

# THESE

présentée à

**L'Université des Sciences et Technologies de Lille**

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE**

Spécialité : Microondes et Microtechnologies

par

**Tarik HAMMI**

Ingénieur EUDIL

---

**ETUDE DE METHODES DE MESURES ET  
REALISATION D'UN BANC DE TEST POUR  
L'EVALUATION DES PROPRIETES  
ELECTROSTATIQUES DES TEXTILES**

---

Soutenue le 6 avril 2005 devant la commission d'examen

Membres du jury : MM.

M. THOLOMIER

Président

B. MAZARI

Rapporteur

M. CAUTERMAN

Rapporteur

B. DEMOULIN

Directeur de thèse

J. LAPERRE

Examineur

J. VAN TROYS

Invité

*A mes parents  
ma famille  
mes amis*

# Remerciements

*Le travail de recherche présenté dans cette thèse a été mené au sein de l'Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologies (IEMN) de l'Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL). Ces travaux sont en fait le résultat d'une étroite collaboration entre l'équipe « Télécommunication, Interférences et Compatibilité Electromagnétique » (TELICE) de l'IEMN et l'Institut Français du Textile et de l'Habillement (IFTH).*

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur le professeur B. DEMOULIN responsable du groupe Compatibilité Electromagnetique (CEM) de l'équipe TELICE qui à assurer la direction de cette thèse. Les nombreux conseils qu'il m'a donnés, sa disponibilité ainsi que son écoute ont constitué un soutien précieux pour moi. Au-delà du travail en lui-même, il a souvent su orienter mes réflexions au cours de discussions très enrichissantes me faisant profiter d'une partie de sa grande culture scientifique. Il a ainsi, durant toutes ces années, contribué à mon initiation à la recherche et mon épanouissement scientifique et personnel. Qu'il trouve ici, pour cela, l'expression de toute ma gratitude et de mon plus profond respect.*

*L'encadrement de cette thèse au sein de l'IFTH a été assuré par Monsieur J. VANTROYS, responsable du département qualité et des laboratoires d'essais de la délégation de Lille. Son soutien tout au long de cette période m'a été d'une aide précieuse pour surmonter les moments difficiles et les moments de doutes. Par ses qualités humaines, il a su instaurer un climat de travail très agréable et chaleureux. Plus qu'un responsable, Joël est pour moi un ami. Je lui suis sincèrement reconnaissant pour toute la confiance qu'il m'a témoignée et l'autonomie qu'il m'a toujours accordé. Je lui adresse donc toute mon amitié et ma plus profonde gratitude.*

*Je tiens à remercier Monsieur le professeur M. THOLOMIER de l'université d'Aix-Marseille de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.*

*Mes remerciements vont également à Monsieur M. CAUTERMAN professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieur de Brest (ENIB) et à Monsieur B. MAZARI directeur de L'Institut de Recherche en Systemes Electroniques Embarqués (IRSEEM) pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail en tant que rapporteur et d'avoir participé à ce jury.*

*Je remercie également Monsieur J. Laperre, chargé de recherche à CENTEXBEL (centre technique belge du textile), pour avoir bien voulu examiner ce travail et participer au jury.*

*J'ai apprécié, tout au long de cette thèse, l'accueil qui m'a été fait au sein de l'IFTH, les relations amicales entretenues avec P. RAISON, L. HOUILLON, E. SMAL, B. BIZET, C. DECOTTENIES et bien d'autres. Je ne pourrais pas tous les citer mais ils se reconnaîtront.*

*J'associe également à mes remerciements tous les membres de TELICE, en particulier L. KONE pour tous ses conseils et son aide précieuse lors des manipulations expérimentales, mais aussi E. GILLMANN et Madame M. DEMOULIN pour leur soutien au quotidien que ce soit pour des questions administratives, informatiques...mais également personnelles.*

*Enfin je ne saurais terminer cette partie concernant les remerciements sans y associer mes proches. Tout d'abord ma mère et mon père, dont les encouragements et le soutien constant ont été d'une valeur inestimable durant ces longues années d'études, mais également mon frère et mes sœurs. Il serait impossible de pouvoir exprimer toute ma reconnaissance, encore moins en quelques lignes, mais je tiens tout de même à les remercier chaleureusement et leur assurer toute ma gratitude.*

*Mes amis ont également contribué à cette thèse, de près ou de loin, ils n'en ont sans doute pas tous conscience. Pour certains, il m'est souvent arrivé de les ennuyer avec mes travaux, mes satisfactions mais également mes doutes, mais toujours à mes côtés, ils ont su m'écouter et m'encourager, ceux-là se reconnaîtront et je les en remercie sincèrement.*

---

# Table des matières

---

# Table des matières

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>19</b>
<b>CHAPITRE I</b>	<b>23</b>
<b>NOTIONS D'ELECTROSTATIQUE ET CONTEXTE INDUSTRIEL</b>	<b>23</b>
<b>I-A INTRODUCTION</b>	<b>23</b>
<b>I-B CONTEXTE</b>	<b>24</b>
1. <b>Dans l'industrie en général</b>	<b>24</b>
a. Les nuisances techniques	24
b. Les risques pour la sécurité	25
2. <b>Cas du textile</b>	<b>26</b>
a. L'industrie textile	27
b. Les matières textiles	27
<b>I-C NOTIONS D'ELECTROSTATIQUE</b>	<b>28</b>
1. <b>Phénomène de charge</b>	<b>28</b>
a. L'effet triboélectrique	29
b. L'influence ou induction	31
c. L'effet corona (ou effet couronne)	32
2. <b>Les moyens de mesure et la répartition des charges</b>	<b>32</b>
a. Les mesures indirectes	32
b. Les mesures directes	33
c. Détermination de la répartition des charges surfaciques	35
3. <b>La décharge électrostatique</b>	<b>36</b>
a. Décharge électrique avec apparition d'un arc.	36
b. Décharge couronne et décharge rampante	38

**I-D DESCRIPTION DE QUELQUES SOLUTIONS DE LUTTE CONTRE L'ELECTRICITE STATIQUE ET DE METHODES DE MESURES NORMALISEES 38**

- 1. Procédés de lutte contre les nuisances électrostatiques 39**
  - a. Dans l'industrie 39
  - b. Cas du textile 39
- 2. Aspect normatif 40**
  - a. Les mesures de résistances 40
  - b. La résistivité de surface 41
  - c. La résistance transversale 44
  - d. La mesure du temps de décharge 47
  - e. Usage d'autres paramètres électriques 51
  - f. Autres alternatives de tests électrostatiques 52

**I-E NOTIONS SUR LES MATERIAUX TEXTILES ET DESCRIPTION DES ECHANTILLONS EXPERIMENTES 59**

- 1. Rappels sur le textile 59**
  - a. Les matières textiles 59
  - b. La filature 61
  - c. Tissage – tricotage - nontissés 62
  - d. Ennoblement 65
- 2. Description des échantillons utilisés dans les expériences 65**

**I-F CONCLUSION 73**

<b>CHAPITRE II</b>	<b>77</b>
<b>COMPORTEMENT DES TEXTILES APRES CHARGE PAR POLARISATION</b>	<b>77</b>
<b>II-A INTRODUCTION</b>	<b>77</b>
<b>II-B EXPERIENCES PRELIMINAIRES</b>	<b>78</b>
1. Principes des mesures	78
2. Effet d'un plan de masse à proximité du dispositif	80
3. Mesure du phénomène de fuite	84
a. Réponse du circuit à un train d'impulsions rectangulaires.	85
b. Application à la mesure de la résistance de fuite.	87
<b>II-C PRINCIPE DE LA METHODE DE MESURE PAR POLARISATION</b>	<b>90</b>
1. Utilisation du moulin à champ	90
a. Application de la mesure sans contact à la mesure de la résistance de fuite	90
b. Résultats de mesure	91
2. Application de la méthode aux échantillons textiles	92
3. Exemple d'application de la méthode sur des échantillons textiles composés majoritairement de chlorofibres	93
a. Influence de l'épaisseur de diélectrique	93
b. Limite d'utilisation du moulin à champ	96
<b>II-D APPLICATION AUX MATIERES TEXTILES ET MESURES DE RESISTANCES TRANSVERSALES</b>	<b>102</b>
1. Mesure de la résistance transversale selon la norme EN 1149-2	102
a. Principe de la méthode d'essai	102
b. Application de la méthode aux textiles à base de chlorofibres	104
2. Mesures de résistances de quelques textiles : utilisation comparée des deux méthodes.	104
a. Conditions expérimentales	105
b. Résultats des mesures de résistances	105

<b>3. Etude statistique</b>	<b>106</b>
a. Résultats des mesures	106
b. Commentaires	109
<b>4. Analyse des écarts obtenus entre les deux méthodes</b>	<b>110</b>
a. Influence des surfaces de contact et de la tension appliquée	110
b. Influence de la pression exercée sur les échantillons	114
<b>II-E VALIDATION DE LA METHODE DE MESURE ET PROPRIETES PHYSIQUES DE POLARISATION</b>	<b>115</b>
<b>1. Expériences menées sur des échantillons de papier</b>	<b>115</b>
a. Principe et conditions expérimentales	116
b. Résultats de mesure	116
c. Commentaires	117
<b>2. Utilisation d'un pont RLC</b>	<b>117</b>
a. Description du pont RLC utilisé	117
b. Caractérisation de l'échantillon de papier par le pont RLC	118
c. Utilisation d'échantillons de PVC	119
d. Utilisation de capacités connues	120
<b>3. Comportement d'un diélectrique à la polarisation</b>	<b>121</b>
a. Phénomène physique de polarisation	121
b. Le vecteur polarisation	123
c. Le cas d'un condensateur plan avec diélectrique	124
<b>II-F ANALYSE DES MECANISMES DE RELAXATION DANS LES DIELECTRIQUES</b>	<b>125</b>
<b>1. Considérations sur la loi de décroissance exponentielle et ses limites</b>	<b>125</b>
a. Le modèle de Debye	125
b. Comparaison de ce modèle théorique avec nos résultats de mesure	127
<b>2. Considérations sur une décroissance de type polynomial</b>	<b>128</b>
a. La loi Curie-von Schweidler	128
b. Confrontation de la loi polynomiale aux résultats de mesure	129
<b>3. Etude phénoménologique de la loi Curie-von Schweidler</b>	<b>132</b>
a. Distribution de temps de relaxation	132
b. Polarisation par sauts de porteurs de charges	133
c. La théorie à plusieurs corps	134
<b>II-G CONCLUSION</b>	<b>136</b>

<b>CHAPITRE III</b>	<b>139</b>
<b>COMPORTEMENT DES TEXTILES APRES CHARGE PAR FROTTEMENT</b>	<b>139</b>
<b>III-A INTRODUCTION</b>	<b>139</b>
<b>III-B BASES THEORIQUES DE L'EFFET TRIBOELECTRIQUE</b>	<b>140</b>
1. Charge par effet de surface	140
a. Contact métal/métal	140
b. Contact isolant/métal, isolant/isolant	142
2. Contribution des états de surface	143
<b>III-C EXPERIENCES TRIBOELECTRIQUES PRELIMINAIRES</b>	<b>145</b>
1. Mesures de champ électrique après frottement pour divers échantillons textiles	145
a. Description du protocole de mesure	145
b. Résultats et commentaires	146
2. Essais triboélectriques sur le dispositif normalisé EN1149-3 de l'IFTH-Lyon	148
a. Principe des mesures réalisées	148
b. Résultats et commentaires	149
3. Essais triboélectriques sur le dispositif normalisé EN1149-3 de l'IFTH-Lille : étude comparative	152
a. Principe des mesures	152
b. Résultats et commentaires	153
<b>III-D ETUDE DE LA PROPENSION A L'ACCUMULATION DE CHARGES ELECTRIQUES ET CONFRONTATION A LA DECHARGE PAR RELAXATION DIPOLAIRE.</b>	<b>156</b>
1. Comportement de la « chargeabilité » avec la nature du textile	156
2. Description du procédé de charge continue par frottement	158
a. Principe	158
b. Résultats de mesure	159

<b>3. Analyse comparative des décharges produites après frottement ou polarisation</b>	<b>160</b>
a. Cohabitation des phénomènes d'injection de charge et de polarisation	160
b. Confrontation des mesures de décharge après dépôt par frottement ou polarisation	161
c. Mesures de perte de charge sous faible hygrométrie	162
d. Résultats d'essais obtenus sur un échantillon de polyester	163
e. Résultats d'essais obtenus sur un échantillon de textile pour l'industrie automobile	166
f. Résultats d'essais obtenus pour des valeurs d'hygrométrie très faible	167

### **III-E MESURES DE TRANSFERT DE CHARGES 170**

<b>1. Description et caractérisation du capteur</b>	<b>170</b>
a. Description de l'électrode sphérique	170
b. Caractérisation de l'électrode	171
c. Simulation de décharges disruptives à l'aide d'un pistolet	173
<b>2. Tests de décharges disruptives sur des échantillons de textile</b>	<b>175</b>
a. Description du protocole de mesure	175
b. Présentation des signatures recueillies pour divers échantillons de textile	176
c. Etude statistique sur un échantillon de laine	177
<b>3. Exploitation des résultats de mesure de courants de décharge</b>	<b>179</b>
a. Détermination de la quantité de charge transférée	179
b. Détermination de l'énergie disruptive générée	181

### **III-F MESURE DU CHAMP ELECTRIQUE DYNAMIQUE 183**

<b>1. Description et caractérisation de l'antenne capacitive</b>	<b>183</b>
a. Description de l'antenne capacitive	183
b. Caractérisation de l'antenne au moyen d'une cellule TEM	184
<b>2. Utilisation de l'antenne capacitive pour la détection de champs électriques dynamiques dus aux textiles frottés.</b>	<b>188</b>
a. Principe des mesures sur échantillons textiles	188
b. Premières mesures de champ électromagnétique	188
c. Etude statistique sur un échantillon de laine	191
<b>3. Etude des propriétés des champs émis par divers échantillons textiles</b>	<b>192</b>
a. Caractérisation des champs en fonction de la nature des matériaux	192
b. Etude en fonction de la polarisation de l'antenne	194
c. Etude des champs émis en fonction des frotteurs utilisés et du sens de frottement	197

### **III-G CONCLUSION 200**

<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>203</b>
<b>ANNEXE A</b>	<b>209</b>
<b>ANNEXE B</b>	<b>211</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>217</b>

---

# Introduction générale

---

# Introduction générale

Les entreprises productrices de biens de consommation et plus spécialement l'industrie textile sont soumises à des normes nombreuses et diversifiées. Du domaine d'application des matériaux textiles dépendra le respect de critères d'inflammabilité, de non-propagation du feu, de la neutralité aux agents bactériens, de l'opacité aux poussières et à bien d'autres agressions. En d'autres termes, les textiles jouent de plus en plus le rôle de barrières physiques qu'il faut s'efforcer de qualifier au moyen de normes.

La préoccupation de notre thèse concerne les phénomènes d'origine électrostatique dont la manifestation peut avoir des conséquences redoutables. Les textiles utilisés pour la confection, le revêtement des sols ou des sièges constituent des domaines d'applications facilitant la collecte des charges électriques. Le contact fortuit avec ces matériaux chargés peut alors provoquer des courants de décharges matérialisés par un seuil d'ionisation développant une énergie capable d'engendrer l'explosion de certains fluides.

La communauté scientifique des industries textiles est donc à la recherche de méthodes de test capables d'évaluer la quantité de charges collectées par un matériau ainsi que l'estimation des facteurs concourant à éliminer naturellement ou artificiellement ces phénomènes indésirables. Certains tests électrostatiques dédiés aux applications textiles ont déjà fait l'objet de normes internationales, toutefois, l'exigence du marché demande d'en perfectionner les principes afin d'accroître la sévérité des critères.

Notre thèse s'inscrit dans le contexte d'un contrat CIFRE ayant pour partenaire industriel l'IFTH (Institut Français du Textile et de l'Habillement) représenté ici par la délégation installée à Lille et pour partenaire universitaire le groupe TELICE (Télécommunications, Interférences et Compatibilité Electromagnétique) de l'IEMN attaché conjointement au CNRS et à l'Université des Sciences et Technologie de Lille.

Le principal objectif de la thèse n'est pas d'entreprendre une recherche fondamentale sur les phénomènes électrostatiques mis en jeu dans les textiles mais plus modestement d'établir des plans d'expériences dans lesquels on s'efforcera d'identifier les phénomènes relatés dans l'analyse bibliographique attentive du sujet. Ces expériences et interprétations ont ensuite pour finalité d'établir des recommandations visant à perfectionner les méthodes de mesure existantes ou d'en imaginer de nouvelles encore mieux adaptées au contexte du textile.

Notre manuscrit organisé en trois chapitres comporte tout d'abord une première partie décrivant le contexte industriel dans lequel s'inscrit cette thèse. Ainsi les nuisances dues à l'électricité statique et les risques potentiels pour la sécurité y sont évalués, aussi bien dans le

cadre de l'industrie du textile que pour tout autre secteur industriel susceptible d'être concerné par ces phénomènes. Par ailleurs, quelques éléments théoriques généraux sur l'électrostatique sont également présentés concernant, notamment, les principaux procédés de charge, les moyens de mesure ainsi que le phénomène de décharge électrostatique. Dans ce chapitre, un accent particulier est mis sur les méthodes de mesure existantes et les exigences normatives actuelles. Une brève description de la filière textile et des échantillons utilisés pour les expériences complète cette partie introductive.

Le chapitre 2 est consacré à l'étude des comportements des textiles lorsqu'ils sont chargés par polarisation. Une des grandes difficultés de la caractérisation des matériaux textiles du point de vue électrostatique est le choix du mode de charge des échantillons. La charge par polarisation a l'avantage d'être une méthode simple à mettre en œuvre et surtout d'assurer une bonne reproductibilité des mesures. Ce chapitre s'appuie donc sur des campagnes de mesures réalisées tout d'abord sur des disques métalliques et des condensateurs et ensuite sur des échantillons isolants (textiles principalement). L'évaluation de la résistance de fuite de ces échantillons, ainsi qu'une étude comparative avec les mesures de résistance transversale amèneront à une interprétation des comportements après polarisation développée sur la base de données bibliographiques approfondies.

Enfin, le chapitre 3 est consacré à l'étude des comportements des textiles lorsqu'ils sont chargés par frottement. Ce mode de charge des textiles est le plus répandu dans la vie courante, cependant il reste le plus difficile à réaliser avec reproductibilité. La compréhension théorique du phénomène triboélectrique n'est à ce jour pas satisfaisante, un bref état de l'art sera abordé dans cette partie. Une série d'expériences employant les méthodes d'essai normalisées permettront d'appréhender les contraintes de reproductibilité de l'effet triboélectrique. C'est pourquoi ce chapitre propose une méthode alternative d'évaluation des matériaux textiles basée sur un dépôt de charge par frottement continu, méthode qui prend en compte la charge et la décharge des échantillons. Les résultats d'expérience obtenus avec cette méthode feront l'objet d'une interprétation détaillée dans le but de mettre la lumière sur certains mécanismes de décharge. Les conséquences de l'accumulation des charges par frottement, à savoir la décharge disruptive et l'émission d'un champ électrique dynamique, seront également abordées dans ce dernier chapitre. La mesure de courants de décharge permettra d'exploiter les paramètres liés aux décharges disruptives, un capteur a été réalisé et mis en application spécialement à cet effet. La mesure du champ électrique dynamique, quant à elle, est une méthode alternative. Les résultats obtenus, à l'aide d'un capteur réalisé au cours de ce travail de thèse, seront présentés à la fin de ce manuscrit et permettront de proposer l'étude des signatures temporelles de ce phénomène comme un moyen de caractérisation potentiellement pertinent.

---

# Chapitre I

---

# Chapitre I

## Notions d'électrostatique et contexte industriel

### I-A Introduction

Les nuisances dues à l'électricité statique ont une importance de premier ordre dans un très grand nombre de domaines. Ces nuisances peuvent entraîner de simples gênes (à la production par exemple) qui peuvent être coûteuses, voire destructrices (notamment dans le domaine de la microélectronique) ou bien des dommages plus graves, liés à la sécurité des personnes (explosions dans des zones à risques).

Le rôle des textiles est très important dans les phénomènes de génération d'électricité statique, car en effet, ces phénomènes sont essentiellement des phénomènes de surface, le rapport surface/volume des textiles étant très grand, ils deviennent dès lors particulièrement enclins à développer des charges électrostatiques. L'usage extrêmement répandu des matières textiles a pour conséquence de généraliser ces problèmes au niveau du paysage industriel dans sa globalité.

Il devient donc très important de réussir à comprendre les mécanismes mis en jeu et de pouvoir mesurer ces phénomènes.

## **I-B Contexte**

Dans la majeure partie des cas, l'électricité statique se forme suite au contact suivi de la séparation de deux corps ou du frottement entre ces deux corps. Les deux corps peuvent être des isolants ou bien l'un d'entre eux, un conducteur, qu'il soit ou non relié à la terre. L'accumulation des charges ainsi créées peut alors entraîner une gêne pour la production ou même un danger dans les milieux industriels à risques. De nombreux facteurs jouent un rôle dans l'établissement de ces charges électriques : la nature des corps mis en jeu évidemment, mais aussi des facteurs externes tels que l'humidité de l'air environnant et la température [1].

### **1. Dans l'industrie en général**

De nombreux secteurs industriels sont touchés par des problèmes liés aux phénomènes électrostatiques ; il devient alors très important de pouvoir si ce n'est les éviter au moins en diminuer les effets au maximum.

