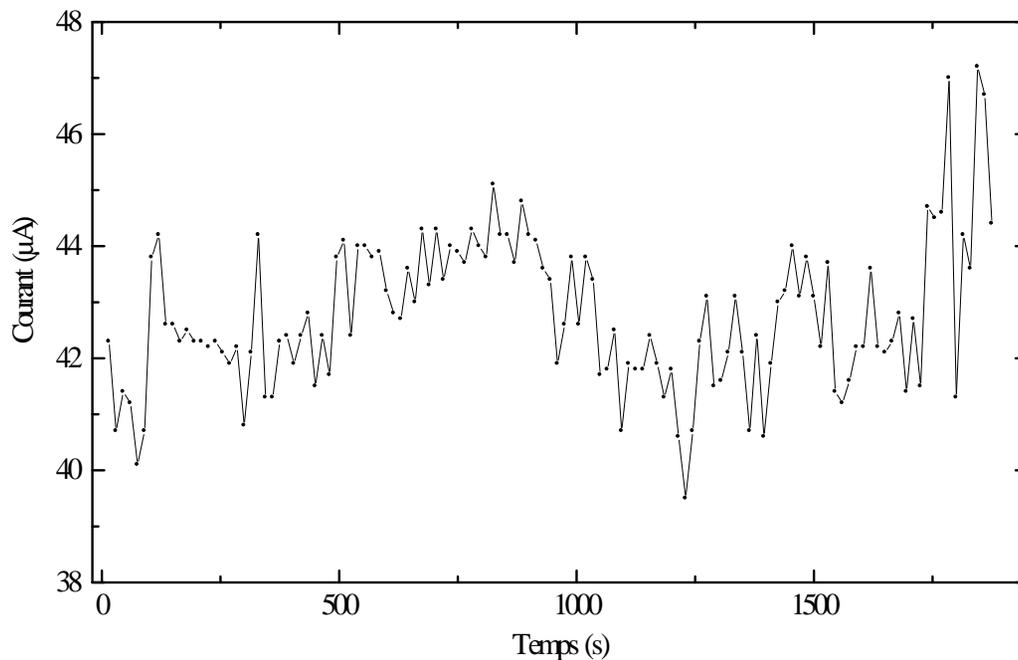


Figure 4.22. Evolution temporelle du courant d'un intervalle d'air avec barrière en papier imprégné et une teneur en eau de 1%.

#### 4.3.5.3. Forme du courant

La forme du courant pour un intervalle d'air avec une barrière en papier de 1% d'eau est représentée sur les figures 4.23 et 4.24.

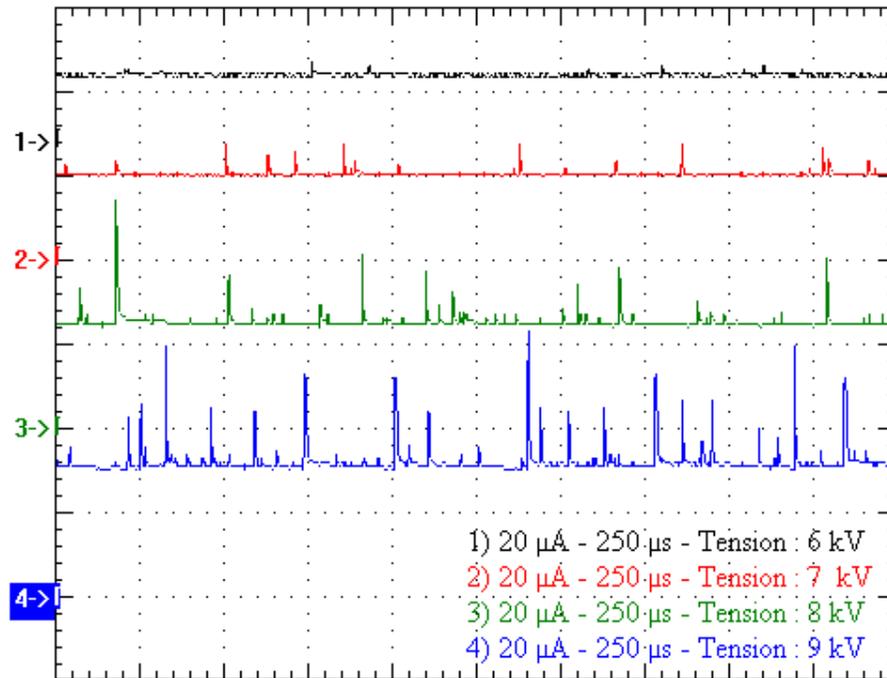


Figure 4.23. Forme du courant d'un intervalle d'air avec barrière en papier imprégné et une teneur en eau de 1%.