Principalement, c'est lors du transport de matières isolantes pendant les phases de production industrielle que des problèmes d'électricité statique peuvent survenir. En effet de nombreux matériaux non-conducteurs tel que : les matières plastiques, le caoutchouc, le papier, les hydrocarbures... auront tendance à se charger en électricité statique par frottement lors de ces manipulations qui se font souvent à des vitesses élevées (transport sur tapis pneumatiques...). Dans des conditions d'atmosphères très sèches, un grand nombre d'autres matières peuvent être concernées par ces problèmes alors qu'elles ne le sont pas en condition normale. La génération d'électricité statique concerne aussi bien les matières solides que les fluides : les liquides non-conducteurs comme l'essence risquent de se charger pendant les phases d'écoulement dans des canalisations... Dans ce dernier cas de figure, le risque pour la sécurité des individus est le problème principal, en effet, une étincelle peut déclencher une explosion.

#### **a. Les nuisances techniques**

L'électricité statique peut être une source de problèmes pendant les phases de production dans de nombreux domaines différents et cela à tous les niveaux de fabrication, par exemple :

- Dans le domaine de la microélectronique, les composants réalisés sont de plus en plus miniaturisés, et par-là même, de plus en plus sensibles à de très faibles parasites. Une décharge électrostatique produit suffisamment d'énergie pour endommager gravement ces composants.
- L'apparition de charges électriques engendre des phénomènes de répulsions et d'attractions qui ont pour conséquence de gêner les travaux industriels

notamment dans les industries du papier, du plastique... Des poussières peuvent également être attirées, se déposant alors en une couche épaisse sur les parois des machines, et obstruant parfois certains conduits ou filtres.

- L'électricité statique peut également être une nuisance pour les industriels au niveau du produit fini. En effet, les constructeurs automobiles développent un effort particulier pour limiter les phénomènes de décharge électrostatique que peut ressentir l'utilisateur lors de la descente du véhicule. Cet aspect qui n'est certes qu'une question de confort reste très important pour l'image de marque du constructeur.

Le monde industriel regorge de quantité d'autres exemples de ce genre, plus ou moins complexes, mais tous très gênants et dont les solutions adéquates restent à trouver.

## **b. Les risques pour la sécurité**

Les conséquences les plus graves de l'électricité statique sont, sans aucun doute, les incendies et explosions qu'elle peut engendrer. En effet, les atmosphères explosibles (mélanges air/vapeurs d'hydrocarbure par exemple) et les suspensions de poussières de matières pulvérulentes peuvent exploser à cause de décharges électriques d'énergie très faible : de l'ordre de  $10^{-4}$  joules pour un mélange vapeurs/air et  $10^{-6}$  joules pour un mélange vapeurs/oxygène. Pour évaluer l'énergie dégagée  $E$  par une étincelle et de manière approximative, dans quelques cas simples on peut procéder comme suit :

$$E = \frac{1}{2}QU \text{ avec } Q = CU \text{ (équivalent à la charge d'un condensateur)} \quad (\text{I.1})$$

où  $U$  représente le potentiel du corps chargé,  
soit :

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \quad (\text{I.2})$$

La charge  $Q$  est fonction des surfaces en contact (brouillard, poussières, pulvérisation, filtres), de la vitesse de séparation (courroie de transmission, vitesse de circulation de produit dans des canalisations, par exemple), de la catégorie des matériaux en présence (isolant, conducteur...). La capacité  $C$  des éléments est proportionnelle aux dimensions des éléments (surface en présence). Le tableau ci-dessous donne quelques exemples de capacités par rapport à la masse exprimées en picofarad pF ( $10^{-12}$  Farad)

	Capacité en pF
Boulons	1
Personne	100 à 200
Wagon citerne	~ 1000

*Tableau I.1 – Quelques exemples d'ordres de grandeur de capacités*

La tension générée peut atteindre des valeurs susceptibles de créer des étincelles entre les surfaces mises en présence (champ disruptif dans l'air dans des conditions normales (20°, 11g/m<sup>3</sup> d'humidité...) vaut 30 kV/cm). Les exemples suivants rencontrés dans la pratique donnent un ordre de grandeur des phénomènes.

	Tensions en kV
Personne marchant sur un tapis (semelles caoutchouc)	20
Courroie de transmission à une vitesse de 3 à 15 m/s	80
Surface libre d'un carburant dans un grand réservoir en remplissage	100
Rouleau de papier lors du déroulement à 10 m/s	150

*Tableau I.2 – Quelques exemples d'ordres de grandeur de potentiels que l'on peut rencontrer*

Les énergies rencontrées dans la pratique sont donc très souvent au-delà des niveaux nécessaires pour déclencher une explosion.

## **2. Cas du textile**

Les problèmes dus au développement de charges électrostatiques sur des fibres, des tissus ou d'autres étoffes textiles sont nombreux et variés. En général, ils sont plus importants avec des fibres dont la teneur en eau est relativement basse et dans des milieux où le taux d'humidité ambiant est faible, car cela donne lieu à des accumulations de charges importantes et persistantes. Les nuisances surviennent d'abord lors des productions industrielles textiles, en effet, les charges peuvent s'accumuler sur les matériaux textiles pendant leurs manipulations et être transmises à des conducteurs isolés. Ces troubles continuent pendant

l'utilisation de ces matières textiles, dus à l'accroissement de la quantité de charge sur les textiles, les corps en contact ou à proximité.

**a. L'industrie textile**

Une fois encore les problèmes peuvent apparaître à divers niveaux de la filière textile. Aussi bien au niveau de la filature qu'au niveau du tissage :

- Les phénomènes d'attractions et de répulsions entraînent souvent divers problèmes de bobinage.
- Lors de la préparation des fils parallèles pour le métier à tisser (ourdissage), ces mêmes causes peuvent également entraver le bon fonctionnement du système.
- Un autre cas fréquent peut survenir à la sortie du métier à tisser, le tissu se charge électriquement en sortant et l'électricité statique peut empêcher le repliement sur lui-même.

De nombreux autres exemples sont rencontrés fréquemment dans l'industrie du textile, mais plus important encore est la généralisation de l'utilisation de matières textiles dans de nombreux domaines et donc les risques de voir apparaître des problèmes électrostatiques liés à ces textiles.

**b. Les matières textiles**

On a longtemps suspecté que l'attraction électrostatique empêchait l'ouverture des parachutes et pouvait conduire ainsi à des catastrophes. Des études théoriques au niveau des forces aérodynamiques durant les premières étapes d'ouverture de parachute ont permis de déterminer la vitesse minimale de l'air nécessaire pour ouvrir un parachute chargé électriquement. Des expériences ont montré qu'une densité surfacique de charge d'environ  $15\mu C m^{-2}$  peut empêcher l'ouverture d'un parachute pour des vitesses de l'air inférieures à  $4.5ms^{-1}$  [2].

Cet exemple montre bien la diversité des problèmes soulevés par l'électricité statique au niveau des textiles et que l'on retrouve dans beaucoup de domaines très variés.

A chaque fois que nous aurons affaire à des matières textiles en contact avec d'autres substances : dans les canalisations, au niveau de filtres, des revêtements dans les bâtiments..., l'accumulation de charges électrostatiques est systématique.

Le cas de figure de la génération de charges électrostatiques le plus répandu reste sans doute celui du corps humain qui se charge en électricité statique dès qu'il se trouve debout, isolé, sur un revêtement de sol non-conducteur. Ainsi les déplacements vont entraîner une accumulation de charges très importante au sein de ce dernier.

A titre d'exemple numérique, une personne équipée de chaussures à semelles caoutchouc marchant sur une moquette génère une tension voisine de 20 kV, sa capacité par rapport à la masse est de l'ordre de 170 pF. Dans ces conditions, l'énergie développée lors de l'étincelle d'équilibrage des charges est égale à :

$$E = \frac{1}{2} \cdot 170 \cdot 10^{-12} \cdot (20000)^2 \text{ soit environ } 17 \text{ mJ.}$$

La capacité électrique du corps est largement suffisante pour qu'en touchant une machine, l'homme puisse émettre des étincelles dangereuses dans une atmosphère inflammable.

Les moyens d'électrification d'un matériau textile sont très variés, mais une fois chargé, la détermination quantitative de la répartition des charges électrostatiques sur ce textile reste difficile. Enfin la décharge est probablement le phénomène le plus important car c'est lui qui provoque le plus de problèmes.

## **I-C Notions d'électrostatique**

### **1. Phénomène de charge**

Un corps chargé électriquement est la manifestation d'une accumulation ou d'une perte de charges électriques. En effet, lorsqu'un corps est en équilibre, il est électriquement neutre. Ce corps sera électrisé lorsque quelques-uns de ses atomes auront soit gagné, soit perdu un ou plusieurs électrons rompant ainsi l'équilibre et la neutralité. On dit alors que ce corps possède une charge électrique.

Il y a de nombreux modes d'électrisation possibles :

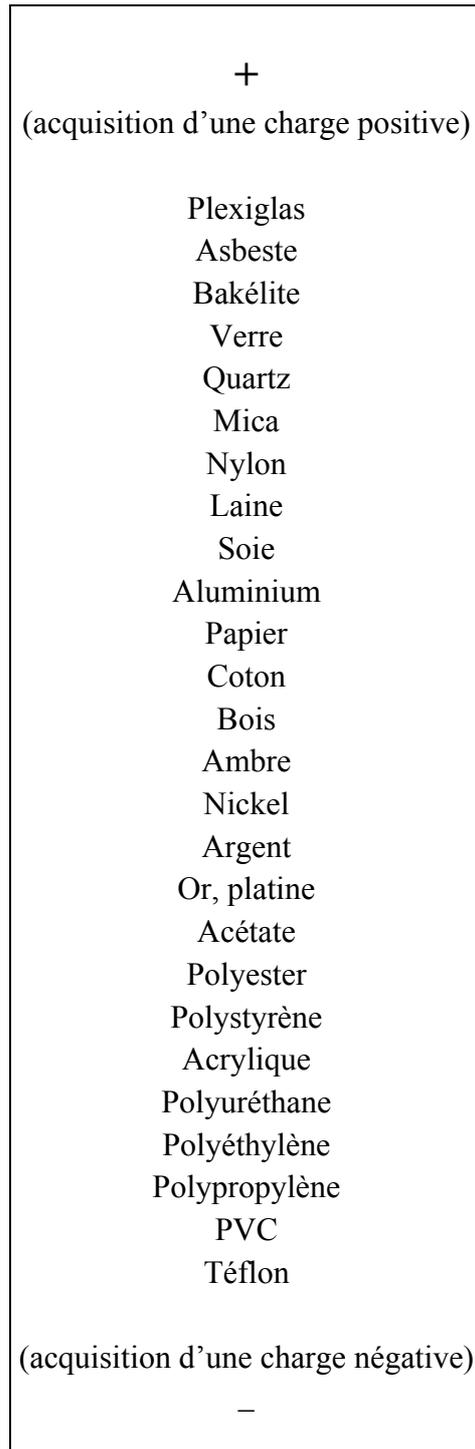
- par frottement (triboélectricité)
- par contact (transfert direct de charges)
- par ionisation (émissions d'ions sous haute tension)
- par influence (à l'aide d'un champ électrique)
- par clivage (fragmentation)
- par effet photoélectrique
- par émission thermoélectronique
- par ballo-électricité (agitation des particules dans un flux de gaz) etc.

Les phénomènes les plus répandus étant l'effet triboélectrique et l'influence. Dans le domaine du textile, la plus importante source de charges électrostatiques reste le phénomène de charge triboélectrique.

**a. L'effet triboélectrique**

Il s'agit d'un transfert de charges électriques entre différents matériaux : lorsque deux matériaux électriquement neutres entrent en contact, il y a un transfert de charges qui aboutit à l'obtention de deux matériaux chargés, l'un positivement et l'autre négativement [2]. Si l'un des matériaux présente une conductivité faible, les charges ainsi générées resteront après séparation et de nouveaux contacts auront pour effet de produire de nouveaux transferts de charges. L'effet triboélectrique est en général associé à l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux mais sa définition s'étend souvent au transfert de charges par contact, le frottement étant l'équivalent de contacts suivi de séparations, mais s'accompagnant de génération de chaleur et parfois de transfert de masse.

La polarité des charges dépend de nombreux facteurs, on peut cependant établir des listes ou séries dites triboélectriques (figure I.1), auxquelles on prête la valeur d'indice : plus les deux matériaux dont il s'agit sont éloignés l'un de l'autre sur la liste, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée. En réalité, on ne peut pas se fier complètement à l'ordre des matériaux dans ces listes car il diffère souvent d'un auteur à l'autre ; en effet une différence dans le frottement, des facteurs externes peuvent inverser les signes obtenus, il semble donc impossible de réaliser une liste avec un ordre fiable. Cette particularité de l'électricité statique ; le fait que les signes peuvent s'inverser de manière si facile, est très surprenant et est un élément de plus qui peut permettre de comprendre les mécanismes électrostatiques.



*Figure I.1 – Classement de certains matériaux selon leur caractère triboélectrique*

Ce classement n'est donc que très approximatif et l'ordre des différents matériaux peut varier sous l'influence de facteurs tels que : la rugosité de la surface, les forces de contact, le travail de sortie... En définitive ce diagramme n'est qu'un outil de comparaisons relatives entre les différents corps plutôt qu'une référence absolue.

**b. L'influence ou induction**

Le phénomène d'influence correspond à l'apparition de charges électrostatiques sur un corps conducteur dû à la proximité d'un corps déjà chargé, sans qu'il y ait contact entre les deux. En effet la présence du corps chargé induit un champ électrique à l'intérieur du corps influencé produisant ainsi des forces qui vont s'exercer sur les porteurs de charges libres ayant pour conséquence une redistribution de ceux-ci. La charge ainsi induite sera de signe opposé à la charge du corps influençant. En fait, en présence d'un champ électrique le matériau se polarise, une charge surfacique induite dite de polarisation apparaît alors [3,4]. Comme le montre la figure I.2, il y apparaît autant de charges (+) que de charges (-).

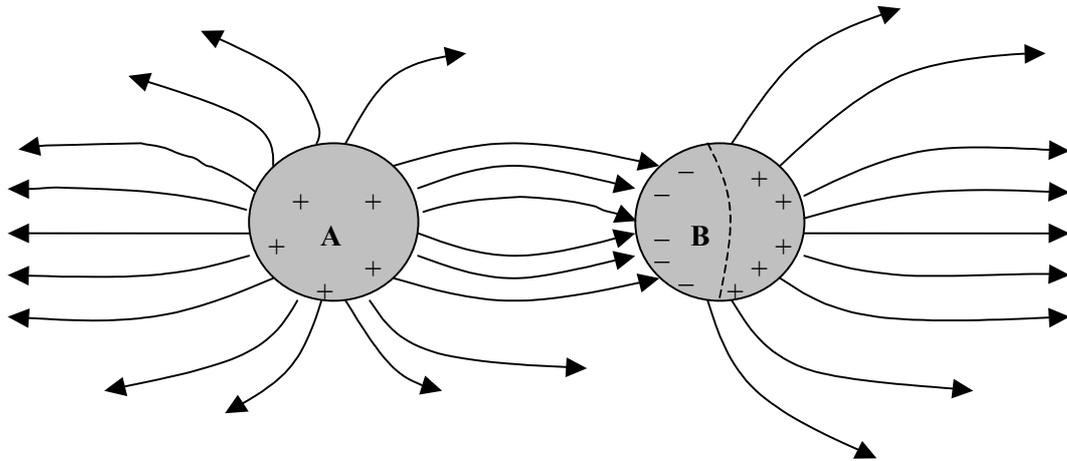


Figure I.2 – Influence entre deux corps (le corps B étant isolé)

A la séparation des deux zones chargées formées sur le corps influencé, il existe une ligne neutre. La région qui est la plus proche du corps influençant est chargée de signe contraire, et comme on peut le voir sur la figure, une partie des lignes de champ partant du corps influençant n'arrivent pas sur le corps influencé, de telle sorte que la charge ainsi induite sera toujours plus faible en valeur absolue que celle portée par le corps A.

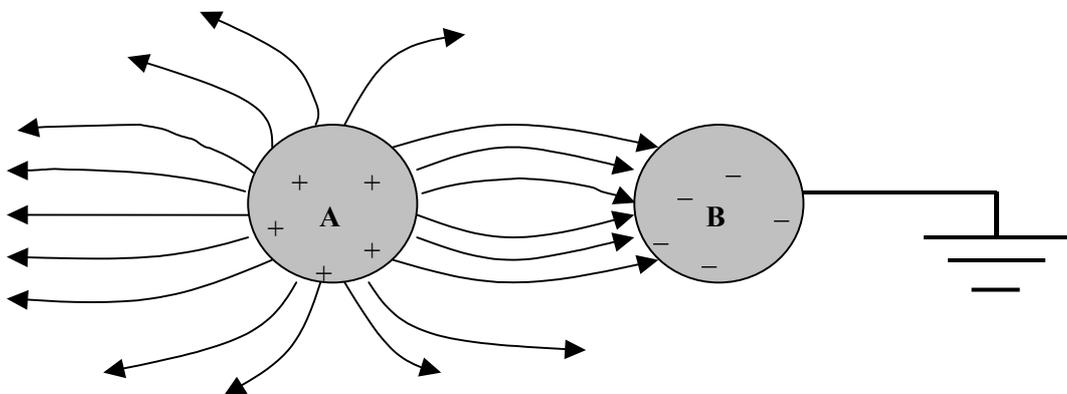


Figure I.3 – Influence entre deux corps (le corps B étant relié à la terre)

Si le corps influencé B est relié à la terre, il ne porte que des charges de signe contraire à celle du corps influençant et leur valeur absolue est toujours plus petite que celle de A.

Les textiles auront tendance à générer des charges électriques sur des corps conducteurs (comme le corps humain, les métaux ou des fibres conductrices ...) par le biais de ce mécanisme. En fait, l'influence peut s'avérer être un moyen pratique pour la mesure de la quantité de charge d'un corps.

**c. L'effet corona (ou effet couronne)**

L'effet couronne correspond au phénomène d'ionisation de l'air proche d'un corps dont le potentiel électrique est très élevé. En effet, un corps dont le potentiel électrique est suffisamment élevé va permettre d'atteindre le potentiel seuil au-delà duquel l'air à proximité va devenir conducteur : c'est le potentiel disruptif de l'air. Le corps chargé provoque un champ électrique très intense dans son voisinage proche, de sorte qu'il se crée un plasma conducteur par ionisation de l'air.

Cet effet couronne est aujourd'hui exploité pour charger des matériaux isolants dans le but d'étudier l'évolution de cette charge. Cette méthode est pratique car elle permet de déposer de manière contrôlée une quantité de charge connue (sous forme d'ions) à la surface d'un corps.

**2. Les moyens de mesure et la répartition des charges**

Le problème principal lié à l'étude de l'électricité statique est la grande difficulté de mesurer le phénomène. On peut distinguer deux types de mesures : les mesures directes où l'on essaye de déterminer la charge électrique d'un corps et les mesures indirectes où ce sont des propriétés particulières des corps vis-à-vis de l'électricité statique que l'on mesure (résistivité, temps de décharge...) pour comprendre leur comportement électrostatique. Le problème de la répartition des charges au niveau des surfaces des isolants est également difficile à traiter, très peu de moyens aujourd'hui permettent d'étudier cela [1].

**a. Les mesures indirectes**

Les mesures indirectes vont permettre de déterminer des paramètres physiques intervenant dans le comportement électrostatique des corps étudiés. Le fait que certains matériaux plus que d'autres posent problème d'un point de vue électrostatique est lié à la difficulté qu'ils ont à écouler les charges électriques. En effet, un risque de décharge électrique apparaît lorsque les charges ont le temps de s'accumuler en quantité suffisante pour atteindre le potentiel disruptif de l'air. La plupart des mesures faites sur les matériaux, et

notamment sur les textiles, sont des mesures permettant de déterminer la potentialité de ces matériaux à retenir les charges électriques, ce sont donc des mesures de résistance ou de résistivité électrique, au niveau de la surface ou du volume du matériau.

Un autre moyen indirect de mesure, fait sur le corps humain, est la détermination de la propension à l'accumulation de charges électriques par celui-ci lors d'un déplacement sur un sol isolant. Cette méthode de mesure ainsi que les mesures de résistances électriques sont détaillées au paragraphe I-D.2 de ce chapitre.

### b. Les mesures directes

Les mesures directes de la charge électrique sont établies sur un même principe de base : un capteur relié à un appareil de mesure dont la base est un voltmètre. L'impédance d'entrée de ce voltmètre doit être la plus grande possible, afin d'éviter toute consommation de la part de ce dernier.

Le cylindre de Faraday se présente comme un récipient métallique (d'ailleurs pas forcément cylindrique) à l'intérieur duquel on introduit les échantillons chargés (figure I.4) [5]. Ce récipient est placé dans un autre, métallique lui aussi, mais isolés l'un de l'autre. Le récipient extérieur est relié à la terre et fait office de blindage contre les parasites extérieurs. Pour mesurer la charge électrique d'un échantillon, il suffit de l'introduire dans le cylindre intérieur, en évitant tout contact prématuré, celui-ci étant relié à un dispositif de mesure (voltmètre). On mesure alors une charge globale, somme algébrique de toutes celles que porte l'échantillon, donnée par la relation suivante :

$$Q = CV \quad (I.3)$$

L'intérêt est que l'on obtient une estimation précise de la charge nette de l'échantillon puisque pratiquement toutes ses lignes de champs se ferment dans le cylindre. Cependant, il est impossible de faire la distinction entre un échantillon ne portant pas de charges électriques d'un échantillon qui présenterait des zones chargées positivement et négativement mais qui se compenseraient exactement. Dans ce dernier cas de figure, les zones chargées restent potentiellement dangereuses même si la mesure au cylindre de Faraday donne une charge nulle.

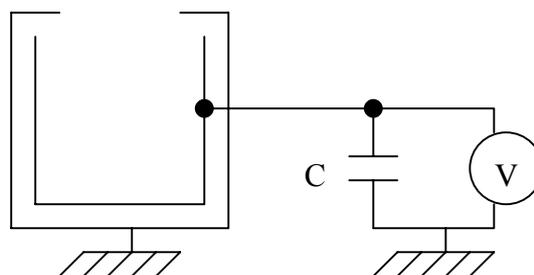


Figure I.4 – Schéma de principe de cylindre de Faraday

Une autre mesure directe consiste en un procédé qui tire avantage de l'effet de pointe pour décharger une zone de l'échantillon et mesurer ces charges ainsi recueillies au niveau d'une capacité. L'utilisation d'une pointe métallique (aiguille) permet de réaliser cela, mais cette technique pose énormément de problèmes notamment de sécurité si on se trouve dans une zone à risques. Elle permet cependant d'évaluer le risque d'apparition d'une étincelle pour un échantillon donné, dans des conditions atmosphériques données et de déterminer l'énergie dégagée par cette étincelle.

En définitive les seules mesures qui restent pratiques et fiables sont les mesures utilisant le phénomène d'influence [6]. Elles permettent soit de mesurer le champ électrique, soit le potentiel électrique, ces informations pouvant servir alors à calculer la densité de charge surfacique. Le principe porte sur l'utilisation d'un capteur (électrode) relié à un appareil de mesure, le plus souvent un voltmètre. Cependant il faut garder à l'esprit que ce sont des mesures très sensibles, avec de très faibles niveaux d'énergie, il faut donc que la mesure elle-même n'affecte pas les résultats. C'est pourquoi il est important que l'impédance d'entrée de l'appareil de mesure soit très élevée ( $>10^{11} \Omega$ ) et que la capacité d'entrée soit faible ( $< 5 \text{ pF}$ ).

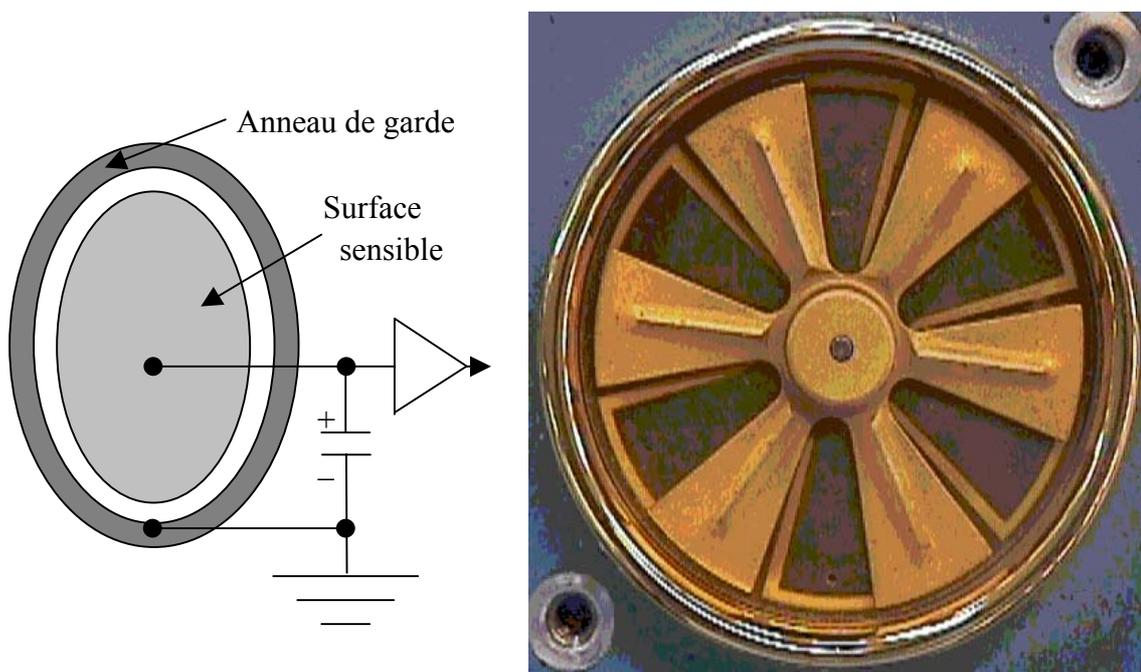


Figure I.5 – Schéma de principe d'une sonde à induction (à gauche) et photo de l'objectif d'un moulin à champ (à droite)

La figure I.5 montre les deux principaux types de mesureurs de champ électrostatique. Le plus simple est la sonde à induction où une plaque sensible est exposée au champ électrique créé par les charges proches, une charge image apparaît alors et est recueillie au niveau de la capacité, la tension aux bornes de cette capacité est ensuite amplifiée pour exploiter le signal. Les limitations de ces sondes sont principalement l'impossibilité de faire des mesures pendant

un temps prolongé de manière continue et surtout la nécessité de refaire le « zéro » avant chaque mesure dans une région libre de tout champ électrique.

La tension recueillie  $V$  est proportionnelle au champ électrique  $E$  à mesurer, selon la relation :

$$V = \frac{\varepsilon_0 ES}{C} \quad (I.4)$$

où  $\varepsilon_0$  représente la permittivité du vide,  $S$  la surface de l'électrode et  $C$  la capacité de mesure.

Le moulin à champ fonctionne sur le même principe, seulement une hélice reliée à la terre permet de moduler le champ reçu en obstruant par intermittence la plaque sensible (en forme d'hélice elle aussi). Cet appareil est plus performant, il permet une meilleure sensibilité (des champs de quelques  $\text{Vm}^{-1}$ ) et il n'est pas nécessaire de refaire le « zéro » à chaque mesure. Les performances de quelques  $\text{Vm}^{-1}$  associés à des temps de réponse de quelques ms permettent des mesures très sensibles, de détecter des niveaux de charges électrostatiques très bas avec une précision de 1%.

Les mesureurs de champ existent également sous la forme de sondes de potentiel asservies. En effet, ces sondes s'équilibrent automatiquement avec le potentiel mesuré afin d'éliminer le champ électrique entre la sonde et la surface chargée, cette condition permet la mesure de distributions de charges à la surface du matériau sans qu'elles ne soient perturbées par la sonde. La limitation principale de cette méthode reste la sensibilité qui est nettement inférieure à celle des « moulin à champ » car la surface de capture est beaucoup plus petite.

### c. Détermination de la répartition des charges surfaciques

La répartition des charges au niveau des surfaces mises en jeu lors des phénomènes électrostatiques est très complexe. Il est très difficile de mettre en évidence cette répartition. La seule méthode qui permette la visualisation de la répartition surfacique des charges reste le poudrage. Elle a pour but de visualiser avec une grande précision la carte des charges électriques à la surface d'un isolant. On peut utiliser des poudres bicolores (minium et soufre) respectivement sensibles aux charges positives et négatives. Cette méthode montre l'extrême complexité de ces répartitions, on peut voir des petites régions négatives qui sont presque toujours auréolées d'une zone positive ou réciproquement. Aucune autre méthode ne peut révéler des détails aussi fins, chaque grain constituant à lui seul un détecteur, mais elle est difficilement quantifiable.

L'évaluation de la distribution par simulation numérique constitue une autre voie. Des études et des outils informatiques de simulation ont été mis au point, ils sont basés sur la résolution de l'équation de poisson :

$$\Delta V = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (I.5)$$

Où  $\rho$  représente la densité volumique de charge,  $V$  le potentiel électrique,  $\epsilon_0$  la permittivité du vide et  $\Delta$  l'opérateur mathématique Laplacien. Dans cette équation, nous voyons que le potentiel électrique est lié directement à ses sources, les charges surfaciques, donc la connaissance du potentiel nous permet de connaître la distribution de charges. En coordonnées cartésiennes, l'équation devient :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{I.6})$$

### 3. La décharge électrostatique

La décharge électrostatique est probablement le phénomène le plus important à appréhender, car il est la principale cause des nuisances dues à l'électricité statique. Ce phénomène traduit l'écoulement des charges électriques qui intervient naturellement après une phase d'accumulation, il peut se produire de différentes manières :

- Dans de l'air (humidité)
- L'ionisation de l'air (effet couronne)
- L'arc (ou contact par effluve)
- L'utilisation de matières solides ou liquides conductrices
- La mise à la masse...

Le fait d'utiliser des matières métalliques ou de mettre les équipements en contact avec la terre favorise l'écoulement de ces charges de manière contrôlée. Par contre, les mécanismes de décharges qui peuvent poser problème ne sont pas contrôlés, ils sont majoritairement la conséquence du champ électrique intense dans le milieu environnant. En effet, de telles décharges apparaissent lorsqu'une distribution de charge superficielle ou volumique engendre un champ électrique supérieur à la rigidité diélectrique du milieu.

#### a. Décharge électrique avec apparition d'un arc.

Le phénomène survient lorsque la croissance de la charge électrique a atteint un seuil : en effet, au cours de cette croissance, le potentiel au niveau de la surface concernée croît également, lorsqu'il atteint le potentiel disruptif de l'air, un arc se forme entre la surface chargée et celle d'un conducteur proche. Cette étincelle correspond à une ionisation de l'air, c'est un phénomène transitoire très bref, les temps de montée du courant de décharge étant de l'ordre de la nanoseconde. C'est ce phénomène que l'on cherche à tout prix à éviter surtout dans les zones à risques, car l'énergie mise en jeu lors de cette décharge est suffisante pour déclencher un incendie ou une explosion. C'est également ce phénomène que l'on exploite dans certains cas particuliers : dans certains moteurs, mais aussi pour certains moyens de

mesure qui utilise ce phénomène pour collecter la charge lors d'une mesure (capteurs à aiguille).

En fait, ce phénomène est favorisé par toute rugosité ou saillie car ces zones provoquent des concentrations de champ électrique où le potentiel sera très élevé et pourra donc plus facilement atteindre le seuil critique : c'est l'effet de pointe. Les capteurs à aiguille agissent par effet de pointe en raison de l'énorme densité de charge à leur extrémité puisque leur surface en est quasi nulle. Lorsque ce phénomène survient entre deux conducteurs, le conducteur initialement chargé perd la totalité de sa charge électrique, en première approximation la totalité de l'énergie électrostatique est dissipée par la décharge. Dans le cas d'un conducteur et d'un isolant (voire deux isolants entre eux) la décharge n'est que partielle, le trajet de cette décharge étant multiple, en forme de « buisson » d'où l'appellation décharge en buisson (de l'anglais « brush discharge »).

Il s'agit d'un transfert d'électrons ionisant l'air sur leur passage. En effet, au moment où le transfert commence, si progressivement que l'on opère, le trajet du premier électron passant commence à ioniser l'air, ouvrant un passage plus facile aux autres qui se précipitent dans son sillage, et ionisent davantage le trajet, ce qui permet à des électrons plus éloignés de la pointe que le premier de la rejoindre. Ainsi est déchargée une zone circulaire centrée sur l'aiguille (cas d'une décharge partielle), le phénomène ne s'arrêtant que lorsque la distance des charges restantes devient supérieure à celle qui correspond au potentiel disruptif de l'atmosphère.

Pour essayer de comprendre certains comportements de corps agressés par des décharges électrostatiques, on a recourt de plus en plus à des appareils permettant de recréer ces décharges le plus fidèlement possible tels que les pistolets à décharges. Une décharge électrostatique se traduit par une impulsion de courant très brève (temps de montée de l'ordre de la nanoseconde), la figure ci-dessous montre la forme d'onde typique d'un tel courant.

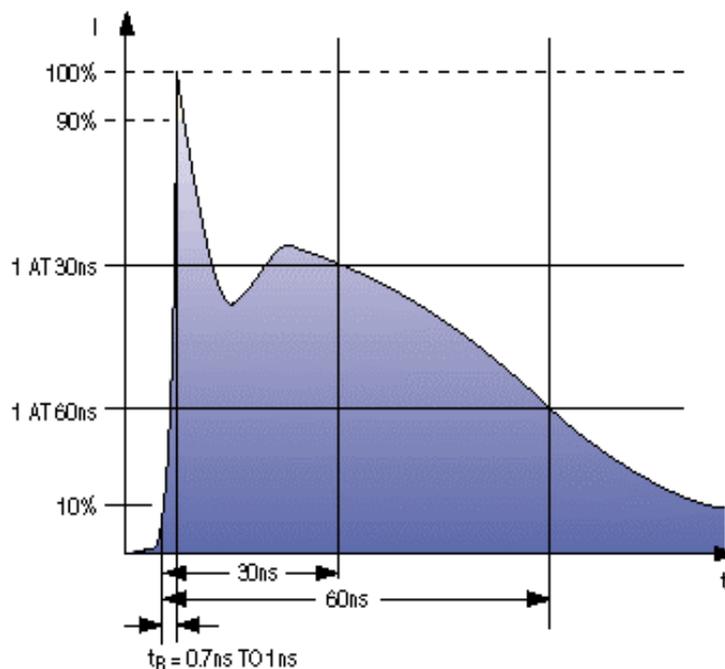


Figure I.6 – Forme d'onde type d'un courant de décharge

Cette forme d'onde est un cas idéalisé. La mesure des courants de décharge reste une expérience très délicate car nous avons affaire à des signaux très rapides et dont les amplitudes peuvent être très élevées. Par ailleurs, les signaux mesurés dans des cas réels montrent des perturbations importantes par rapport au cas idéal, ces perturbations sont dues aux caractéristiques des corps sur lesquels circulent ces courants. Une étude fine de la signature des courants peut, dès lors, donner des informations intéressantes sur la structure des corps étudiés.

#### **b. Décharge couronne et décharge rampante**

La décharge couronne (ou corona) se manifeste dans les zones de fort champ électrique à proximité des surfaces chargées. Elle correspond à une ionisation de l'air proche de la surface sans création d'arc électrique, il se forme un plasma favorisant la décharge de la surface avec le milieu environnant. Cette couronne se forme principalement autour de conducteurs ou électrodes à très faible rayon de courbure (effet de pointe).

Nous avons vu plus haut que l'accumulation de charges électriques sur une surface est limitée par la rigidité de l'air, en effet, on ne peut pas dépasser un certain potentiel (potentiel disruptif de l'air). Cela implique que la densité superficielle de charge est elle aussi limitée, aux alentours de  $2660 \text{ pC/cm}^2$ . Dans le cas d'une surface isolante reposant sur une électrode conductrice (ou une plaque métallique), le champ électrique, au-dessus de la surface chargée, est inférieur à ce qu'il serait si la surface isolante était flottante. Le champ se reporte dans le matériau isolant par la charge induite qui circule dans l'électrode, ainsi le champ dans l'air s'atténue fortement. Tout cela a pour conséquence de repousser le seuil limite de densité surfacique. Ainsi des valeurs très élevées de densité superficielle de charge sont atteintes. La conductivité superficielle devient, elle aussi, très élevée, favorisant l'apparition de décharges, le long de cette surface, appelées décharges rampantes (ou glissantes).

### **I-D Description de quelques solutions de lutte contre l'électricité statique et de méthodes de mesures normalisées**

Face aux nombreux problèmes dus à l'électricité statique, il a été nécessaire de trouver des solutions pour lutter contre cette nuisance. Principalement empiriques ces solutions s'attachent à agir à des niveaux et des paramètres différents du problème électrostatique : empêcher la génération de charge, faciliter l'évacuation des charges accumulées, éviter les décharges électrostatiques... Parallèlement, un besoin en normalisation s'est développé pour proposer des solutions communes de caractérisation des phénomènes électrostatiques qui soient les plus reproductibles possibles.

## 1. Procédés de lutte contre les nuisances électrostatiques

Les moyens de lutter contre l'électricité statique nuisible sont nombreux et variés, on peut cependant s'intéresser aux principaux rencontrés dans l'industrie en général, puis se limiter au cas précis des matériaux textiles.

### a. Dans l'industrie

Pour éviter l'accumulation de charge sur des isolants ou des conducteurs isolés, il existe une méthode à la fois très simple et très efficace qui consiste à augmenter le taux d'humidité de l'air. En effet, une très légère augmentation de l'humidité peut parfois résoudre les problèmes, toutefois, il n'est pas toujours possible de le faire.

On peut également limiter la formation de charges électrostatiques en réduisant les vitesses de friction des produits (réduction de la vitesse de défilement de films plastiques par exemple ou de l'écoulement d'un liquide dans une canalisation).

Pour ce qui est des parties métalliques, il convient de s'arranger pour établir l'écoulement des charges électriques statiques à la terre, ceci suppose qu'elles soient connectées entre elles et à la terre de manière équipotentielle pour éviter la présence de conducteurs isolés qui peuvent être dangereux.

Il existe également des éliminateurs d'électricité statique, basés sur le principe de l'ionisation de l'air ambiant. En effet, en ionisant l'air à proximité de matériaux chargés, les charges à la surface de ce matériau vont se combiner avec les charges de signe opposé de l'air ionisé de sorte que la surface se trouve alors partiellement ou totalement neutralisée. Pour réaliser cette ionisation on utilise deux méthodes différentes : l'ionisation par effet couronne (éliminateur à induction ou à haute tension) et l'ionisation par rayonnement (éliminateur radioactif) [7].

### b. Cas du textile

Dans l'industrie textile, les solutions existantes sont les mêmes que celles énoncées précédemment, seulement, les matériaux textiles sont traités pour éviter les problèmes d'électricité statique lors de leur utilisation.

La première solution est chimique, elle consiste à appliquer une couche antistatique à la surface du matériau, au niveau de la fibre, du fil ou du textile. Typiquement, cet apprêt antistatique est un produit chimique (souvent ionique) qui favorise la fixation des molécules d'eau à la surface des matériaux à risque, de telle manière qu'il se crée une couche « conductrice » permettant l'élimination des charges indésirables. L'inconvénient de ces apprêts est qu'ils sont très souvent temporaires, en effet, ils ont une durée de vie limitée car sujets au vieillissement dû à l'utilisation même de ces textiles (usure, lavages ...).

Une autre solution, elle aussi très répandue, est l'utilisation de textiles avec des parties conductrices. Ces textiles sont surtout destinés à des usages techniques ou de protection des individus et des biens [8]. Le principe reste le même, à savoir : limiter la formation de charges électriques et favoriser leur écoulement le cas échéant. On peut avoir recours à des fils complètement métalliques introduits dans le textile ou bien des fils composés de parties conductrices (surface, corps ...). Leur présence va favoriser l'élimination des charges électriques soit par conduction pour les fils métalliques ou à surface conductrice, soit par induction (ou influence) pour les fils à corps conducteur.

## 2. Aspect normatif

Pour limiter les risques dus à l'électricité statique, il est nécessaire d'établir des normes internationales afin d'évaluer la dangerosité potentielle de certains produits. Actuellement le secteur des vêtements de protection individuelle (protection des individus dans les milieux à risques) est le principal secteur qui développe des normes en ce qui concerne les matières textiles. Le problème principal pour l'établissement de ce genre de norme est de pouvoir mettre au point des méthodes d'essais qui soient reproductibles. Plusieurs paramètres peuvent être déterminés pour caractériser les textiles, souvent ces paramètres sont complémentaires et nécessaires pour l'évaluation du comportement électrostatique global.

### a. Les mesures de résistances

Les mesures de résistances ont été naturellement les premières méthodes d'évaluation des matériaux susceptibles de provoquer des problèmes et où l'électricité statique présente un risque. Elles sont simples et très pratiques à mettre en œuvre, cependant elles sont insuffisantes pour l'évaluation des risques électrostatiques dus aux textiles. Ce sont typiquement des mesures de courant entre deux points où l'on applique une différence de potentiel. On différencie la notion de « résistance » qui est la propriété qu'a un corps à s'opposer au passage du courant (l'unité étant le *ohm*  $\Omega$ ) avec celle de « résistivité » qui est la résistance entre les faces d'un cube de 1m de côté, appelée également résistivité volumique (l'unité étant le  $\Omega m^{-1}$ ). Dans le cas des textiles, les phénomènes de surfaces sont très importants, c'est pourquoi l'on préférera déterminer la résistivité superficielle qui est une mesure de l'opposition au passage du courant à travers une surface de matériau et normalisée par unité de surface. On détermine la résistivité superficielle par une mesure de résistance entre deux électrodes parallèles à la surface d'un échantillon. Lorsque la longueur des électrodes est égale à la distance inter électrodes (configuration d'un carré), la résistivité est alors indépendante des dimensions et est égale à la résistance mesurée. Cette résistivité superficielle a pour unité le  $\Omega$ , mais elle est plus fréquemment exprimée en  $\Omega$  par carré [9].

Les mesures définies dans des normes (IEC 61340-5-1 [10], EN 1149-1 [11], EN 1149-2 [12]...) sont les principales mesures de résistances. Les parties suivantes présentent l'exemple des normes EN 1149-1 (résistivité superficielle) et EN 1149-2 (résistance transversale) appliquées au domaine textile.

**b. La résistivité de surface**

La figure I.7 illustre la méthode de détermination de la résistivité de surface selon la norme textile EN1149-1. Elle est basée sur l'utilisation d'une électrode concentrique.