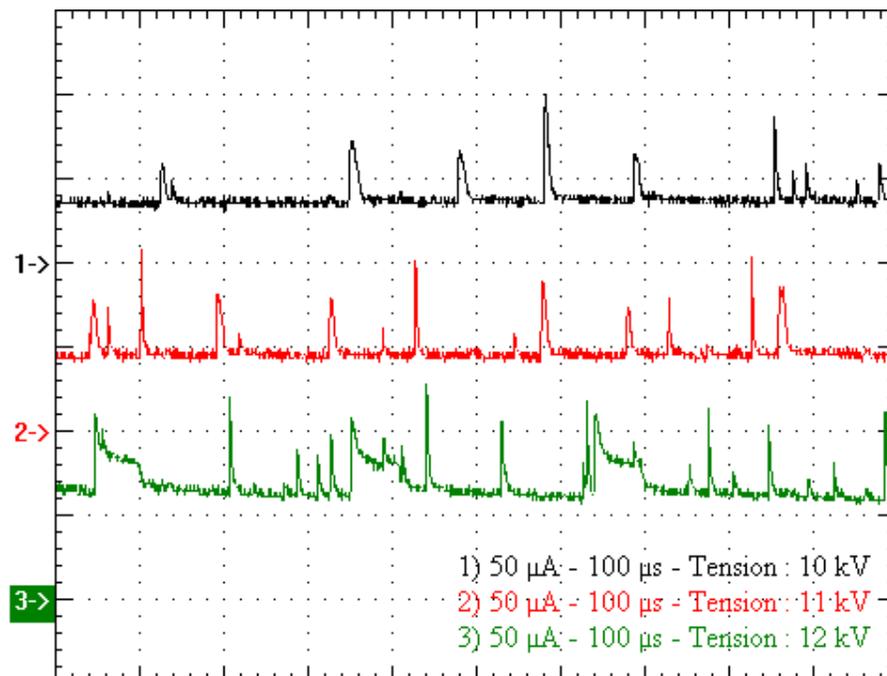


Figure 4.24. Forme du courant d'un intervalle d'air avec barrière en papier imprégné et une teneur en eau de 1%.

Les figures donnant la forme du courant pour une teneur en eau de 1% du papier imprégné montrent que la fréquence ainsi que l'amplitude des pics a sensiblement baissé par rapport au cas de la barrière imprégnée à 6.5% d'eau. Cette diminution est encore plus frappante lorsque nous comparons les résultats portés par ces figures à ceux des figures 4.15 et 4.16 relatifs à un papier non imprégné ayant une humidité de 1 %.

#### **4.3.6. Effet de la décharge couronne prolongée**

L'exposition prolongée d'un diélectrique organique à une décharge couronne peut entraîner les modifications de ses caractéristiques. C'est ce volet de l'action de la décharge que nous nous proposons d'aborder ici.

Nos investigations ont été orientées vers les modifications pouvant affecter les échantillons au niveau de leurs résistivités transversale et superficielle. Le temps d'exposition des échantillons est pris égal à 2 heures.

La mesure des résistivités transversale et superficielle est effectuée à l'aide des dispositifs des figures 4.3 et 4.4. Cette mesure est effectuée avec une tension continue de 500 V et la valeur de la résistivité est prise au bout de 60 secondes.

##### **4.3.6.1. Papier non imprégné**

###### **4.3.6.1.1. Résistivités superficielles**

Les résultats de mesure des résistivités superficielles pour l'échantillon de papier sont consignés dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1. Résistivités superficielles du papier avant et après l'effet couronne pour les teneurs en eau de 6.5% et 1%.