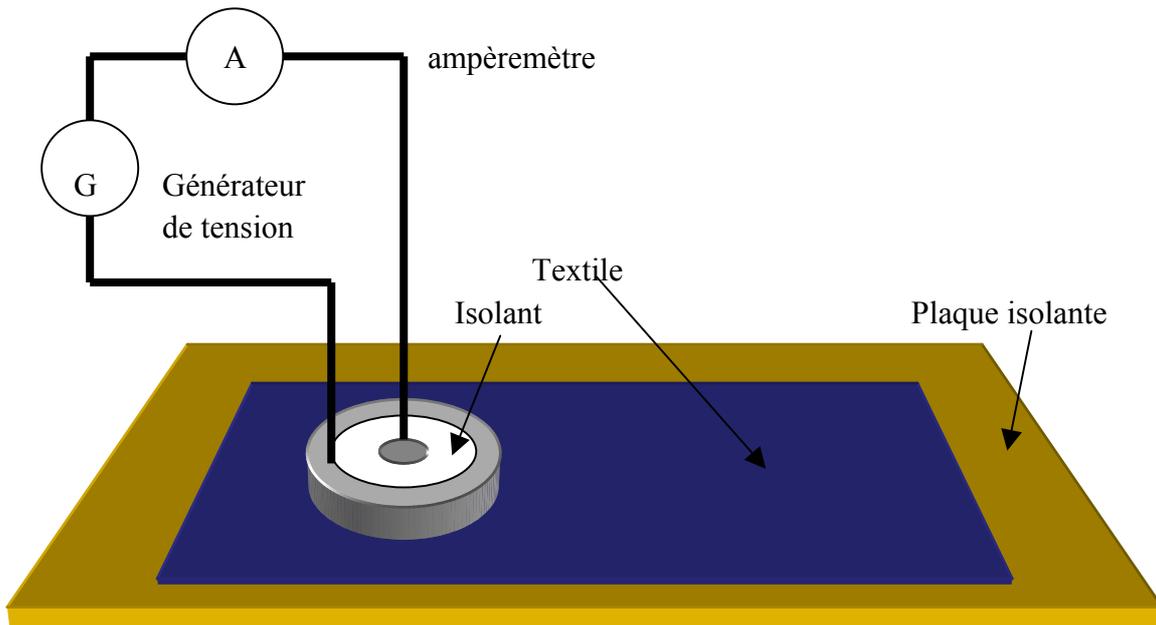


Figure I.7 – Principe de mesure de résistivité superficielle selon la norme EN 1149-1

Il faut garder à l'esprit que la résistivité de surface est très souvent non mesurable dans le cas des matériaux non-conducteurs, cela n'est pas une propriété de base du matériau car la surface en question n'a pas de propriétés de conduction électrique. Dès lors, le flux de courant d'un point à un autre de la surface ne peut pas être décrit par un phénomène de surface uniquement.

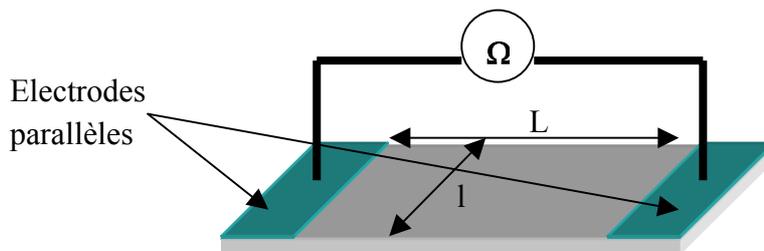


Figure I.8 – Mesure de la résistivité de surface entre deux électrodes parallèles

Pour déterminer la résistivité de surface, il suffit de mesurer la résistance entre deux électrodes parallèles à la surface d'un échantillon, comme le montre la figure I.8. Dans ce cas, la résistivité  $\rho_s$  se déduit de la résistance de surface  $R_s$  mesurée avec l'ohmmètre par la relation I.7 :

$$\rho_s = R_s \frac{l}{L} \quad (I.7)$$

Lorsque l'on a l'égalité  $l=L$ , on se trouve dans la configuration d'un carré, alors  $\rho_s=R$ , la résistivité est alors exprimée en  $\Omega$  par carré et est indépendante des dimensions choisies.

L'utilisation d'électrodes concentriques prescrites par la norme donne lieu à un traitement différent. Pour déterminer une résistance de surface et une résistivité de surface, il nous faut connaître la densité de courant dans l'espace inter électrodes. Dans le cas d'anneaux concentriques la densité de courant  $J$  est donnée par :

$$J = \frac{I_s}{2\pi r e_0} \quad (I.8)$$

où  $I_s$  correspond au courant électrique de surface (on suppose en fait que tout le courant circule dans une fine couche d'épaisseur  $e_0$  à la surface de l'échantillon) et  $r$  le rayon variant de  $h_1$  le rayon de l'électrode centrale à  $h_2$  le rayon interne de l'électrode extérieure (figure I.9).



Figure I.9 – Configuration d'une électrode concentrique

Par application de la loi d'Ohm, nous pouvons déterminer l'intensité du champ électrique  $E$  entre les électrodes :

$$E = \rho J = \frac{\rho I_s}{2\pi r e_0} \quad (I.9)$$

Avec  $\rho$  la résistivité volumique de la fine couche superficielle.

On détermine alors la tension  $U$  entre les deux électrodes en intégrant le champ électrique  $E$  entre  $h_1$  et  $h_2$  :

$$U = \int_{h_1}^{h_2} E dr = \frac{\rho I_S}{2\pi e_0} \int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{r} dr = \frac{\rho I_S}{2\pi e_0} \ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right) \quad (\text{I.10})$$

On en déduit la résistance de surface  $R_S$  :

$$R_S = \frac{U}{I_S} = \frac{\rho}{2\pi e_0} \ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right) \quad (\text{I.11})$$

la résistivité surfacique est alors donnée par :

$$\rho_s = \frac{\rho}{e_0} = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{h_2}{h_1}\right)} R_S \quad (\text{I.12})$$

Le concept de résistivité de surface est très délicat car dans le cas d'un matériau fin, homogène et possédant une conductivité électrique volumique, on peut mesurer apparemment une résistivité de surface mais qui n'est en réalité que la résistivité volumique divisée par l'épaisseur de l'échantillon, comme on peut le voir sur la figure I.10.

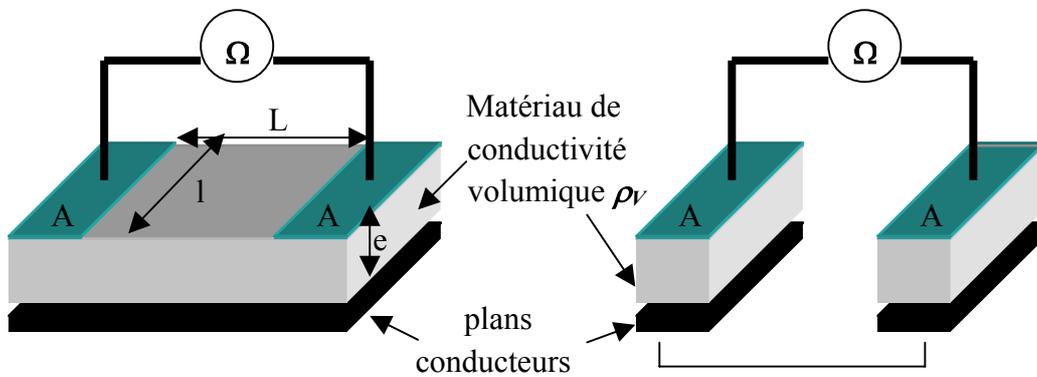


Figure I.10 – Conductivité en présence de plans conducteurs

En effet, dans la représentation de la figure I.10, les deux configurations sont équivalentes si l'on considère que la longueur  $L$  est très grande devant  $e$  et que la résistance des plans conducteurs est beaucoup plus petite que  $\rho_V$ . La valeur de la résistance mesurée  $R$  dépend de la résistivité volumique selon l'expression suivante :

$$R = 2\rho_V \frac{e}{A} \quad (\text{I.13})$$

où  $A$  représente l'aire des électrodes. C'est donc une mesure de la résistivité volumique qui est effectivement réalisée, la résistivité de surface n'est pas une propriété de matériau. En fait, on ne fait que mesurer une résistivité de surface apparente qui dépend de la résistivité volumique et de la géométrie de l'échantillon. D'ailleurs, on peut remarquer que la résistance mesurée ici dépend peu de l'espace inter électrode.

En toute rigueur, dans les cas qui nous intéressent au niveau des matériaux textiles, tout ceci nous montre que nous ne pouvons donc pas considérer de conduction électrique en surface uniquement ; la conduction dans le volume joue un rôle très important. Le type de lignes de courant que l'on obtient est présenté dans la figure I.11 :

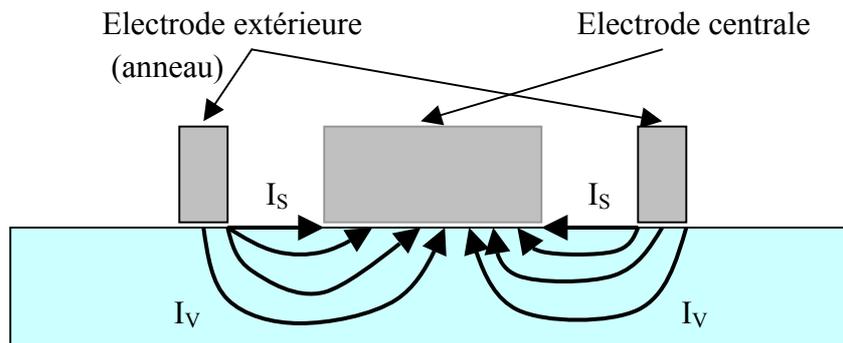


Figure I.11 – Lignes de courant dans un échantillon ne présentant pas de bonne conduction électrique de surface : le courant est composé d'un courant de surface  $I_s$  et d'un courant de volume  $I_v$

Dans le cas de matériaux textiles présentant une grande résistivité volumique et dont la surface est traitée de sorte qu'on lui confère des propriétés de conduction électrique, le concept de résistivité de surface prend alors un sens. Cependant cela est généralement obtenu, en ajoutant au matériau, des parties conductrices (fibres, fils ...) rendant ainsi très souvent la surface non homogène : directions privilégiées de conduction, problèmes de continuité de la conduction électrique dus aux espacements entre les parties conductrices... Dans ces cas de figure l'utilisation de l'électrode concentrique est encore inappropriée.

### c. La résistance transversale

En utilisant la même électrode concentrique et en plaçant l'échantillon de textile entre l'électrode et un plan conducteur on réalise la mesure de la résistance transversale comme indiquée dans la norme EN1149-2 (figure I.12).

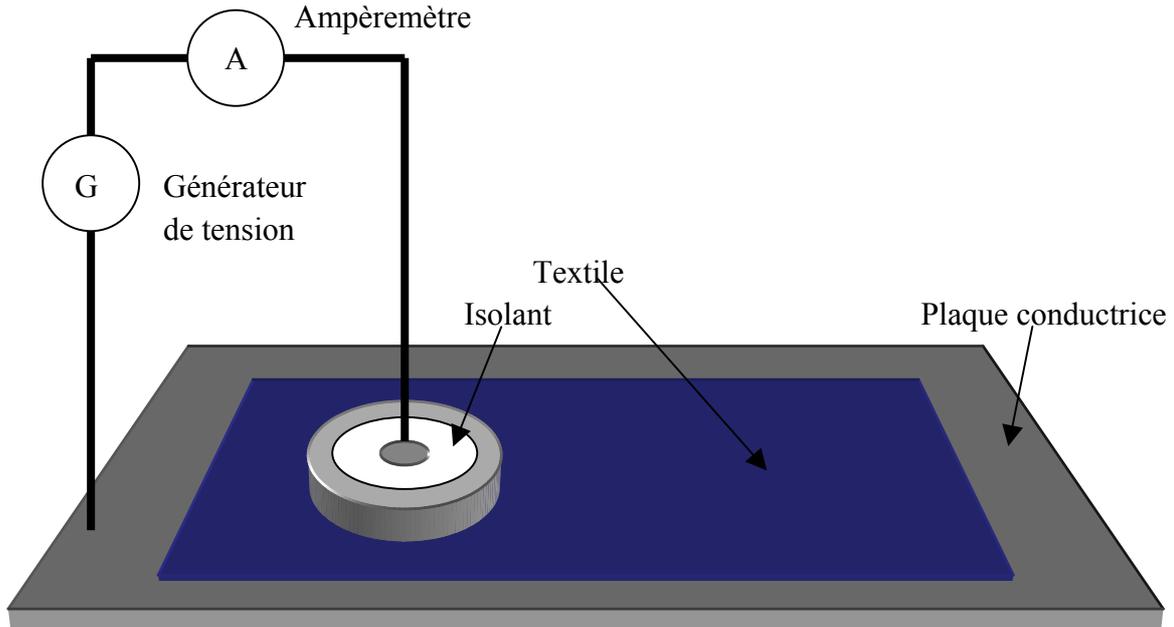


Figure I.12 – Principe de mesure de la résistance transversale selon la norme EN 1149-2

Dans cette méthode on détermine directement la résistance transversale  $R_T$  par le rapport entre la tension  $U$ , appliquée entre le plan conducteur et l'électrode, et le courant  $I_T$  qui traverse l'échantillon et mesuré par l'électrode :

$$R_T = \frac{U}{I_T} \quad (\text{I.14})$$

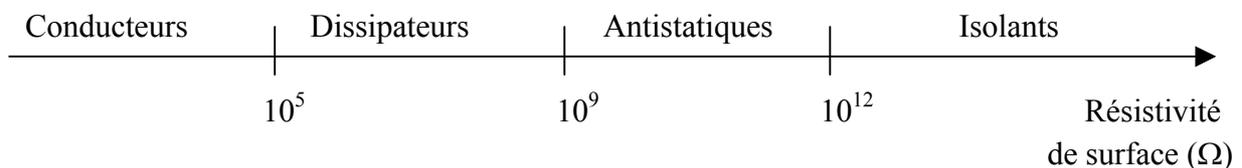
Une fois encore, l'homogénéité de l'échantillon va jouer un rôle important pour créditer les résultats de mesure. En effet, les lignes de courant vont traverser l'échantillon de part en part, cependant, si l'échantillon de textile présente des parties conductrices telles que des fils conducteurs par exemple, les courants emprunteront alors des chemins privilégiés, déterminés par ces parties conductrices. La mesure sera alors une représentation de la résistance de ces matériaux conducteurs et non celle de l'échantillon lui-même.

Les résultats de mesures de résistances dépendent de nombreux facteurs. En effet, les mesures montrent que:

- La résistance dépend du temps, c'est une fonction croissante du temps. En effet, la définition de la résistance telle qu'elle est donnée dans la formule (I.14) est basée sur un courant en régime établi. Or en pratique, lorsqu'on applique une tension à un échantillon isolant, le courant qui en résulte se compose d'un terme transitoire et d'un terme permanent. En toute rigueur la détermination de la résistance doit se faire par ce terme permanent qui correspond au courant de conduction dû au déplacement des charges dans l'épaisseur de l'isolant. Cependant, la composante transitoire continue souvent après des temps extrêmement longs. La

- partie transitoire est due à la polarisation de l'isolant. Dans les normes, il faut donc déterminer un temps après lequel la mesure est prise
- La résistance dépend également de la tension appliquée. En pratique, il est plus commode d'utiliser des tensions élevées pour plus de précision car les courants à mesurer sont très faibles. Or, lorsqu'on applique une tension élevée on se place dans des conditions de champ fort. En champ faible, les isolants suivent encore la loi d'ohm, mais en champ fort ça n'est plus le cas, cela étant dû à l'injection de charges de surface au niveau des électrodes et aux impuretés à l'intérieur du matériau. Par ailleurs, des phénomènes locaux d'ionisation peuvent survenir au niveau de l'interface entre l'électrode et la surface du matériau lorsque le champ est fort. Il faut donc spécifier une tension pour la mesure.
  - La géométrie des électrodes utilisées doit être bien définie, comme nous l'avons vu plus haut pour l'électrode concentrique.
  - Le type de matériau et son état de surface, ainsi que les conditions atmosphériques, dont l'humidité de l'air principalement, sont très influents. Par exemple, une humidité élevée va favoriser l'écoulement des charges électriques en surface, ainsi lors d'une mesure de résistivité superficielle, le courant va se déplacer principalement à travers une fine pellicule en surface composée d'impuretés ionisées et d'humidité.

Ces mesures permettent d'établir des critères pour juger de la qualité électrostatique des matériaux. Un classement simple mais assez représentatif est donné ci-après :



Comme il a déjà été indiqué plus haut, ces mesures ne conviennent pas à tout type de matériau, car en effet, les matériaux à corps conducteur ou les textiles, comportant certaines parties conductrices (grilles de fils métalliques...), ne pourront pas être évalués par ces méthodes. Seuls les textiles « homogènes », isolants ou avec surface traitée (conductrice ou antistatique), peuvent donner des résultats satisfaisants. Les mesures de résistivité permettent de déterminer le chemin le plus rapide emprunté par les charges électriques, alors que ce sont les chemins les plus lents pour la migration des charges qui sont les plus pertinents. Dans ce genre de situation, et pour les autres types de matériaux, la mesure du temps de décroissance de la quantité de charge est plus appropriée.

La percolation est la théorie qui permet d'expliquer la conduction électrique en volume, due aux parties conductrices ajoutées [13]. En effet cette théorie établit le lien entre la variation de la conductivité électrique d'un milieu composite et la fraction volumique de l'élément conducteur introduit. En d'autres termes, lorsque l'on ajoute des parties conductrices au sein d'un isolant, il faut atteindre une certaine teneur pour que l'on puisse

voir apparaître des « chemins de conduction » traversant tout l'isolant. Cette valeur critique de la fraction volumique de l'élément introduit s'appelle le *seuil de percolation*.

En fait, le traitement théorique considère l'introduction d'une distribution aléatoire de petits éléments conducteurs dans une matrice isolante. On peut dire que c'est équivalent à une association de résistances et capacités distribuées plus ou moins aléatoirement. Le modèle montre donc un seuil de taux de concentration de ces éléments au-delà duquel l'isolant devient conducteur. Ainsi dans un milieu continu, la conductivité peut être décrite par une équation de percolation de la forme suivante [14] :

$$\sigma \equiv \left(1 - \frac{v}{v_c}\right)^t \quad (\text{I.15})$$

où :

- $v$  représente la fraction volumique d'éléments conducteurs introduits dans la matrice isolante
- $v_c$  représente la fraction volumique critique (seuil de percolation) où les éléments conducteurs forment un chemin continu à travers l'isolant
- l'exposant  $t$  est un paramètre dépendant notamment des géométries des parties conductrices.

#### d. La mesure du temps de décharge

Le principe de la mesure du temps de décharge d'un échantillon isolant consiste à charger les matériaux et à mesurer la décroissance du champ, du potentiel ou de la densité surfacique de charge au cours du temps. En général, ces types de mesures sont complémentaires aux mesures de résistances, mais leurs pertinences vont dépendre de plusieurs facteurs :

- des propriétés intrinsèques du matériau
- du mode de charge et du niveau de charge initial
- de la connexion à la terre
- des conditions atmosphériques

La courbe de décroissance obtenue diffère d'une exponentielle, et peut être très complexe pour des matériaux hétérogènes, c'est pourquoi il est nécessaire de déterminer le temps de demi-décharge, temps au bout duquel le champ mesuré a atteint la moitié de sa valeur initiale. Plusieurs méthodes ont été développées, le plus souvent pour mesurer le temps de demi-décharge, elles diffèrent les unes des autres principalement par le mode de charge qui a été choisi :

- charge par effet triboélectrique
- charge par influence
- charge par effet couronne
- charge par contact

Ces différentes méthodes peuvent donner des résultats souvent très différents, il n'y a, à l'heure actuelle, aucune méthode qui semble plus appropriée qu'une autre. Le fait que la méthode d'essai puisse reproduire les phénomènes de charge tels qu'ils se manifestent concrètement, comme pour les frottements par exemple, devient un critère de choix. Les exemples suivants montrent les dispositifs développés, dans cette optique, dans la norme européenne EN 1149-3 [15].

Le dispositif suivant (figure I.13) utilisé pour charger les échantillons de tissus est inspiré de la méthode n°1 de la norme EN 1149-3. Les frotteurs utilisés sont de deux types : l'un en aluminium, l'autre en polyéthylène traité antistatique (le polyéthylène doit être traité afin d'éviter une trop forte accumulation de charges à sa surface qui pourrait perturber les mesures de champ à la surface de l'échantillon, en effet la proximité d'un corps fortement chargé masquerait la mesure du champ électrique à la surface du textile). Les bandes de tissu font 5 cm de large sur 30 cm de long. Elles sont situées à 5 cm de l'objectif du champmètre. Un poids (de 138g) à leur base permet de les maintenir tendues pendant le frottement.

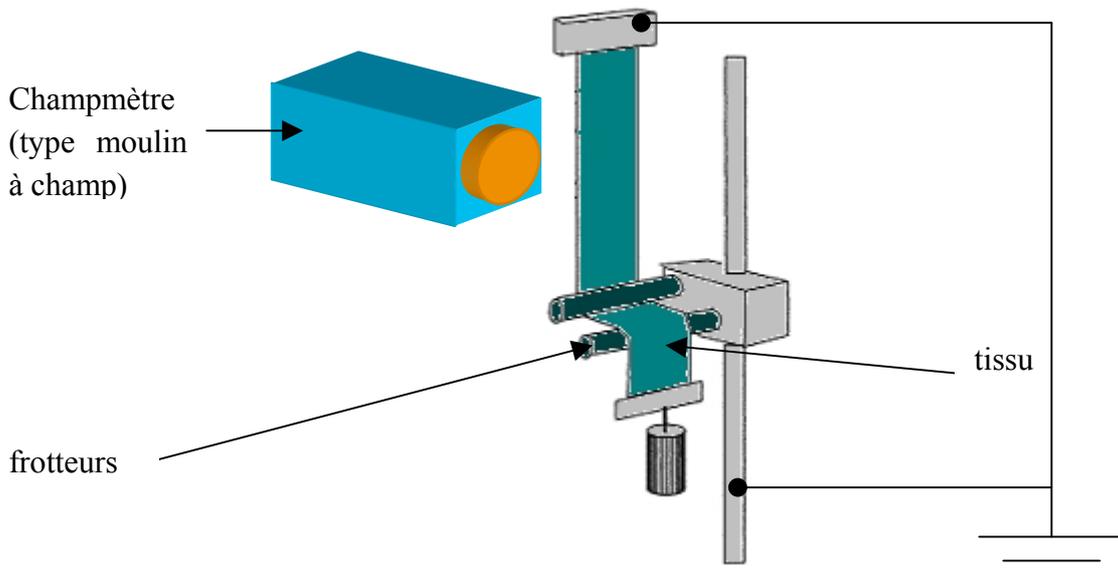
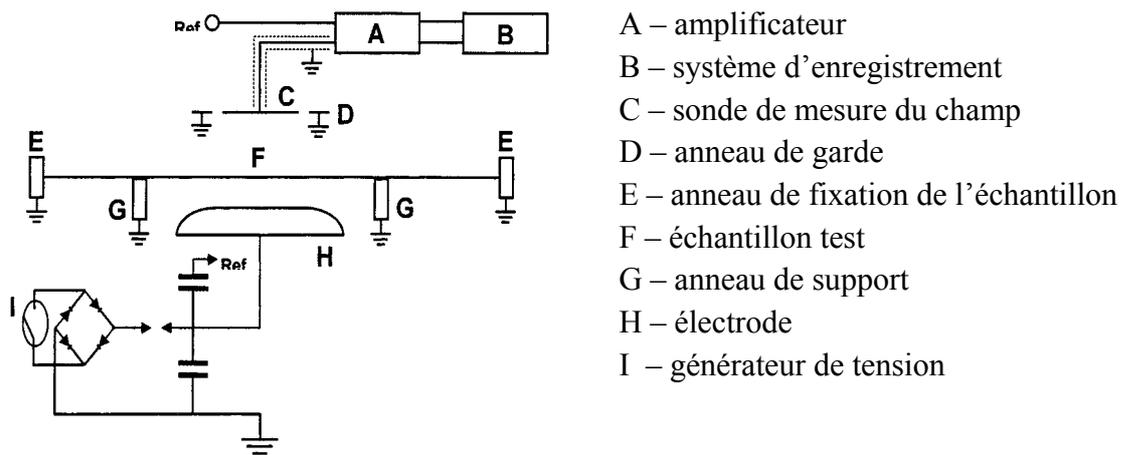


Figure I.13 – Schéma de principe de la méthode n°1 de la norme EN 1149-3

L'amplitude du champ électrique généré par le frottement est mesurée à l'aide du moulin à champ électrostatique relié à un enregistreur graphique. Les mesures faites dans différents laboratoires avec cette méthode semblent montrer une bonne répétitivité et une bonne corrélation des résultats. Cette méthode est très intéressante car elle permet de simuler au mieux le cas réel d'un frottement. L'utilisation d'un mesureur de champ électrostatique limite cependant l'observation des phénomènes rapides d'une durée inférieure à 100 ms.

La seconde méthode du projet de norme EN 1149-3 est une méthode de mesure du temps de décharge basée sur la charge par influence. Le schéma ci-dessous montre le dispositif correspondant :



- A – amplificateur
- B – système d'enregistrement
- C – sonde de mesure du champ
- D – anneau de garde
- E – anneau de fixation de l'échantillon
- F – échantillon test
- G – anneau de support
- H – électrode
- I – générateur de tension

Figure I.14 – Schéma du dispositif de mesure de temps de décharge d'un textile chargé par induction (méthode n°2 de la norme EN 1149-3)

L'échantillon est chargé par induction à l'aide d'une électrode installée en dessous de celui-ci. Cette électrode est portée à un potentiel électrique élevé, si le textile contient des parties conductrices il se crée alors des charges induites de polarité opposée à celle de l'électrode. Une sonde de champ placée au-dessus de l'échantillon permet de mesurer l'évolution du champ électrique. Tout au long du test, l'électrode reste portée à un potentiel électrique élevé, les charges induites sur l'échantillon vont donc continuer à se développer de sorte que le champ électrique mesuré par la sonde de l'autre côté de l'échantillon va décroître par effet de blindage. On détermine alors le temps nécessaire pour que le champ électrique mesuré atteigne une valeur égale à la moitié du champ électrique maximum initial : c'est le temps de demi-décharge. Cette méthode permet donc d'évaluer également l'effet d'écran du textile relié à la terre : le textile présente alors certaines propriétés de blindage contre le champ électrique. Contrairement à l'effet couronne, cette méthode se prête bien à la caractérisation des textiles contenant des fils conducteurs ou des parties conductrices. Les tests faits dans différents laboratoires présentent une bonne corrélation entre eux. Le problème de cette méthode est qu'elle ne semble pas représenter le comportement électrostatique d'un textile chargé par effet triboélectrique, les mesures, obtenues avec les deux méthodes précédentes, ne permettent pas d'établir de correspondances.

Le principe de charge par effet couronne est également exploité pour mesurer le temps de décharge des matériaux. Il existe plusieurs appareils différents sur le marché qui permettent de faire ce genre de mesures.

Un de ces dispositifs a été mis au point par John Chubb Instrumentation [16] le JCI155 Charge Decay Meter, qui permet de mesurer le temps de décharge d'un matériau chargé par effet couronne. On applique donc un potentiel électrique élevé au niveau des pointes du dispositif (l'effet de pointe est exploité pour atteindre un champ électrique intense sans que le

potentiel appliqué soit trop élevé) qui va causer l'ionisation de l'air environnant. Si ces pointes sont chargées positivement, elles vont attirer les ions négatifs créés lors de l'ionisation et repousser les ions positifs. Ainsi on retrouvera sur l'échantillon des charges du même signe que celles des pointes du dispositif. Le textile, une fois chargé, sera étudié en prenant en compte deux paramètres complémentaires. En effet, les problèmes liés à l'électrostatique sont dus à des potentiels électriques trop élevés à la surface des matériaux. Si l'on exprime la valeur du potentiel par la formule bien connue :

$$V = \frac{Q}{C} \quad (\text{I.16})$$

On s'aperçoit que deux facteurs entrent en jeu pour la création de ce potentiel :

- une charge  $Q$  trop élevée
- une capacité  $C$  trop faible

La charge trop élevée découle directement du problème de temps de décharge de l'échantillon. En effet, si le temps de décharge est plus grand comparé au temps de charge par frottement, l'accumulation de charge devient suffisante pour atteindre des niveaux très importants et donc un potentiel  $V$  également très important. Le dispositif permet de connaître l'information concernant le temps de décharge de l'échantillon. Concernant l'autre facteur, le potentiel électrique sera élevé si la capacité est petite, J.Chubb [16] propose un moyen pour déterminer cette capacité avec ce dispositif de test et ainsi de connaître toutes les caractéristiques importantes de l'échantillon : il nomme cette grandeur « capacitance loading » qu'on peut traduire par « capacité de charge ».

Le principe consiste à déterminer la charge totale  $Q_{tot}$  portée par l'échantillon sous test, chargé par effet couronne. Cette charge totale est déterminée par deux moyens, en mesurant le champ électrique à l'aide d'un moulin à champ et en mesurant également la quantité de charge qui s'évacue par les contacts métalliques des supports de l'échantillon. On effectue ces mesures pour l'échantillon sous test mais également pour un échantillon de référence : typiquement un film très fin d'un bon diélectrique, comme par exemple, les films plastique alimentaires de type cellophane. En fait, un film diélectrique avec un temps de décharge suffisamment court pour que l'on puisse appliquer un faible potentiel de surface en un temps raisonnable.

On détermine ainsi la capacité apparente du diélectrique :

$$C^* = \frac{Q_{tot}^*}{V_{pk}^*} \quad (\text{I.17})$$

où  $V_{pk}^*$  est le potentiel de surface maximum initial mesuré et  $Q_{tot}^*$  la charge totale du diélectrique, ainsi que la capacité apparente de l'échantillon :

$$C = \frac{Q_{tot}}{V_{pk}} \quad (\text{I.18})$$

Une fois ces deux capacités déterminées on peut calculer la « capacité de charge » :

$$C_L = \frac{C}{C^*} \quad (\text{I.19})$$

On ne fait qu'une détermination de  $C^*$  pour toutes les mesures tant que le dispositif et le mode expérimental reste inchangé.

Cette valeur de « capacité de charge » permet de caractériser de manière plus précise l'échantillon. Plusieurs essais ont été menés pour mettre en évidence le lien entre cette valeur et les différents comportements vis-à-vis de la charge de matériaux [16].

Il existe donc plusieurs moyens de charger un textile et de mesurer la décharge de celui-ci. La difficulté reste entière lorsqu'il s'agit de faire des comparaisons entre ces différentes méthodes. D'une part il est difficile de retrouver les mêmes niveaux de charge et ensuite la décharge va également dépendre du mode de charge de l'échantillon. Néanmoins plusieurs études comparatives ont été menées pour tenter de comparer les comportements des textiles chargés par ces différentes méthodes [17,18].

#### e. Usage d'autres paramètres électriques

Différents autres paramètres peuvent s'avérer pertinents pour comprendre le comportement électrostatique des textiles. L'un de ces paramètres a déjà été abordé : il s'agit de la capacité de charge, seul le dispositif de J. Chubb permet de l'évaluer. Les autres paramètres sont la « chargeabilité » des textiles (l'aptitude à la charge) et l'effet de blindage.

L'évaluation de l'aptitude à la charge est un critère crucial de caractérisation des textiles. En effet, la mesure du temps de décharge peut donner des résultats satisfaisants pour certains matériaux, ceci auront donc tendance à évacuer rapidement les charges électriques. Cependant, l'information concernant le niveau initial auquel se charge le matériau reste importante pour pouvoir évaluer si le seuil à risque n'est pas dépassé, car même si la charge ne reste pas longtemps sur le matériau, elle le reste peut être suffisamment pour représenter un danger. La plupart des méthodes développées pour mesurer le temps de décharge permettent d'apprécier un niveau de charge initial (Méthode par induction, par effet couronne ...), mais seule la méthode par frottement donne une information proche des conditions réelles. C'est pourquoi, en terme d'estimation de la « chargeabilité », la méthode 1 de la norme EN 1149-3 reste la plus appropriée. Toute autre méthode basée sur la charge par effet triboélectrique serait efficace en l'occurrence.

En ce qui concerne l'effet de blindage, celui-ci peut être évalué de manière précise avec la méthode par induction (EN 1149-3), dans le cas de matériaux présentant des parties conductrices. En fait, les domaines concernés sont surtout ceux des vêtements de protection pour l'industrie électronique, où les textiles comportant des parties conductrices, réalisant ainsi des écrans plus ou moins efficaces contre les champs électromagnétiques.

### f. Autres alternatives de tests électrostatiques

La tendance actuelle est à la réalisation de tests sur les produits finis et non pas uniquement sur les matériaux textiles à l'état d'échantillons. En effet, les tests sur échantillons sont nécessaires pour sélectionner les matériaux propices aux charges électriques, mais cependant, mêmes si les tests sur échantillons s'avèrent bons, cela ne veut pas dire pour autant qu'une fois le produit fini réalisé, à partir de ces matériaux, il soit satisfaisant du point de vue électrostatique. Par exemple, les vêtements de protection individuelle pour les zones à risques ou les combinaisons destinées à l'industrie de l'électronique sont réalisés à partir de textiles testés selon ces méthodes, mais le vêtement en lui-même, porté, peut offrir un comportement spécifique vis-à-vis des charges électriques. Les coutures, les fermetures éclairées sont autant de parties incertaines, où l'écoulement des charges électriques ou leur formation ne sont pas connus. Les méthodes qui se développent sont basées sur les mêmes principes que les méthodes pour échantillons : mesures de résistivités, de temps de décharge, de « chargeabilité »... Les moyens de charges sont eux aussi les mêmes : frottement, effet couronne, induction ... Ces méthodes ne sont qu'aux stades préliminaires de leur développement, beaucoup d'efforts dans ce domaine restent à faire.

Un autre moyen d'évaluer l'effet de l'électricité statique engendré sur le corps humain est celui du « test du marcheur ». Cette méthode d'essai a été établie pour les revêtements de sol, dans le but d'évaluer à quel niveau se charge le corps humain lorsqu'il se déplace dessus (NF EN 1815 [19], ISO 6356 [20]). Le principe est simple : un opérateur se déplace sur le revêtement de sol à tester, chaussé de sandales aux semelles composées d'un matériau standardisé, en tenant une électrode métallique à la main. Cette électrode est reliée à un électromètre qui enregistre la croissance du potentiel électrique de l'opérateur lorsque celui-ci se déplace sur le revêtement de sol (figure I.15).

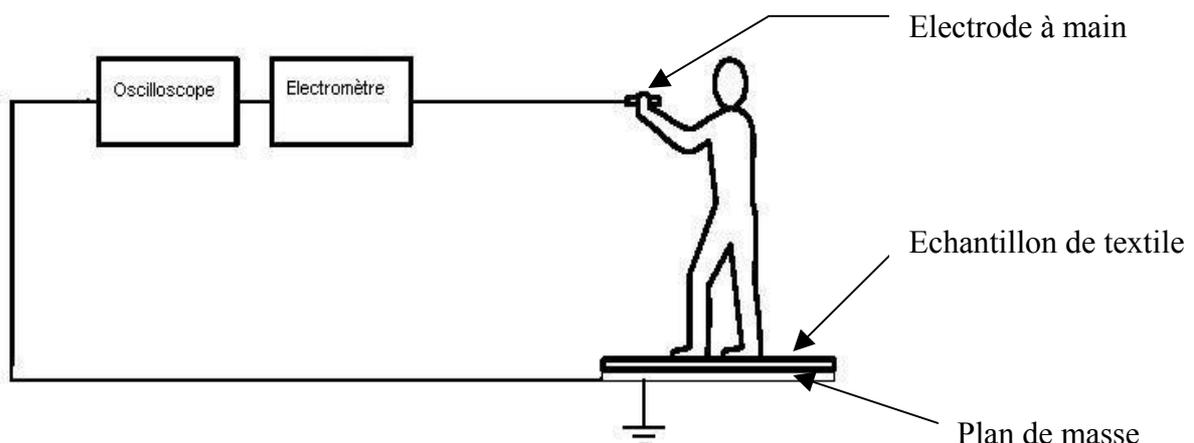


Figure I.15 – Schéma de principe du « test du marcheur »

En fait, lorsque l'opérateur se déplace sur la moquette, les frottements et séparations entre les semelles et la moquette vont générer des charges électriques sur ces matériaux isolants. Ensuite, des charges électriques images sont produites par influence dans le corps de l'opérateur qui est conducteur. Le corps étant isolé l'accumulation de ces charges électriques aura pour conséquence la croissance du potentiel électrique du corps de l'opérateur.

Pour un souci de reproductibilité il est nécessaire de se déplacer toujours de la même manière, à savoir une marche à cadence régulière de deux pas à la seconde, le corps toujours orienté dans la même direction en avançant puis en reculant. Toujours pour ce souci de reproductibilité, les conditions atmosphériques doivent être contrôlées et maintenues à 23°C (+/- 2°C) et 25% d'humidité (+/- 5%), les échantillons à tester devant être conditionnés ainsi pendant aux moins 7 jours. Il est également indispensable d'utiliser des sandales normalisées, celle-ci devant être nettoyées à l'éthanol avant chaque test pour éviter l'accumulation d'impuretés à leur surface.

L'électrode utilisée, reliée à un électromètre pour mesurer la montée en potentiel du corps, est en fait un diviseur de tension capacitif, dont le schéma électrique est illustré sur la figure I.16. La tension mesurée sur l'électromètre  $V'$  (ou voltmètre statique) permet de déduire la tension réelle mesurée au niveau de l'électrode  $V$  par la relation I.20 :

$$V' = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V \quad (I.20)$$

avec  $C_1$  de l'ordre de 10pF et  $C_2 \gg C_1$ .

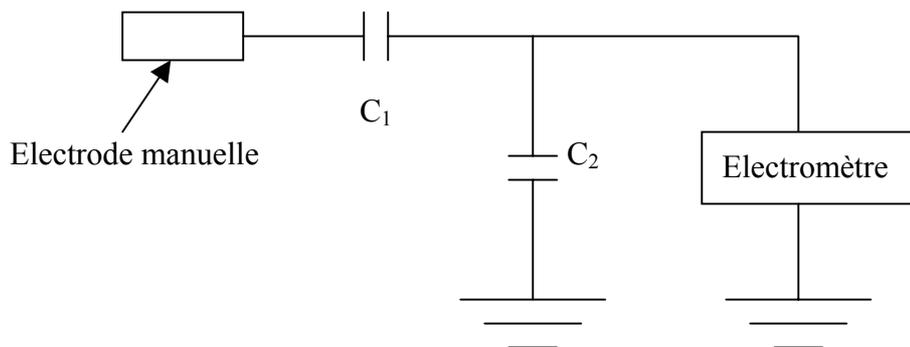


Figure I.16 – Schéma électrique du diviseur capacitif équivalent à l'électrode à main

Cette mesure de potentiel donne lieu à un diagramme sur l'enregistreur sur lequel il convient d'établir l'estimation moyenne du potentiel atteint par le corps humain. Selon la norme EN1815, cette valeur doit rester inférieure à 2 kV pour que l'échantillon réussisse le test.

Cette norme prévoit également l'évaluation de la propension à l'accumulation de charges *in situ*, au sein même des zones d'utilisation des revêtements de sol, et c'est pour cela qu'elle nous a servie de référence à l'évaluation de moquettes pour la société EADS SOGERMA SERVICES.

### Illustration de tests pratiqués pour le domaine aéronautique

Nous allons voir ici un exemple concret de l'application du « test du marcheur » pour des essais *in situ*. Ces essais ont été menés à bord d'un airbus A330 pour la société SOGERMA.

L'avion concerné est un appareil modifié dans le cadre d'un projet nommé « projet VIP ». Cet avion de ligne a donc subi des modifications pour le transformer en avion hôtel (figure I.18 et I.20). Les moquettes utilisées dans cet appareil sont constituées par une laine d'épaisseur 15 mm et posées sur un matériau isolant de 15 mm d'épaisseur également (figure I.17). Il s'est avéré qu'en phase de vol, les personnes se déplaçant sur ces moquettes subissaient parfois des décharges électriques lors du contact fortuit avec des parties conductrices.

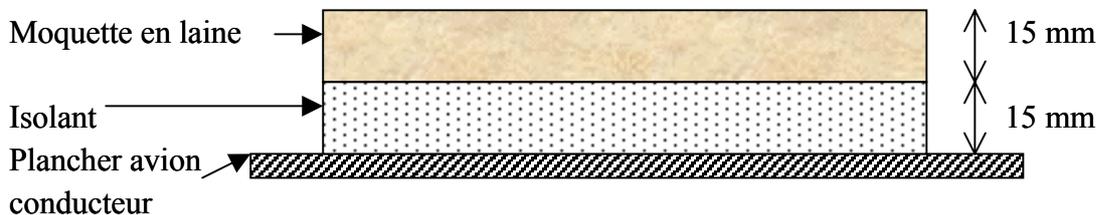


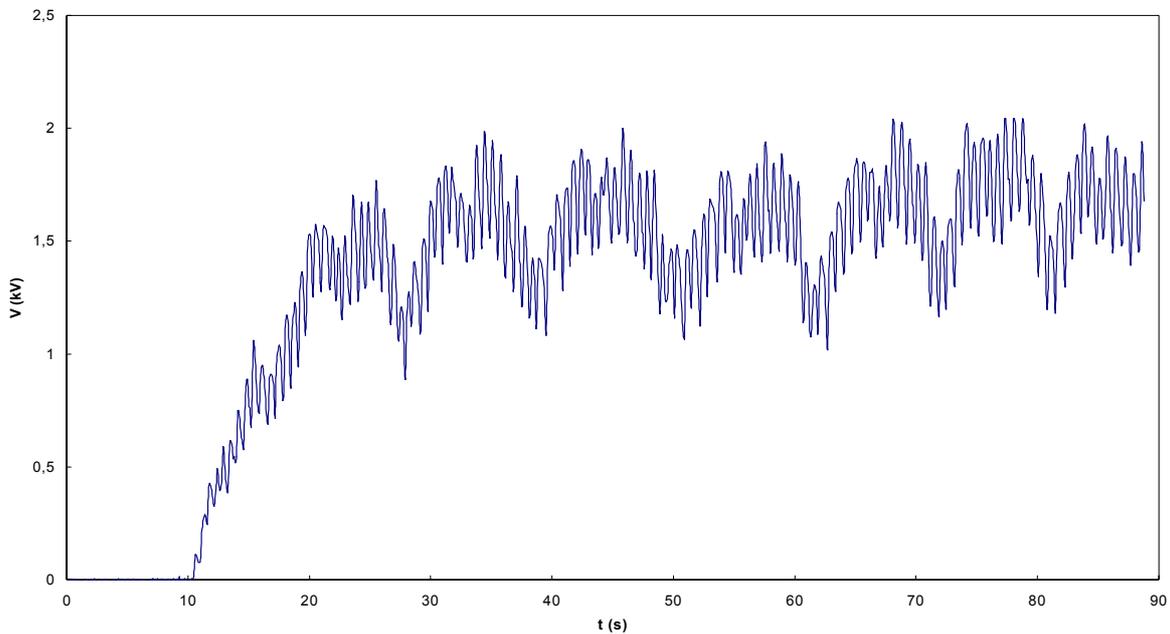
Figure I.17 – Schéma de la disposition des moquettes dans l'avion

Le fait d'avoir une épaisseur d'isolation de 3 cm entre la surface de la moquette et le plancher avion a pour conséquence de favoriser les phénomènes de création de charges électriques surtout dans les conditions de très faible hygrométrie qui peuvent survenir au cours du vol.