Teneur en eau	Résistivité superficielle avant la décharge ( $\Omega/\text{sq}$ )	Résistivité superficielle après la décharge ( $\Omega/\text{sq}$ )	
		Face traitée	Face non traitée
6.5 %	$8.7529 \cdot 10^{12}$	$7.099 \cdot 10^{12}$	$7.3815 \cdot 10^{12}$
1%	$5.6830 \cdot 10^{15}$	$6.1638 \cdot 10^{13}$	$1.9060 \cdot 10^{14}$

Ces mesures indiquent bien que la résistivité superficielle augmente lorsque la teneur en eau diminue, résultats tout à fait logique. Par contre nous notons que lorsque la teneur en eau est importante (6.5%) les résistivités superficielles des faces traitées (opposées à la pointe) et non traitées diffèrent peu, alors que pour une faible teneur en eau une différence est perceptible. Dans ce cas la face traitée devient plus conductrice.

#### 4.3.6.1.2. Résistivités transversales

Les résultats de mesure des résistivités transversales pour l'échantillon de papier sont consignés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2. Résistivités transversales du papier avant et après l'effet couronne pour les teneurs en eau de 6.5% et 1%.

Teneur en eau	Résistivité transversale avant la décharge ( $\Omega.\text{cm}$ )	Résistivité transversale après la décharge ( $\Omega.\text{cm}$ )	
		Face traitée	Face non traitée
6.5 %	$8.8385 \cdot 10^{10}$	$7.5299 \cdot 10^{10}$	$8.1631 \cdot 10^{10}$
1%	$6.3064 \cdot 10^{14}$	$9.5860 \cdot 10^{12}$	$1.0326 \cdot 10^{13}$

Pour la résistivité transversale, les variations induites par la décharge sont perceptibles pour la teneur en eau la plus faible (1%).

#### 4.3.6.2. Papier imprégné

##### 4.3.6.2.1. Résistivités superficielles

Dans le tableau 4.3, nous trouvons les valeurs des différentes résistivités superficielles relevées pour le papier imprégné.

Tableau 4.3. Résistivités superficielles pour le papier imprégné avant et après l'effet couronne pour les teneurs en eau de 6.5% et 1%.

Teneur en eau	Résistivité superficielle avant la décharge ( $\Omega/\text{sq}$ )	Résistivité superficielle après la décharge ( $\Omega/\text{sq}$ )	
		Face traitée	Face non traitée
6.5 %	$3.3205 \cdot 10^{12}$	$5.4742 \cdot 10^{13}$	$3.4969 \cdot 10^{12}$
1%	$1.6668 \cdot 10^{15}$	$1.2329 \cdot 10^{15}$	$3.1477 \cdot 10^{14}$

##### 4.3.6.2.2. Résistivités transversales

Dans le tableau 4.4, nous trouvons les valeurs des différentes résistivités transversales relevées pour le papier imprégné.

Tableau 4.4. Résistivités transversales pour le papier imprégné avant et après l'effet couronne pour les teneurs en eau de 6.5% et 1%

Teneur en eau	Résistivité transversale avant la décharge ( $\Omega.cm$ )	Résistivité transversale après la décharge ( $\Omega.cm$ )	
		Face traitée	Face non traitée
6.5 %	$3.7586 \cdot 10^{11}$	$1.1133 \cdot 10^{12}$	$9.5639 \cdot 10^{11}$
1%	$4.1387 \cdot 10^{14}$	$2.5684 \cdot 10^{14}$	$2.4389 \cdot 10^{14}$

Pour le papier imprégné, nous remarquons que l'effet de la décharge a un impact réduit sur les résistivités. Cela semble indiquer que l'imprégnation protège le papier contre les effets de la décharge.

#### 4.4.7. Etat de surface du plan suite à une décharge couronne

L'état du plan est représenté sur la photo 1 pour le plan propre avant la décharge, la photo 2 pour le plan après une décharge couronne sur du papier non imprégné. La photo 3 quant à elle présente le plan dans le cas d'une décharge couronne sur du papier imprégné.



Photo 1. Plan propre



Photo 2. Plan suite à une décharge couronne avec barrière en papier non imprégné.