Figure I.18 – Photo de la chambre à coucher de l'avion où les tests dits « du marcheur » ont été menés

Les résultats de test sont présentés ci-dessous. Plusieurs essais à différents endroits de la chambre ont donné des résultats similaires au suivant (figure I.19).



*Figure I.19 – Potentiel relevé dans la chambre à coucher avec les sandales en caoutchouc*

On peut observer ici la montée en potentiel de l'opérateur qui tient l'électrode en se déplaçant sur la moquette. Le tracé est irrégulier ; les pics correspondent aux pas effectués par l'opérateur : à chaque nouveau pas, au moment de la séparation du pied avec la moquette, un pic apparaît. Par ailleurs, l'aspect ondulé de la courbe semble dû à l'aller-retour de l'opérateur.

D'après les niveaux atteints, cette partie de la moquette ne semble pas poser de problèmes, on reste en dessous de la valeur de 2 kV pendant toute la durée du test. Selon le texte de la norme, la valeur de potentiel à retenir est la moyenne des 5 vallées les plus hautes : ici la moyenne est située vers **1,5 kV**. Ces résultats ont été obtenus dans des conditions atmosphériques très sèches avec un taux d'hygrométrie de seulement **4,8 %** et une température de **23 °C**. Cela donne un ordre de grandeur des valeurs d'hygrométrie que l'on peut atteindre dans l'avion pendant la phase de vol.

zone  
de  
test



Figure I.20 – Photo du salon principal de l'avion (vue vers l'avant)

La photo de la figure I.20 montre la disposition du salon principal de l'avion. La zone de test indiquée correspond au corridor menant au salon. L'un des résultats obtenu dans cette zone est présenté sur la courbe de la figure I.21.

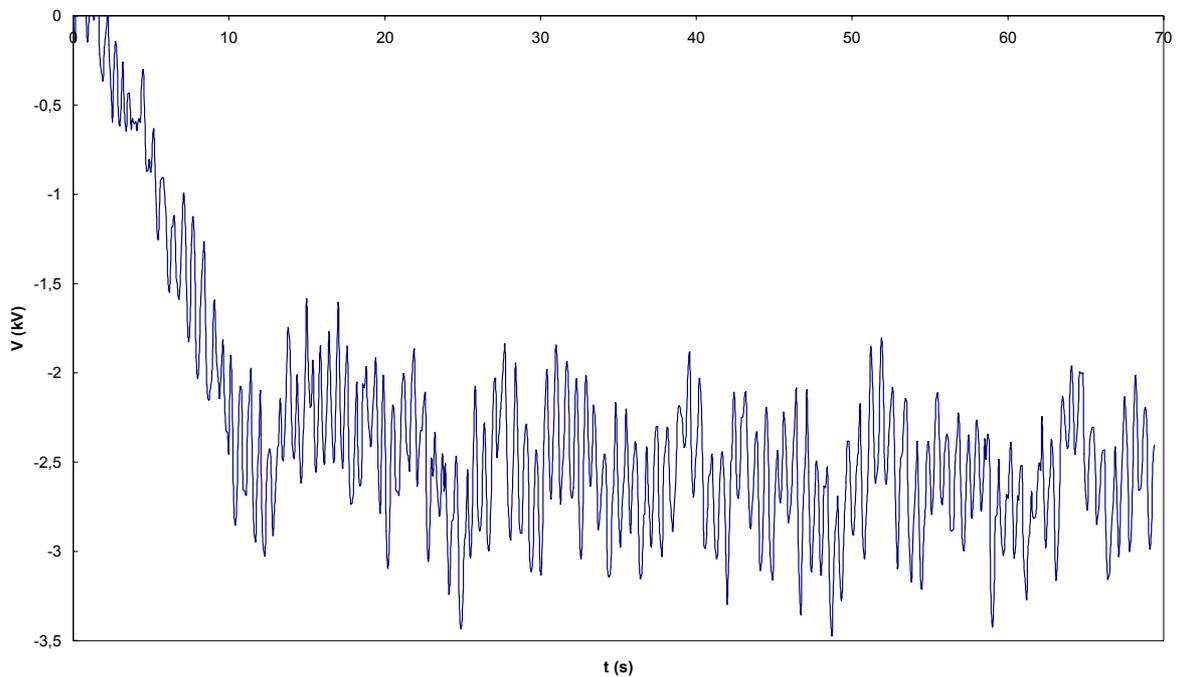


Figure I.21 – Potentiel relevé dans le corridor à l'entrée du salon principal avec les sandales en caoutchouc

Contrairement à l'essai précédent, le potentiel acquis par l'opérateur a une polarité négative. On pourrait attribuer cela à la nature de la moquette, cependant celle-ci est identique à celle de la chambre, endroit où l'on mesure un potentiel positif (figure I.19). En fait, parmi tous les tests réalisés dans l'avion, les seuls qui donnent un potentiel négatif sont ceux réalisés dans des endroits très exigus où l'opérateur se trouve à proximité des parois de l'avion comme les toilettes ou ici le corridor. Il semble donc que dans ces cas de figure, il y ait une interaction entre l'opérateur et les parois de l'avion, très probablement par influence. La mesure montre cependant un potentiel plutôt élevé, bien supérieur à 2 kV. D'après le relevé de la moyenne on atteint un potentiel de **-2,8 kV** dans une atmosphère de 4% d'humidité et une température de 20°C environ. Cet endroit ne satisfait donc pas aux exigences de la norme.

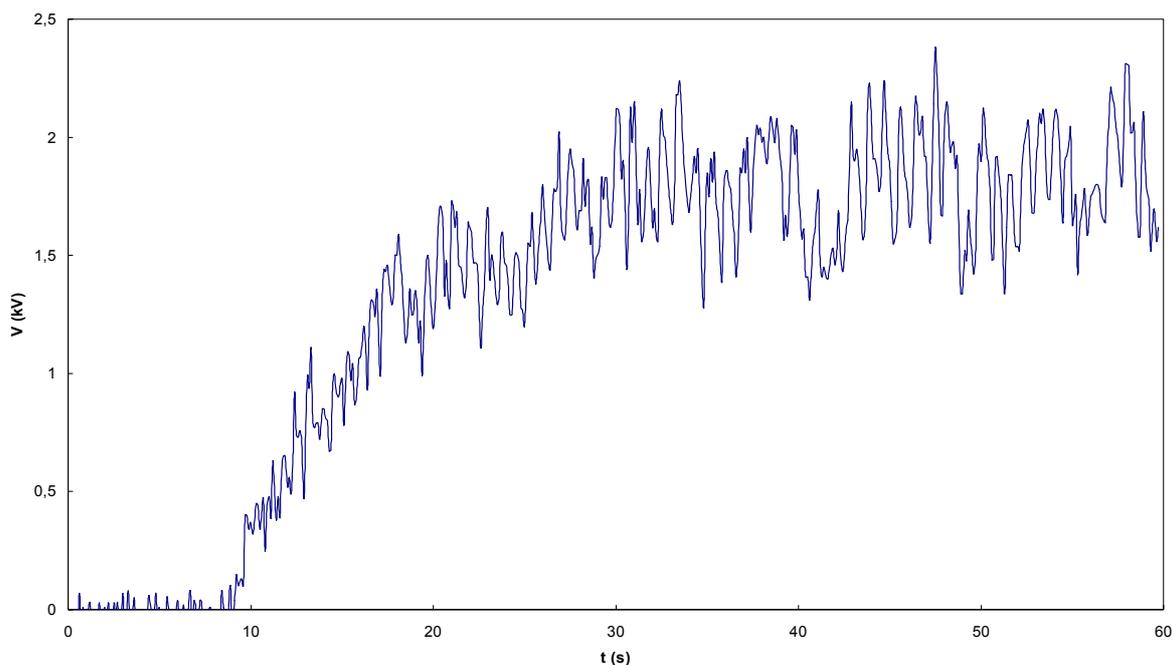
La seconde zone donnant des résultats suggérant que des problèmes puissent subvenir est présentée sur la photo de la figure I.22.



Figure I.22 – Photo du salon principal de l'avion (vue vers l'arrière)

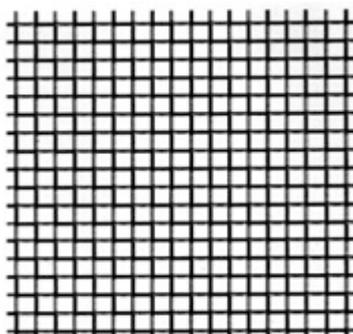
En effet les résultats obtenus pour cette zone montrent des valeurs de potentiel supérieures à 2kV. Selon la norme EN1815, cette partie de l'avion ne satisfait pas non plus aux exigences (figure I.23). Le potentiel atteint est de **2 kV** pour des conditions atmosphériques identiques au précédent test : la zone est donc à risque.

La source principale identifiée de génération de charges électriques dans ce phénomène est le frottement entre les semelles et le revêtement de sol. Cependant, il se peut également que la génération de charges due aux frottements de l'air puisse jouer un rôle important. En effet, l'air très sec, va par convection principalement, créer des charges électrostatiques par frottement sur les textiles des vêtements portés par l'opérateur. Il se peut également que ces mêmes frottements d'air génèrent des charges sur les parois internes de l'avion recouvertes par des éléments textiles et provoqueraient par influence une polarité négative du potentiel de l'opérateur tel qu'il est présenté sur la figure I.21.



*Figure I.23 – Potentiel relevé dans le salon principal (en zone de test de la figure I.22) avec les sandales en PVC*

Pour pouvoir limiter les effets électrostatiques indésirables, il a été recommandé d'apporter des modifications à la configuration du revêtement de sol. La solution retenue par EADS Sogerma Services est d'installer un treillis métallique sous la moquette : entre la moquette et l'isolant (figure I.24).



*Figure I.24 – Exemple de treillis métallique utilisable pour modifier la configuration des revêtements de sol*

Le treillis métallique est raccordé au plancher conducteur de l'avion à certains endroits par des tresses métalliques (figure I.25), assurant un bon contact électrique à la masse.

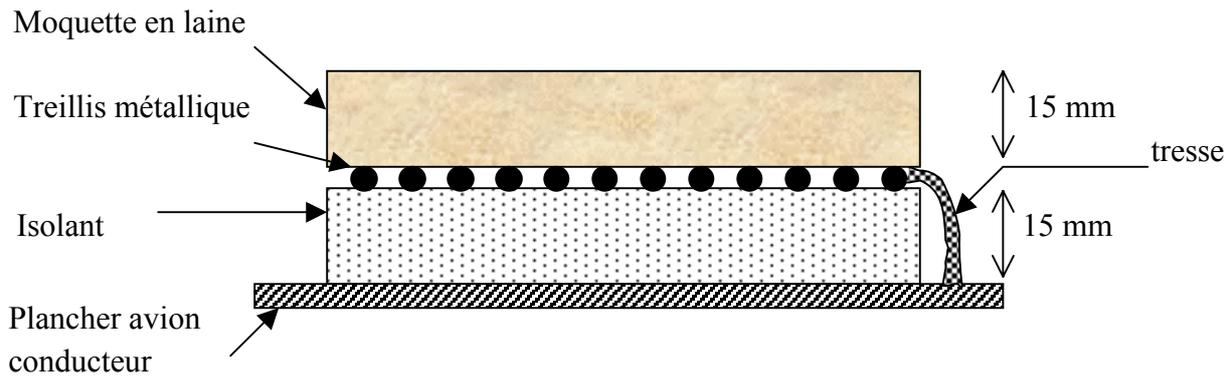


Figure I.25 – Schéma de la disposition des treillis et tresses métalliques au niveau des revêtements de sol de l'avion

Voilà donc l'exemple concret d'un problème dû à la nature du textile employé pour le revêtement de sol. Cependant il serait intéressant d'essayer de déterminer dans quelle mesure l'effet triboélectrique dû à la convection d'air joue sur le phénomène global de charge. Quoiqu'il en soit, il est nécessaire de faire ici un rappel sur quelques notions textiles afin de bien comprendre la nature et la structure des matériaux auxquels on sera confronté tout au long de ce travail.

## I-E Notions sur les matériaux textiles et description des échantillons expérimentés

### 1. Rappels sur le textile

#### a. Les matières textiles

Les origines des matières utilisées dans les textiles sont très diverses, on distingue les matières naturelles et les matières chimiques.

Le schéma suivant (figure I.26) montre comment on peut classer ces différentes matières textiles [21]:

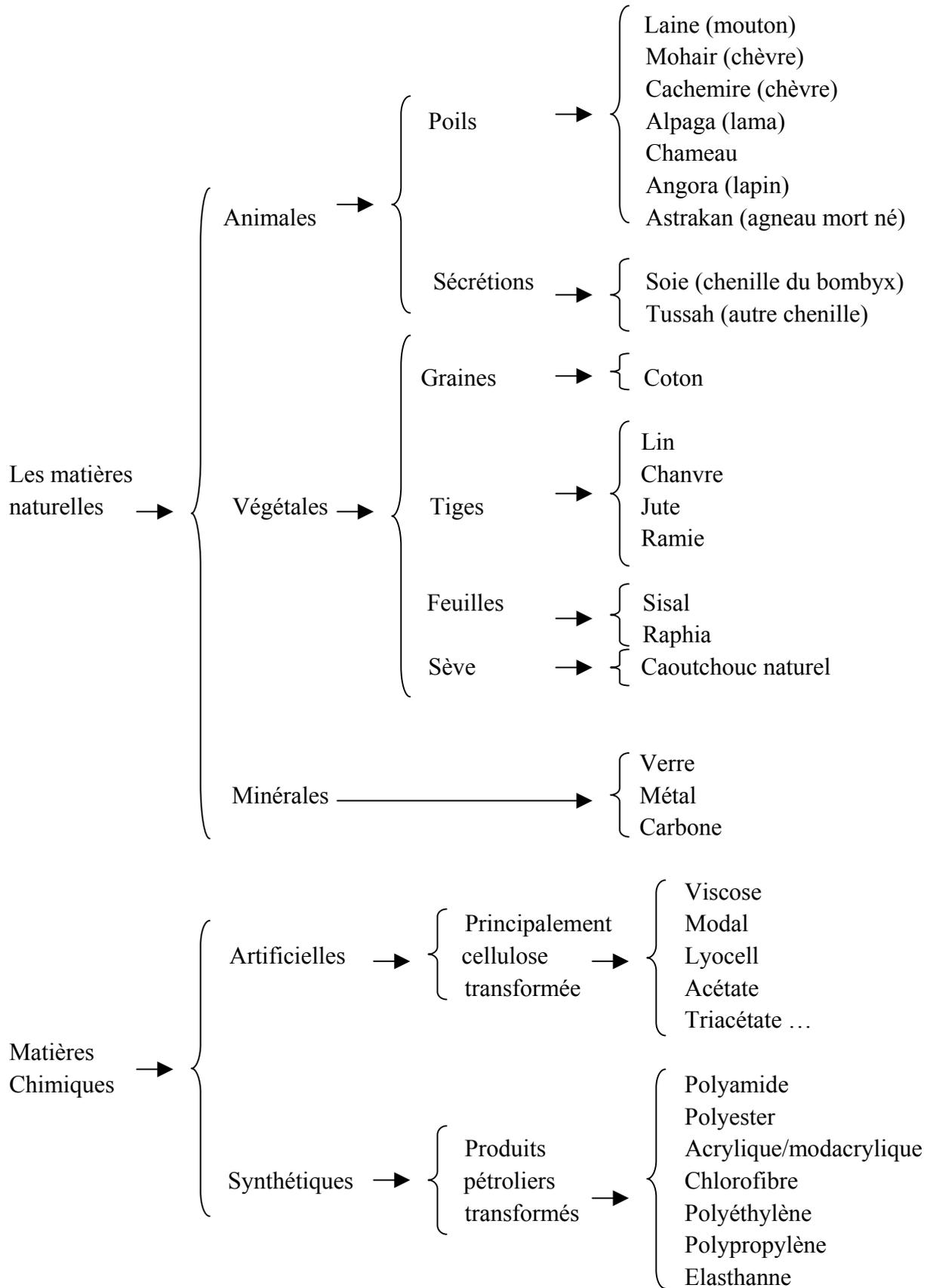


Figure I.26 – Classification schématique des différentes matières textiles

## b. La filature

La filature est l'étape qui permet de transformer les matières premières textiles en fils utilisables par les fabricants d'articles textiles.

On distingue deux types de fils:

- le **filé** qui est composé de fibres maintenues le plus souvent par torsion, les fibres ayant des dimensions allant de quelques millimètres à quelques dizaines de centimètres.
- le **fil** qui est constitué par la torsion entre eux de filaments continus de grande longueur (soie ou filaments chimiques).

Par ailleurs les procédés de filature sont au nombre de trois, suivant le type de fibres :

- la filature laine (ou filature fibres longues)
- la filature coton (ou filature fibres courtes)
- la filature lin (ou filature fibres libériennes)

Dans les cas des filatures fibres courtes et fibres longues les principes de filature utilisés sont identiques, seule la technologie est différente, adaptée dans chaque cas à la longueur des fibres. La filature de type lin est adaptée aux caractéristiques de cette fibre, notamment la longueur des éléments fibreux (environs 1m) et la difficulté de travailler cette matière.

Quoiqu'il en soit le produit obtenu à la fin d'un procédé de filature est une bobine de fil. Les fils obtenus peuvent être caractérisés par plusieurs paramètres :

- le type de filature
- le titre (masse linéique)
- la torsion du fil
- ses caractéristiques dynamométriques
- sa régularité...

Le titrage d'un fil indique sa « grosseur », il établit le rapport qui existe entre le poids et la longueur de ce fil (différentes unités existent : le numéro métrique, le tex (unité internationale), le denier...). La torsion est également une caractéristique du fil, elle est définie par son sens (figure I.27) et son intensité, elle peut en effet être donnée de droite à gauche (tors Z) ou de gauche à droite (tors S).



Figure I.27 – Représentation des deux types de torsions S et Z.

Les fils ainsi obtenus peuvent subir encore quelques transformations (retordage, guipage, entremêlement, moulinage, texturation, teinture ...) avant d'être prêts à l'emploi pour le tissage ou le tricotage notamment.

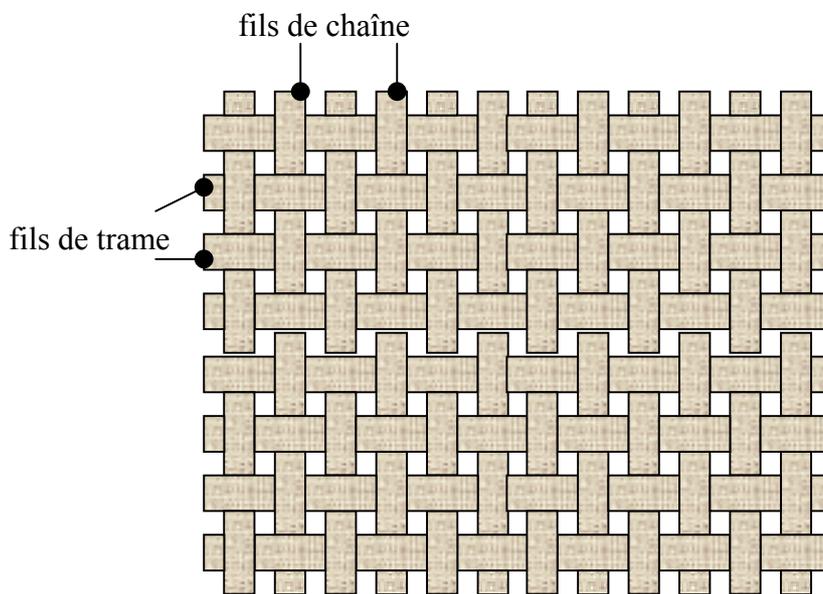
c. **Tissage – tricotage - nontissés**

**Le tissage**

Le tissage est l'étape correspondant à la réalisation d'un tissu qui est le résultat de l'entrecroisement de fils (fils de chaîne et fils de trame). Les fils de chaîne sont parallèles entre eux et disposés selon la longueur du tissu. Les fils de trame sont perpendiculaires aux fils de chaîne.

La réalisation d'étoffes existe depuis des temps immémoriaux, l'utilisation de métier à navettes durant l'Antiquité a même été prouvée, cependant, c'est au XVIIIème siècle que la production est devenue conséquente grâce aux progrès techniques et à l'invention du métier à tisser.

La grande variété des étoffes est une conséquence non seulement des fils utilisés, mais aussi des modes d'entrecroisement de ces fils. Le mode d'entrecroisement des fils de chaîne et des fils de trame s'appelle l'armure. Il existe trois types fondamentaux d'armures : armure toile (figure I.28), armure sergé, armure satin. Chaque armure fondamentale pourra donner des armures dérivées (exemple à partir de la toile, on a les armures dérivées suivantes : reps, cannelés nattés ; à partir du sergé : diagonales, chevrons...). Il existe des armures pour tissus spéciaux tels que : éponge, double face, velours...