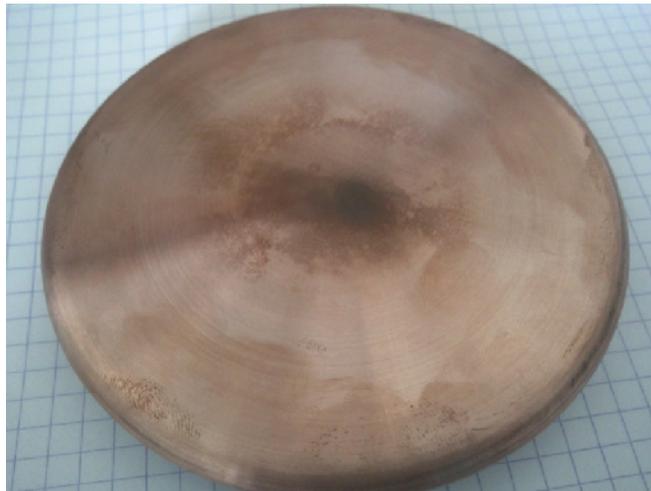


Photo 3. Plan suite à une décharge couronne avec barrière en papier imprégné.

Nous remarquons d'après les différentes photos que la surface du plan est affectée suite à une décharge couronne appliquée durant 2 heures. Ce changement d'aspect montre l'effet de la décharge. Toutefois, à ce niveau nous ne pouvons que constater ces changements. Une étude plus poussée pourrait relever d'autres phénomènes.

#### 4.4.8. Etat de surface des échantillons de papier imprégné suite à une décharge couronne

Les photos 4, 5 et 6 représentent l'état de l'échantillon de papier imprégné pour les deux teneurs en eau avant et après la décharge couronne.



Photo 4. Echantillon du papier imprégné avant la décharge couronne.



Photo 5. Echantillon du papier imprégné avec une teneur en eau de 6.5% après la décharge couronne.

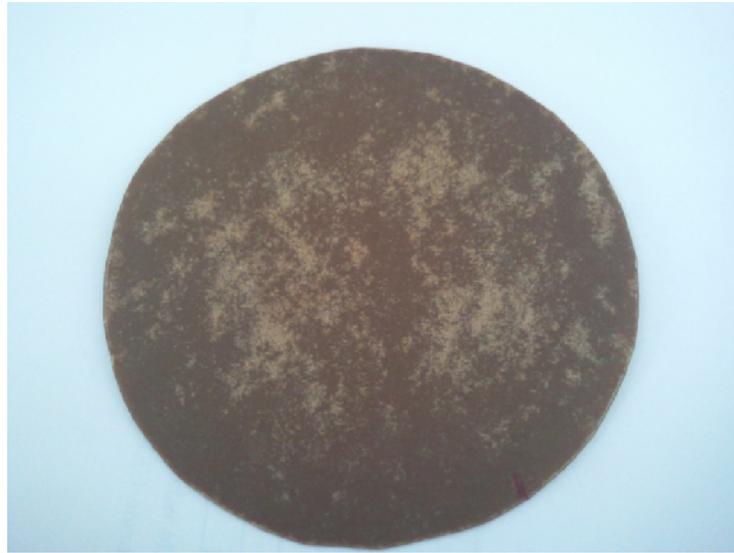


Photo 6. Echantillon du papier imprégné avec une teneur en eau de 1% après la décharge couronne

Les différentes photographies des échantillons de papier montrent également les modifications générées par la décharge. Comme pour l'aspect visuel du plan, nous ne pouvons que constater et remarquer ces changements.

## Conclusion générale

La décharge couronne de par son caractère oxydant peut avoir des conséquences néfastes sur l'isolation organique.

Contrairement à la décharge couronne sans barrière dont le courant diminue tendant vers une valeur de stabilisation, lorsque nous insérons une barrière à forte teneur en eau et sans imprégnation nous assistons à une augmentation du courant. Sur un autre plan, nous remarquons que le courant augmente d'une quantité de 20  $\mu\text{A}$  entre le début et la fin de l'observation. Les pics intempestifs présentés par le courant avoisinent les 95  $\mu\text{A}$ . Avec un tel processus d'augmentation du courant, un claquage à long terme par échauffement n'est pas à exclure.

Les résultats de nos expériences rapportés sur plusieurs figures montrent des courants présentant d'importantes fluctuations. La présence de ces fluctuations pourrait trouver son origine dans une accumulation de charges sur la surface du diélectrique conduisant de temps à autre à claquages localisés.

Dans le cas d'une barrière en papier imprégné avec une teneur en eau de 6.5%, la caractéristique courant-tension présente une allure s'apparentant à une conique. Les changements de pente sont moins accentués que ceux obtenus pour du papier non imprégné. Contrairement au cas de la décharge sans barrière, le courant augmente de façon plus marquée. Cela pourrait être dû à une interaction physico chimique entre l'huile, le papier et les espèces gazeuses activées ( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ).

La comparaison des oscillogrammes obtenus avec les barrières imprégnées et les barrières non imprégnées pour une forte teneur en eau (6.5%) montre une différence de comportement. Ainsi pour des tensions inférieures à 9kV, la fréquence des pics est réduite par l'imprégnation du papier. Par contre c'est le phénomène inverse qui survient lorsque la tension de décharge est supérieure à 9 kV

Même lorsque la teneur en eau est faible (1%), lorsque le papier est soumis à une décharge couronne, il voit sa résistivité superficielle sur la face recevant la décharge diminuer de deux ordres de grandeur. Cette face, avec une conductivité accrue peut permettre le passage de courants superficiels importants. Pour la résistivité transversale, les variations induites par la décharge ne sont perceptibles que pour la teneur en eau la plus faible (1 %).

En ce qui concerne le papier imprégné, c'est aussi la teneur en eau de 1% qui engendre une diminution de la résistivité superficielle du côté non traité cette fois-ci.

Le papier ayant subi une décharge couronne pendant deux heures montre un assèchement du papier. En effet, l'huile a tendance à être répartie de manière non uniforme dans le papier. Cet aspect visuel est valable pour les deux teneurs en eau. Ceci justifie notre étude du comportement du papier non imprégné. Suite à une décharge de type couronne, le papier pourrait prendre un comportement intermédiaire entre celui du papier imprégné et du papier non imprégné.

L'état de surface des plans suite à la décharge sur le papier les recouvrant montre un changement d'aspect de leur surface. Ce changement dû à une oxydation peut être générateur d'espèces conductrices dans l'huile dans la pratique. Cette attaque pourrait se retrouver sur les conducteurs dans un transformateur avec comme conséquence d'éventuels courts-circuits.

Les perspectives ouvertes par ce travail consistent en un examen détaillé de la surface des plans ainsi que celle des échantillons avec un microscope électronique à balayage. D'autres analyses de surface pourraient également amener des informations importantes.

## Références bibliographiques

- [1] A. Bourgeois, "Etude du phénomène d'électrisation par écoulement sur les cartons des transformateurs de puissance", Thèse de Doctorat, INP Grenoble, 9 Février 2007.
- [2] F. Bitam-Megherbi and M. Megherbi, "Effect of oil or pressboard paper barriers on negative corona discharge", Iranian Journal of Computer Engineering, Issue 2, Summer-Fall, 2007.
- [3] F. Bitam-Megherbi, "Etude d'une isolation combinée huile/papier isolant : Approche non destructive", Thèse de Doctorat d'Etat en Electrotechnique. Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Décembre 2007.
- [4] E. Odic, "Etude d'une décharge moyenne fréquence avec barrière diélectrique ainsi que la réactivité chimique du plasma généré", Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, Spécialité : chimie appliquée et Génie Electrique, 1998.
- [5] Y. Zebboudj, R. Ikene, "Positive corona inception in HVDC configurations under variable air density and humidity conditions", The European Physical Journal, Applied Physics, pp. 211-218, October, 2000.
- [6] L. Mokhnache, "Contribution a l'étude de l'influence des barrières dans les intervalles d'air pointe plan par le calcul numérique du champ a l'aide de la méthode des éléments finis avec et sans charge d'espace", Thèse de Magister, Université de Batna, Juillet 1997.
- [7] M. C. Lessard, L. V. Nifterik, M. Massé, J. P. Penneau, R. Grob, "Physicochemical characterization of the thermal aging of insulating paper in power transformers", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 533-537, Montreal, Canada, June, 16-19, 1996.
- [8] 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.