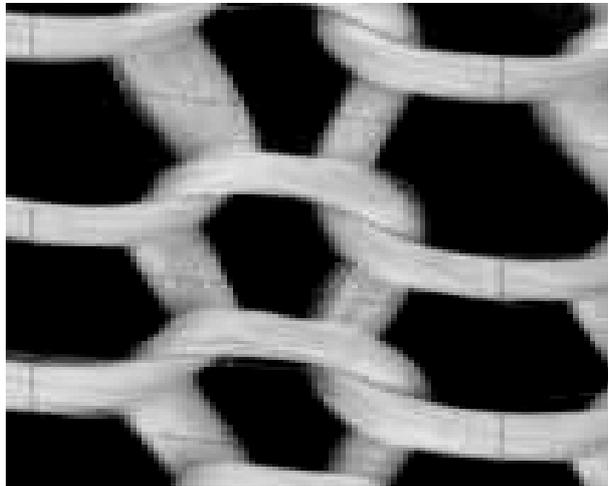
*Figure I.28 – Représentation schématique d'un textile (armure toile)*

Les différents tissus réalisés vont dépendre également de l'entrecroisement plus ou moins important des fils. La mesure de l'entrecroisement plus ou moins serré des fils s'appelle la contexture.

## Le tricotage ou bonneterie

Dans la filière textile, on parle souvent indifféremment de tricotage ou de bonneterie. Cette opération consiste à l'obtention d'une étoffe, non pas par l'entrelacement d'ensembles de fils disposés de façon rectiligne comme pour le tissage, mais par l'entrelacement de boucles de fils appelés mailles (figure I.29).

En fait la technique de réalisation de ces produits s'appelle le tricotage et le terme bonneterie désigne la fabrication par cette technique et le commerce des vêtements et des étoffes à mailles. Cette industrie comprend un ensemble de secteurs très diversifiés, parmi les articles de bonneterie, on peut citer : les articles chaussants (bas, collants, chaussettes...), les sous-vêtements, les vêtements de dessus « coupés - cousus », les gants, les bérets, les dentelles, les rideaux...



*Figure I.29 – Représentation de l'entrelacement des mailles d'un tricot*

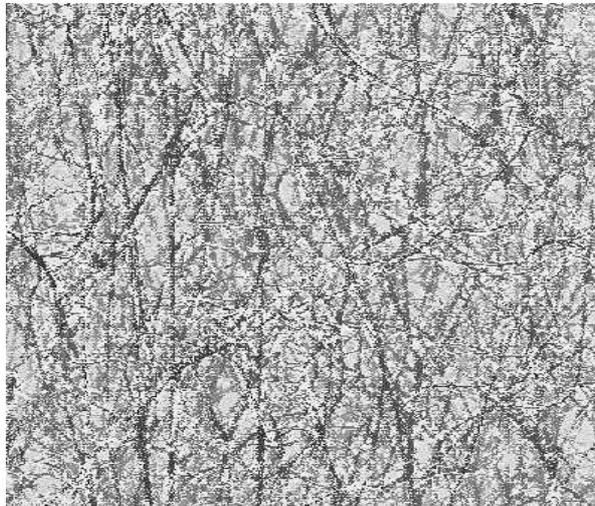
Une des propriétés des tricots, comme on peut le voir sur la figure I.29, est que les mailles sont susceptibles de se déformer. En effet pour obtenir un tissu extensible il est nécessaire que les fils qui le constituent, disposés de manière rectiligne, soient eux-mêmes extensibles, alors que les tricots, grâce à la faculté qu'ont les mailles à se déformer, sont extensibles même s'ils sont réalisés avec des fils non extensibles.

Cette propriété est principalement exploitée dans la fabrication des vêtements car elle permet un confort accru (d'où l'utilisation dans la réalisation des sous-vêtements notamment). Néanmoins cette propriété s'avère également utile pour d'autres applications telles que l'ameublement ou l'automobile.

Par ailleurs, dans le domaine qui nous intéresse, celui de l'électrostatique, les espaces vides que présentent les tricots, seront occupés par de l'air, conférant ainsi une bonne isolation thermique à ces produits mais jouant également un grand rôle au niveau de leurs propriétés électrostatiques.

## Les nontissés

Les méthodes industrielles de fabrication des nontissés permettent d'obtenir des produits textiles finis en s'affranchissant d'une grande partie de la chaîne de production traditionnelle. En effet, on part directement de la fibre pour obtenir le produit fini : la fabrication des fils, le tissage ou le tricotage sont alors inutiles (figure I.30). Pour réaliser des nontissés il faut créer tout d'abord la nappe fibreuse ; elle correspond à un simple assemblage des fibres sans que le produit n'ait de résistance mécanique. Ensuite il est nécessaire pour obtenir un produit fini utilisable, de donner une certaine cohésion à cette nappe fibreuse, c'est la seconde étape : la consolidation.



*Figure I.30 – Représentation d'un nontissé : il n'y a pas d'assemblage particulier des fibres, la cohésion de l'ensemble est assurée par l'étape de consolidation*

Pour réaliser les nappes de nontissés on compte quatre méthodes principales :

- la voie sèche
- la voie humide
- la voie fondue et Melt Blown
- la voie Airlaid (pulp)

Par ailleurs, trois types de consolidations sont possibles :

- le liage mécanique (aiguilletage, liage par jet d'eau ...)
- le liage thermique (calandrage, four ...)
- le liage chimique (imprégnation, pulvérisation ...)

Les nontissés connaissent actuellement un très grand essor. Les applications possibles sont multiples, la principale actuellement reste celle du marché des lingettes. On retrouve également beaucoup de nontissés pour des applications techniques notamment dans la filtration ou l'automobile.

**d. Ennoblement**

L'ennoblement correspond à l'ensemble des transformations que l'on apporte aux fils ou articles textiles lorsqu'ils sortent de la filature, du tissage ou du tricotage car en effet ils sont rarement utilisables directement. Ces transformations sont nécessaires pour améliorer leur aspect, pour leur donner des qualités particulières les rendant propres à l'usage auxquels ils sont destinés.

L'industrie de l'ennoblement recouvre un grand nombre d'opérations que l'on peut classer dans quatre catégories : blanchiment ou prétraitements, teinture, impression, apprêt (les apprêts sont les traitements que subit un tissu pour en modifier l'aspect, le toucher, les propriétés chimiques...).

**2. Description des échantillons utilisés dans les expériences**

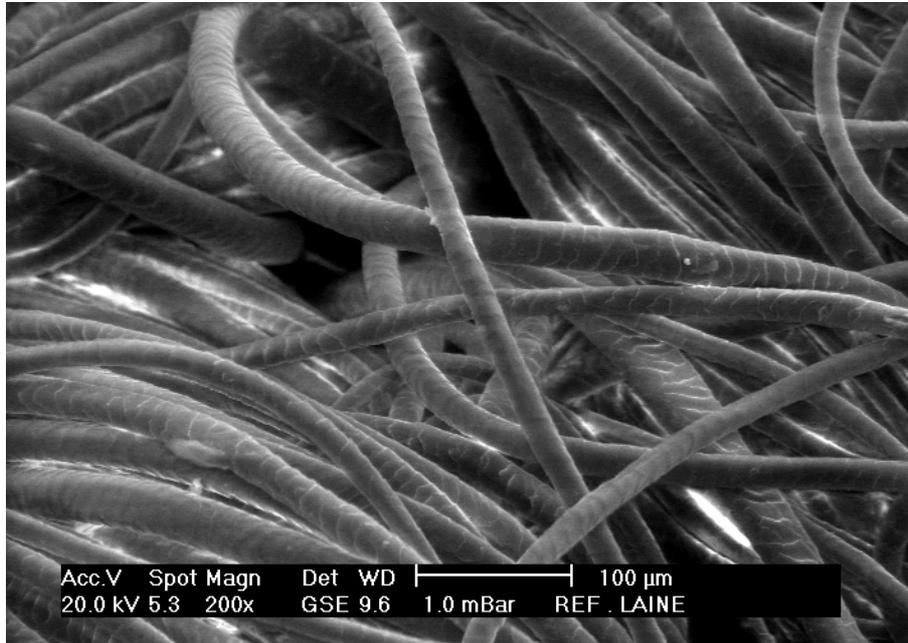
Plusieurs résultats portant sur des textiles (polarisation, frottement...) seront présentés dans les chapitres suivants. Ces résultats ont été obtenus sur des échantillons de textile variés dont la description au niveau de la composition chimique et de la structure physique est donnée ci-dessous.

**Echantillon de laine**



*Figure I.31 – Photo au microscope électronique de la surface de l'échantillon de laine (grossissement x75)*

La photo de la figure I.31 montre la surface de l'échantillon de laine et permet d'observer la configuration des fibres de laine orientées un peu dans toutes les directions. C'est un échantillon dit « pur » car il est composé de 100% de laine.



*Figure I.32 – Photo au microscope électronique de la surface de l'échantillon de laine (grossissement x200)*

Le grossissement plus important de la figure I.32 permet de mettre en évidence quelques détails de l'état de surface des fibres de laine. Celles-ci présentent des écailles à leur surface, éléments principaux responsables du phénomène de boulochage.

Quelques propriétés de la laine :

- elle a tendance à feutrer (boulochage)
- elle est mauvaise conductrice de la chaleur
- elle absorbe jusqu'à 35% de son poids en eau

### **Echantillon de soie**

L'échantillon de soie présenté en figure I.33 est composé d'une étoffe 100% en soie. Les fibres de soie sont lisses (surtout lorsqu'elles ne présentent pas de gré) et très fines. Elles sont de section triangulaire et elles présentent toujours quelques fibrilles. Leur diamètre est visiblement plus petit que celui des fibres de laine si l'on compare avec la figure I.31. La structure est plus régulière dans le cas de la soie, l'ensemble des fibres reste bien orienté dans les sens chaîne et trame, à l'exception faite des quelques fibrilles.

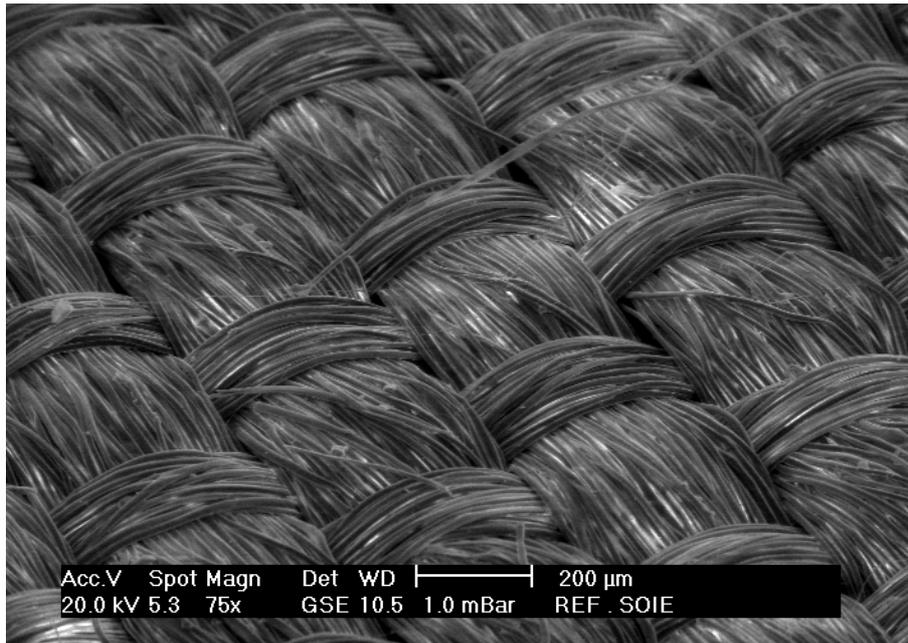


Figure I.33 – Photo au microscope électronique de la surface de l'échantillon de soie (grossissement x75)

Voici quelques propriétés de la soie :

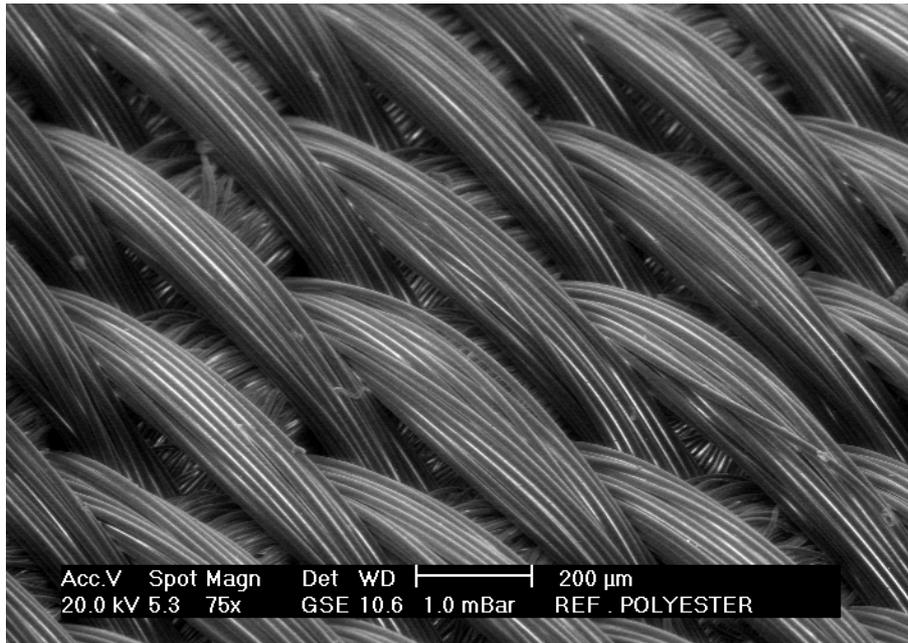
- la soie est très solide et élastique
- elle peut, après traitement, absorber jusqu'à 30% de son poids en eau
- elle est mauvaise conductrice de la chaleur (étoffe isolante)
- elle brûle lentement

### Echantillon de polyester

Le cas du polyester présenté sur la figure I.34 montre une structure très régulière, plus que la laine ou la soie, et également une structure bien plane. Ceci est très net lorsque l'on compare avec la laine ; on observe dans le cas de la laine que la disposition des fibres confère à l'échantillon une sorte de « gonflant » alors que dans le cas du polyester la structure est beaucoup plus plane. L'échantillon étudié ici est un échantillon de composition : 100% polyester. La régularité obtenue s'explique par le fait que l'on a affaire à une fibre synthétique (un polymère), dont le processus de fabrication permet un niveau de contrôle élevé de la qualité du produit, contrairement aux matières naturelles telles que la laine et la soie.

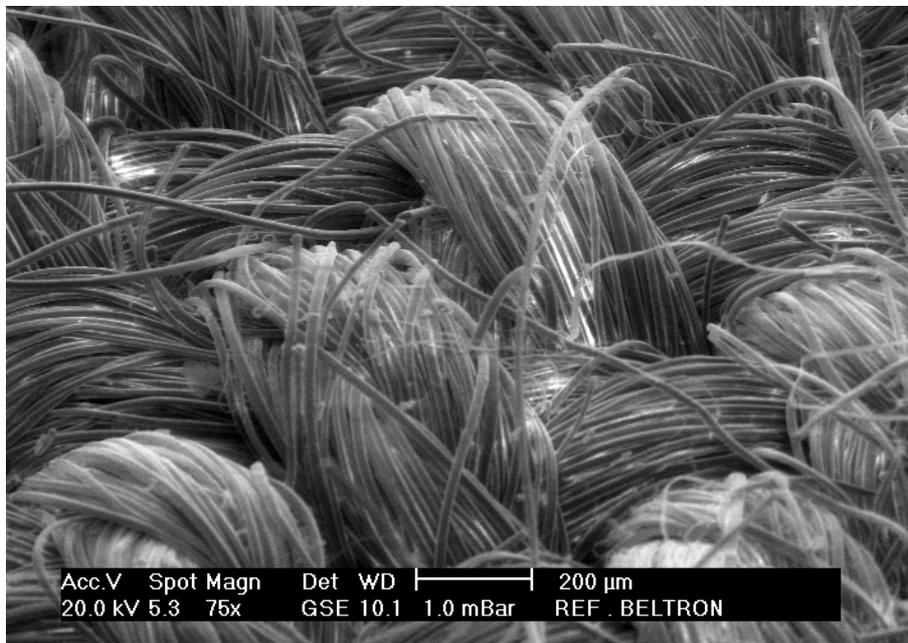
Le polyester provient de filaments ou de fibres à base de téréphtalate de glycol. On peut trouver dans la littérature [22] quelques détails sur ses caractéristiques électriques :

- facteur de pertes diélectriques ( $\tan\phi$ ) : 0,016 (à  $10^6$  Hz)
- constante diélectrique : 3 (à  $10^6$  Hz)
- résistivité électrique :  $10^{15}$   $\Omega$ .cm



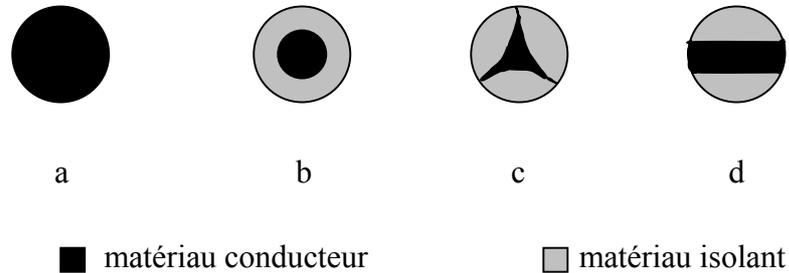
*Figure I.34 – Photo au microscope électronique de la surface de l'échantillon de polyester (grossissement x75)*

### Echantillon de Beltron



*Figure I.35 – Photo au microscope électronique de la surface de l'échantillon de Beltron (grossissement x75)*

L'échantillon appelé Beltron présenté ici (figure I.35 et I.37) correspond à un textile technique qui a pour particularité de comporter des parties conductrices afin de lui conférer des propriétés antistatiques. Il existe plusieurs types de fibres conductrices [23], les principales sont représentées sur le schéma de la figure I.36.



*Figure I.36 – Représentation schématique des coupes transversales des fibres conductrices les plus utilisées*

On observe qu'il existe différentes configurations pour les fibres conductrices, certaines sont entièrement composées d'un matériau conducteur (comme du carbone ou de l'acier), c'est le cas de la fibre notée **a** sur la figure. D'autres comme la fibre **b** sont constituées d'une partie conductrice située au cœur de la fibre et qui ne présente aucun contact avec la surface, les mécanismes d'écoulement de charge se feront alors principalement par influence. Enfin, dans les catégories **c** et **d**, les matériaux conducteurs apparaissent à la surface de la fibre ; le beltron appartient à la dernière catégorie.



*Figure I.37 – Photo au microscope électronique de la surface de l'échantillon de Beltron (grossissement x200)*

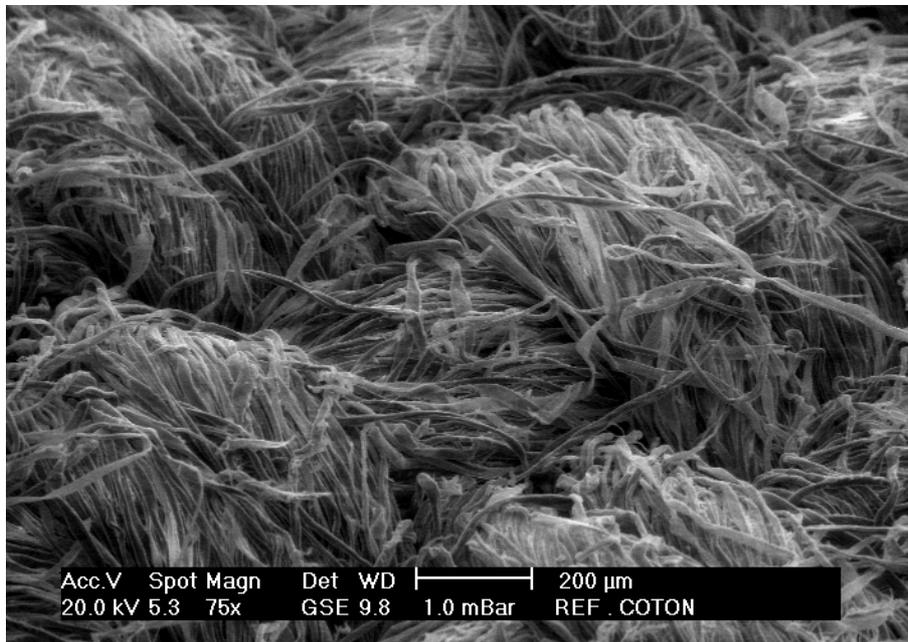
Cet échantillon est en fait un tissu composé majoritairement d'aramide (fibre synthétique) et de 2% de Beltron, fibre conductrice de la société KANEBO en mélange intime. Le mélange intime signifie que les fibres ont été mêlées au moment de la filature et sont donc indissociables. Chaque fil est donc constitué de 98% d'aramides et de 2% de Beltron. Les aramides (aromatic polyamides) sont des textiles qui ont tendance à former des fibrilles.

### **Echantillon de chlorofibre**

L'échantillon nommé ici chlorofibre est un échantillon de tricot. Il est composé majoritairement de chlorofibre et d'un peu d'acrylique. L'acrylique est une fibre synthétique à base de polycrylonitrile. La chlorofibre est également une fibre synthétique dont la base est le polychlorure de vinyle. La chlorofibre est le composant principal du THERMOLACTYL produit par la société DAMART.