- [9] B. Bouvier, "papier et papier imprégné", Techniques d'ingénieur, traité génie électrique, D280, pp. 1-22, 1983.
- [10] P. Verma, M. Roy, A. Verma, V. Bhanot, O. P. Pandey, "Assessment of degradation of transformer insulation paper by SEM and X-RD techniques", IEEE International Conference on Solid Dielectrics, July 5-9, 2004.
- [11] R. Fournié, "Les isolants en électrotechnique, Essais, Mécanismes de dégradation, Application industrielles", Editions Eyrolles, Paris 5, 1990.
- [12] C. Kuan, L. De-Kuan, W. X. T. Jia, "The hot-ageing property of electric insulating paper and press board of O-Akenaf bast fibre", Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 459-461, July 8-12, Tokyo, Japan, 1991.
- [13] L. M. Nikoloski, D. D. Hristovski, "Drying of already impregnated oil-paper insulation", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 178-181, San Francisco, October 20-23, 1996.
- [14] Mme S. Assous Née Khelil. "Caractérisation du papier presspahn utilisé dans l'isolation des transformateurs de haute tension", Thèse de Magister, Université de Tizi-Ouzou, le 27 Octobre 2004.
- [15] Y. Shang, L. Yang, Z. J. Guo, Z. Yan, "Assessing aging of large transformers bay furfural investigation", 7<sup>th</sup> IEEE International Conference on Solid Dielectrics, pp. 272-274, Eindhoven, the Netherlands, June 25-29, 2001.
- [16] P.J. Baird, H. Herman, G.C. Stevens, "Non destructive measurement of the degradation of transformer insulating paper", IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation, vol.13 N°1, pp. 309-318, February 2006.
- [17] M. J. Heathcote, "The J & P Transformer Book", Twelfth edition, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, 1998.

- [18] C. Menguy, "Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides", Techniques d'ingénieur, Traité génie électrique, D310, Paris, 1997.
- [19] Norme Européenne NF EN 60641-1, Indice C26-133-1, "Spécification pour le carton comprimé et le papier comprimé à usages électriques", Juin 1995.
- [20] Norme Européenne NF EN 60641-3-2, Indice de classement C26-133-2, "Spécification pour le carton comprimé et le papier comprimé à usages électriques", Novembre 1994.
- [21] Norme Européenne NF EN 60641-3-1, Indice C26-133-1, "Spécification pour le carton comprimé et le papier comprimé à usages électriques", Juin 1994.
- [22] H. Karner, U. Stietzel, M. Saure, W. Golz, "Détermination des faibles quantités d'eau dans les isolants solides organiques et influence de l'humidité sur les caractéristiques diélectriques", conférence internationale des grands réseaux Electriques, pp. 1-11, 29 Aout - 6 Septembre, 1984.
- [23] Norme Européenne NF EN 60641-2, Indice de classement C26-131-2, "Spécification pour le carton comprimé et le papier comprimé à usages électriques", Avril 1996.
- [24] R. Fournié, "les isolants en électrotechnique, essais et mécanismes de dégradation, applications industrielles", édition Eyrolles, Paris, 1990.
- [25] C. Boidson, M. Carballeira, P. Guunic, L. Latil, J. Poittevin, "le conditionnement sur site des transformateurs, son contrôle et son impact sur la tenue diélectrique", Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, pp. 1-8, 28 Aout – 3 Septembre, 1994.
- [26] N. Berger, "Liquide isolant en électrotechnique, présentation générale", Technique d'ingénieur, D2 470, Paris, Mai 2002.

- [27] P.J. Vuarchex, "Huile et liquides isolants", Technique d'ingénieur, D230, Paris 1995.
- [28] D. W. Auckland, K. chandraker, Z. Shakanti and B. R. Varlow, "Degradation of oil-paper systems due to the electrical field enhanced absorption of water", Seventh International Conference on Dielectric Materials Measurements and Applications, Conference Publication N° 430, IEEE, pp. 197-200, 23-26 September, 1996.
- [29] B. Khaddour, "Modélisation du champ électrique modifié par la charge d'espace injectée", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, le 21 Novembre 2006.
- [30] N. Foulon épouse Belkacemi, "Etude de la dégradation de matériaux isolants sous décharge couronne en régime de streamers. Mise au point d'une méthode de qualification de polymères", Thèse de Doctorat, Université de Paris VI, le 17 Décembre 1993.
- [31] S. Khabthani, "Les mesures électriques sur la physique des polymères sous contrainte mécaniques et électrique", Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud Centre d'Orsay, le 8 Juillet 1996.
- [32] Zibin LU, "Etude des mécanismes de dégradation des polymères par décharges électriques de type filamentaire", Thèse de Doctorat, Université Paris VI, le 12 Décembre 1991.
- [33] R. Ikene, "Influence des paramètres physiques de l'air et de la distance inter électrode sur la décharge couronne positive en géométrie fil-plan", Thèse de Magistère, Université Abderahmane Mira de Bejaia, Algérie, le 14 Décembre 1997.
- [34] A. Kasdi, "Etude de la décharge couronne bipolaire", Thèse de Magistère, Université, Abderahmane. Mira de Bejaia, Algérie, 2001.

- [35] S. Khabtani, "Les mesures électriques sur la physique des polymères sous contrainte mécaniques et électriques", Thèse de Doctorat, Université Paris Sud, Centre d'Orsay, 8 Juillet 1996,
- [36] Axel. Vincent, "Conception et simulation d'un réacteur fil-cylindre à décharge couronne avec barrière diélectrique adapté au traitement des oxydes d'azote dans des effluents marqués par un isotope", Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 20 Décembre 2002.
- [37] H. Yala, "Calcul numérique du champ électrique en géométrie fil-plan lors de la décharge couronne positive dans l'air", Thèse de Magistère, Université Abderahmane Mira de Bejaia, Algérie, le 16 Mai 2001.
- [38] F. W Peek, "Dielectric phenomena in H.V. Engineering, Mc Graw Hill", PP, 52-80, 1929.
- [39] G. Hartmann, "Unipolar field and diffusion charging in the transition regime", IEEE Trans, IA 20, pp, 1647-1651, 1984.
- [40] Y. Zebboudj, G. Hartmann, "Champ seuil de la décharge couronne positive et application du modèle physico-mathématique de la loi de Peek", 1<sup>er</sup> CNHT, Bejaia, Algerie, PP, 7-12. 1995.
- [41] S.Mouhoubi, A. Boubekour, "Influence des barrières isolantes sur la tension de claquage des intervalles d'air pointe-plan en tension continue et alternatives", Second International Conference on Electrical Systemes ICES, Oum El Bouaghi Algeria, May 08-10, 2006.
- [42] A. Beroual, A. Boubakeur, "Influence of barriers on the lightning ans swiching impulse strength of mean air gaps in pointe-plane arrangements", IEEE trans, On Electrical insulation. Vol. 20, N°6, p1131, Dec 1991.

- [43] A. Beroual, A. Boubakeur, "Influence of barriers on the lightning and switching impulse strength of mean air gaps in point/plane arrangements", IEEE transactions On Electrical insulation. Vol .26, N°6, p 1130 à 1139 December 1991.
- [44] K. Khodja, A. Belasri, "Etude d'une DBD pour lampe a excimères dans un gaz de xénon", 7<sup>ème</sup> CNHT'2009. Sidi Bel-Abbès, P 12 à 16, 19-21 Avril 2009.
- [45] Julien Jarrige, "Etude expérimentale des décharges électriques impulsionnelles nanoseconde a pression atmosphérique. Application au traitement des effluents gazeux et à la décontamination de surface", Thèse de Doctorat, Université de Rouen, 2008.
- [46] Yannick. Cesses, "Modélisation bidimensionnelle d'une décharge à barrière diélectrique : mise en évidence de l'importance des phénomènes aux électrodes", Thèse de Doctorat, Université de Paul Sabatier de Toulouse, 17 Mars 2004.
- [47] Alexandre Labergue, "Etude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas – Application au contrôle de décollements d'écoulements", Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2005.
- [48] Jianjun J. Shi, Dawei W. Liu, and Michael G. Kong, "Effects of Dielectric Barriers in Radio-Frequency Atmospheric Glow Discharges", IEEE transactions On Electrical insulation. Vol. 35, N° 2, p 137a 142, April 2007.
- [49] S.Mouhoubi , A. Boubekour , "Etude de l'influence d'une barrière trouée sur le champ électrique en géométrie pointe-plan", Second International Conference on Electrical Systemes ICES, Oum El Bouaghi Algeria, May 08-10 2006.
- [50] I.Fotana., A. Beroual, A . Boubakeur, "Influence of insulating barrier on positive long air gaps in divergent fields", IEE, N° 467, pp.3.321-3.324, 1999.
- [51] M. A. Handala, O. Lamrous, "Etude de courant de préclaquage d'une interface isolante solide /air", 7<sup>ème</sup> CNHT 2009. Sidi Bel-Abbès, P 40, 19-21 Avril 2009.

[52] R. Fournier, "Les isolants en électrotechnique concepts et théories", éditions Eyrolles 1986.