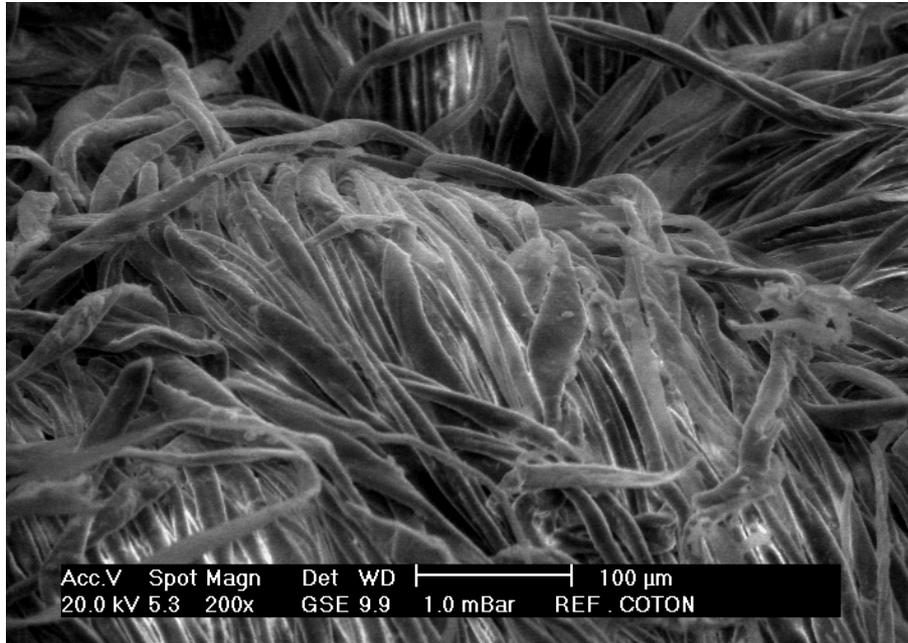
### **Echantillon de coton**

L'échantillon suivant est un échantillon de textile 100% coton.



*Figure I.38 – Photo au microscope électronique de la surface de l'échantillon de coton (grossissement x75)*

La photo de la figure I.38 montre la surface de cet échantillon de textile. Cette surface présente un profil très accidenté.



*Figure I.39 – Photo au microscope électronique de la surface de l'échantillon de coton (grossissement x200)*

La fibre de coton est une fibre plutôt plate, comme un ruban. C'est une fibre souvent vrillée avec des bords plus ou moins incurvés (figure I.39).

Quelques propriétés :

- le coton est solide, régulier, fin et souple
- il brûle rapidement
- il est bon conducteur thermique
- il absorbe l'humidité après traitement

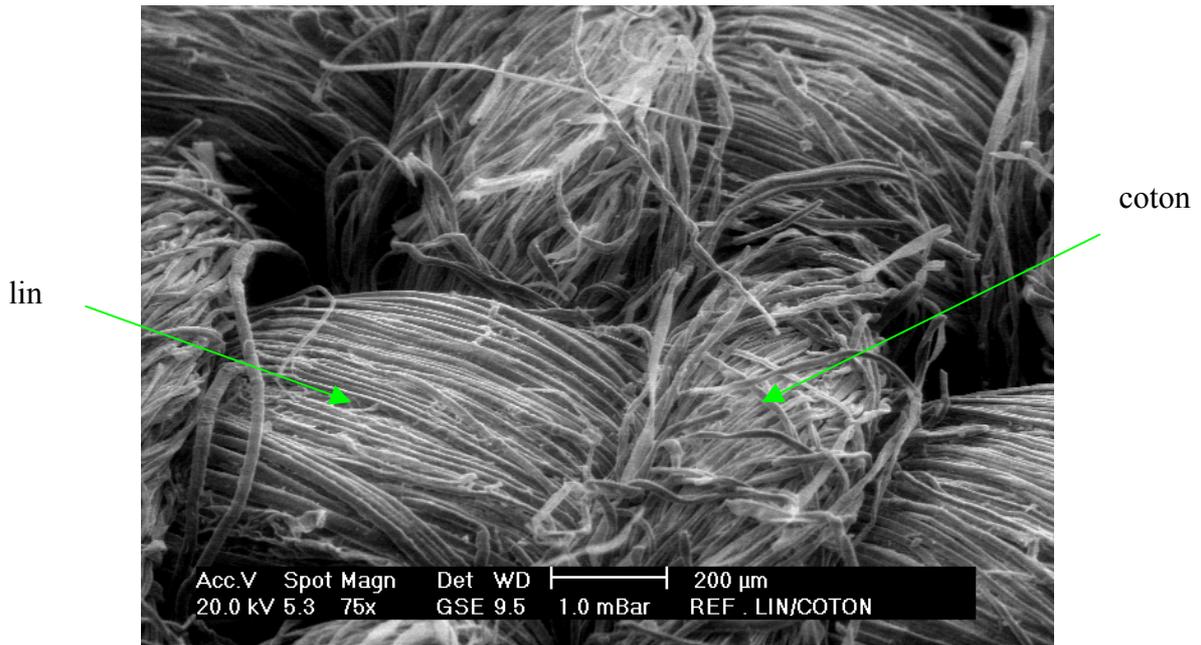
### **Echantillon de nontissé**

Dans la suite il sera également question d'essais sur un échantillon de nontissé. Cet échantillon est composé d'un mélange de fibres cellulosiques (cellulose régénérée : viscose et linster) et de polyester.

Les propriétés des fibres cellulosiques sont les suivantes :

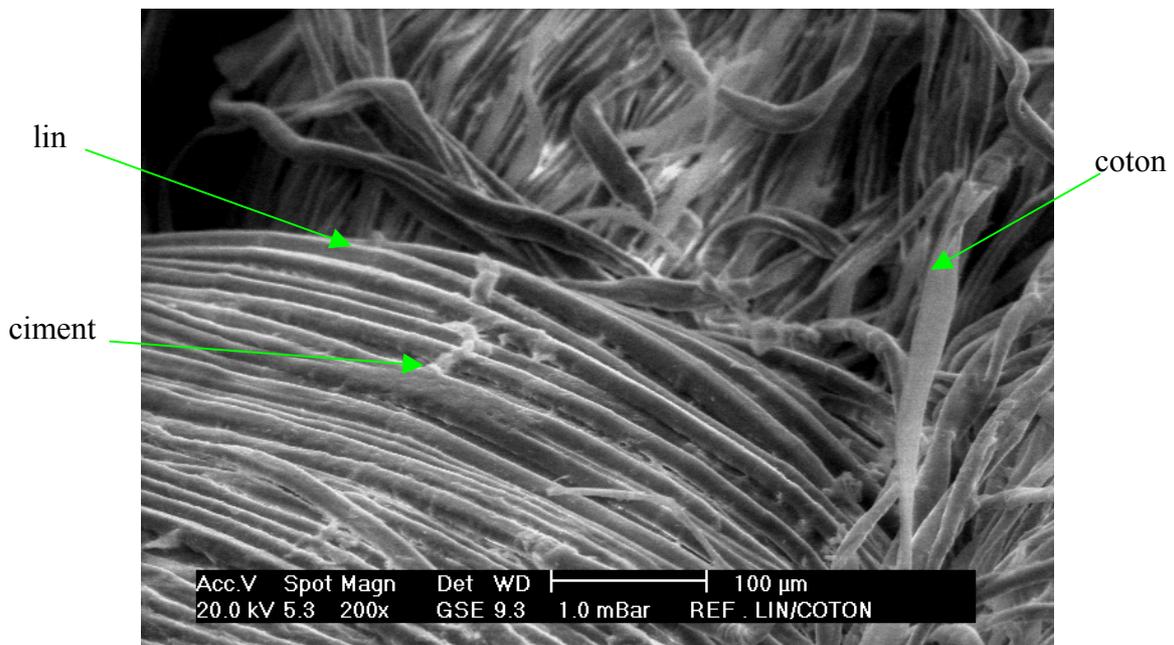
- même type de propriétés que le coton, mais la viscose est plus fragile
- matière ayant la brillance de la soie
- se froisse facilement, a tendance à rétrécir
- jaunissement à la chaleur

**Echantillon de lin/coton**



*Figure I.40 – Photo au microscope électronique de la surface de l'échantillon de lin/coton (grossissement x75)*

L'échantillon de lin/coton utilisé se présente sous la forme d'une toile métisse (figure I.40) : les fils de trame sont en lin et représentent 45% de l'échantillon, les fils de chaînes sont eux en coton et correspondent à 55% du tout.



*Figure I.41 – Photo au microscope électronique de la surface de l'échantillon de lin/coton (grossissement x200)*

Le lin provient de la tige de la plante du même nom, il se présente sous forme de longs faisceaux (figure I.41), souvent liés ensemble (ciment) et on peut observer de nombreux nœuds.

Les propriétés du lin :

- le lin présente un aspect brillant et lisse
- les fibres sont longues, souples et très résistantes
- le lin est un bon conducteur thermique
- il brûle rapidement
- sa solidité est supérieure à celle du coton

### **Echantillon de textile conducteur**

L'échantillon conducteur utilisé est un nontissé composé d'un mélange de KERMEL et de BEKINOX. Le KERMEL est une fibre d'aramide (polyamide imide), il constitue la partie nontissée du textile. Les propriétés de cette fibre sont les suivantes :

- facteur de pertes diélectriques : 0,096 (à  $10^6$  Hz)
- constante diélectrique : 3,1 (à  $10^3$  Hz)

La structure de l'échantillon est telle que des fils de BEKINOX forment une sorte de grille au sein du nontissé ; ces fils sont constitués d'un matériau conducteur.

## **I-F Conclusion**

Ce premier chapitre a été consacré principalement au positionnement du problème électrostatique, notamment par rapport à la matière textile. Ce problème est d'autant plus important que les domaines touchés sont nombreux et variés.

La mesure des phénomènes électrostatiques est un problème complexe car beaucoup de paramètres entrent en jeu. Même si principalement il s'agit d'un problème surfacique, les contributions des volumes des matériaux doivent cependant être prises en compte. Il est important de prendre en considération les différentes parties du problème qui sont ; l'apparition de la charge sur les matériaux isolants, selon les différents modes déjà cités (frottement, induction...), l'écoulement et la répartition des charges électriques qui sont intimement liés à la nature même des matériaux et aux conditions environnantes, et enfin la décharge électrostatique elle-même qui est la cause des nuisances les plus graves.

Pour lutter efficacement contre ces nuisances, des normes ont dû être établies pour évaluer les comportements électrostatiques des textiles. Ces normes posent le problème de la réalisation de méthodes d'essai proches de la réalité vécue et qui permettent de rendre compte des phénomènes de manière reproductible pour pouvoir tester les matériaux à risque et l'efficacité des nouveaux produits permettant de limiter cette électricité statique.

---

# Chapitre II

---

## Chapitre II

# Comportement des textiles après charge par polarisation

### II-A Introduction

Pour pouvoir caractériser les matériaux textiles face aux phénomènes électrostatiques, il est nécessaire de les charger au préalable. Nous avons passé en revue un certain nombre de procédés pour charger les matériaux dans le chapitre précédent, dans ce chapitre nous nous intéressons plus particulièrement à la charge par polarisation. Le fait d'imposer un champ électrique au niveau d'un isolant entraîne une réorganisation des charges électriques de sorte que ce dernier perd sa neutralité et devient ainsi chargé. En le laissant se décharger librement, on peut suivre cette décharge et ainsi avoir une information sur son comportement aux charges électriques ; on peut en d'autres termes évaluer la « fuite » des charges électriques de cet isolant. La démarche adoptée pour évaluer cette décharge est simple, elle consiste à suivre la décharge d'un condensateur réalisé avec l'échantillon que l'on veut tester. Pour pouvoir mesurer cette fuite, il est nécessaire de faire une mesure sans contact, afin d'éviter toute décharge parasite de l'échantillon. Une étude préliminaire, au moyen de condensateurs du commerce et de disques métalliques, a permis de se familiariser aux mesures sans contact et de comprendre le comportement de condensateurs en fonction de nombreux paramètres extérieurs. Cette étape nécessaire nous permet de passer ensuite progressivement aux matériaux isolants et plus particulièrement aux matériaux textiles. L'étude de cette méthode de caractérisation des textiles est faite dans une optique de normalisation, la reproductibilité de cette méthode étant un facteur déterminant de son développement. Toute la validité de cette méthode repose également sur l'information que l'on peut en tirer et la compréhension des phénomènes physiques pour la caractérisation de l'échantillon. Le but étant au final de pouvoir dégager certains paramètres caractéristiques du matériau qui nous renseigne sur son comportement électrostatique.

## II-B Expériences préliminaires

Les premières expériences s'articulent principalement sur l'étude des condensateurs au moyen d'une mesure sans contact avec le mesureur de champ électrostatique (parfois appelé également moulin à champ).

### 1. Principes des mesures

L'appareil utilisé est un moulin à champ électrostatique tel qu'il a été décrit plus haut au paragraphe I-C.2. C'est un appareil de marque ELTEX qui permet de mesurer des champs allant jusqu'à 200kV/m. Le principe de fonctionnement de l'appareil est basé sur des mesures de charges par influence. Ce qui est détecté est le champ électrique généré par les charges à la surface des disques.

Le principe des expériences est simple, il est basé sur la mesure du champ électrique généré par un disque métallique chargé. En fait, un disque métallique est chargé par conduction et la mesure du champ électrique est faite à l'aide du mesureur de champ (figure II.1). Le disque est relié à un condensateur  $C$ , dont la caractéristique principale est de présenter un courant de fuite très faible, permettant de conserver la charge suffisamment longtemps pour faire les relevés.

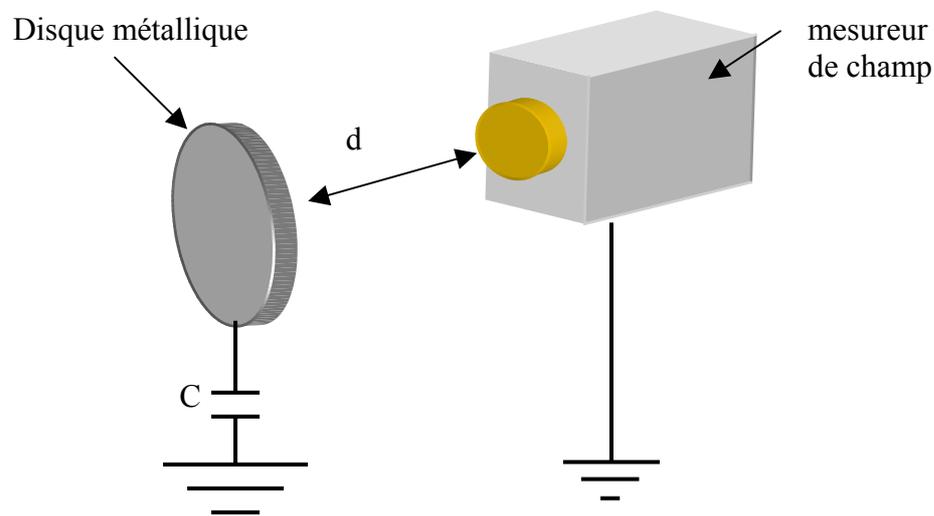


Figure II.1 – Schéma très simplifié du dispositif de mesure

Le moulin à champ mesure le champ électrique entre sa plaque sensible et le disque métallique de telle sorte qu'on peut estimer en première approximation que l'on a affaire à un condensateur dont l'une des armatures serait la plaque sensible du moulin à champ et l'autre le disque métallique (figure II.2). En effet, pour la mesure elle-même, il faut tenir l'appareil

de mesure de manière telle que la tête de mesure à modulateur soit parallèle à l'objet à mesurer. La disposition des surfaces, l'une vis-à-vis de l'autre, est comparable à la disposition des armatures d'un condensateur plan. On fait donc l'approximation d'un champ uniforme entre ces armatures pour déterminer la valeur théorique du champ. Celle-ci est approximée par la formule suivante :

$$E = \frac{U}{d} \quad (\text{II.1})$$

où  $E$  représente l'amplitude du champ électrique,  $U$  la tension appliquée au disque métallique et  $d$  la distance entre l'appareil et le disque, dans notre exemple cette distance est de l'ordre de 3cm.

Les disques utilisés sont des disques en aluminium, tous d'épaisseur 5 mm. Plusieurs diamètres différents ont été utilisés (également pour les expériences qui suivront) :

- 16cm
- 11 cm
- 9 cm
- 5 cm

Divers condensateurs ont été utilisés pour stocker les charges injectées, le critère de base pour le choix de ces condensateurs fut le courant de fuite qui devait être très faible. Les valeurs des capacités utilisées sont les suivantes : 4,7  $\mu\text{F}$  ; 100 nF ; 10 nF ; 1 nF et 100 pF.

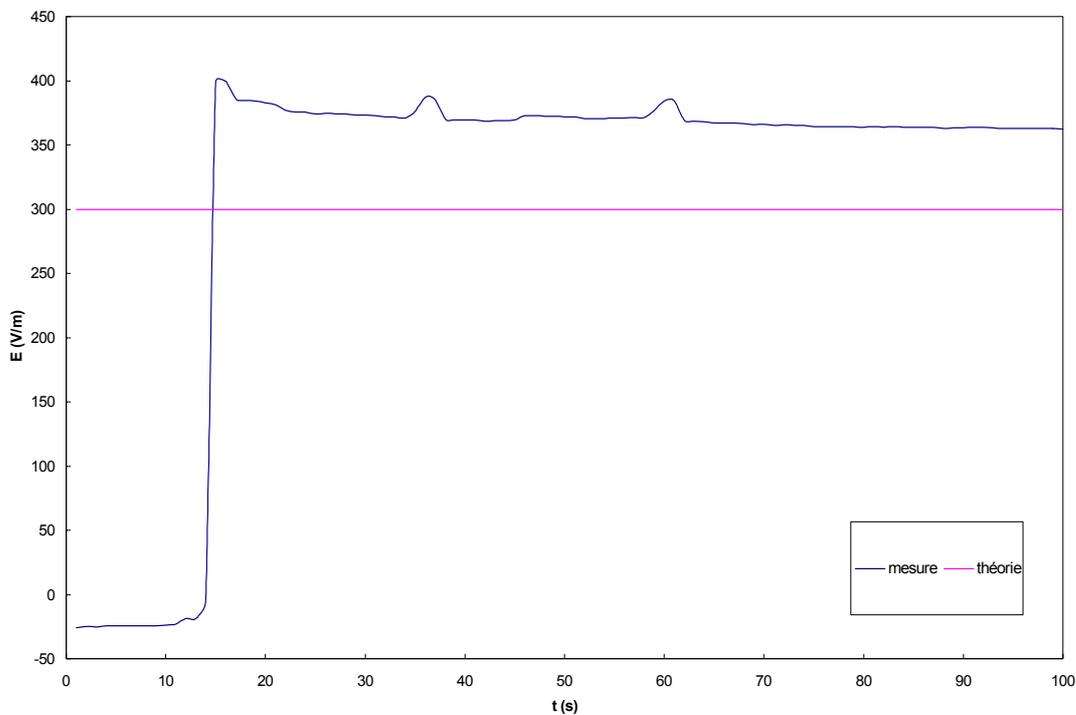


Figure II.2 – Champ électrique émis par le disque 1 pour une tension de 9V

La courbe en rouge représente le champ théorique que l'on devrait mesurer. Cette valeur est déterminée à l'aide du modèle du condensateur plan (équation II.1). Elle est comparée à la mesure obtenue avec le moulin à champ sur le disque de 11 cm de diamètre, placé à une distance  $d$  de 3cm, soumis à une tension  $U$  de 9V, l'hygrométrie relative est de 30%, la capacité utilisée a une valeur de 4,7  $\mu$ F.

Les résultats montrent un écart d'environ **25%** avec la théorie. Cet écart peut, en partie, être expliqué par le fait que pour déterminer la valeur du champ, nous supposons que le champ électrique devant le capteur est homogène, situation similaire à celle d'un champ électrique présent entre les plaques d'un condensateur plan, sans tenir compte des effets de bord. Par ailleurs la mesure donne une valeur supérieure à la valeur théorique car le moulin à champ peut être considéré comme un conducteur relié à la terre, ainsi les lignes de champ provenant du disque chargé, mais aussi les lignes de champ d'objets à proximité vont se coupler avec l'appareil. Pour améliorer la précision, il est nécessaire d'ajouter un anneau de garde autour de l'objectif de l'appareil (procédé très répandu pour ce genre de mesures).

Par ailleurs, on peut constater des irrégularités dans l'évolution de la courbe, celle-ci n'étant pas uniforme sur toute la durée de mesure. Ces irrégularités correspondent à des augmentations du champ électrique mesuré par l'appareil dues aux déplacements de l'opérateur dans la chambre. Cela montre à quel point ces mesures sont très sensibles aux couplages avec l'environnement extérieur.

Enfin, on observe également une décroissance progressive du champ électrique qui correspond à la décharge du disque.

## **2. Effet d'un plan de masse à proximité du dispositif**

De nombreux paramètres peuvent influencer les résultats de mesures obtenus :

- Les conditions atmosphériques : c'est pourquoi toutes les fois où cela a été possible, les mesures ont été faites dans des conditions contrôlées d'hygrométrie et de température.
- La taille des disques et la distance  $d$  entre le disque et l'appareil de mesure : apparitions d'effets de bord. Pour s'en affranchir, l'idéal est de placer l'appareil de mesure à une distance  $d$  d'un disque de diamètre au moins égal à  $5d$ . Cela n'a pas toujours été le cas dans nos expériences comme pour les mesures ci-dessus.
- La présence ou non d'un corps conducteur à proximité
- La valeur de la capacité utilisée : elle joue en effet sur la constante de temps du système et donc sur le temps de décharge.

Ces deux derniers points sont développés ci-dessous.

Les résultats d'essais suivants permettent de voir l'influence d'un plan de masse situé à proximité du dispositif de mesure. Le principe étant celui décrit ci-dessus, seulement pour certaines mesures, on a disposé un plan de masse en dessous du dispositif à environ 30cm (figure II.3).

Les conditions expérimentales :

- le disque utilisé est celui de diamètre  $D=11$  cm
- les capacités :  $C=1$ nF et  $C=10$ nF
- la distance  $d=3$ cm
- la tension appliquée  $U=9$ V
- température :  $25^{\circ}\text{C}$
- humidité relative : 38%

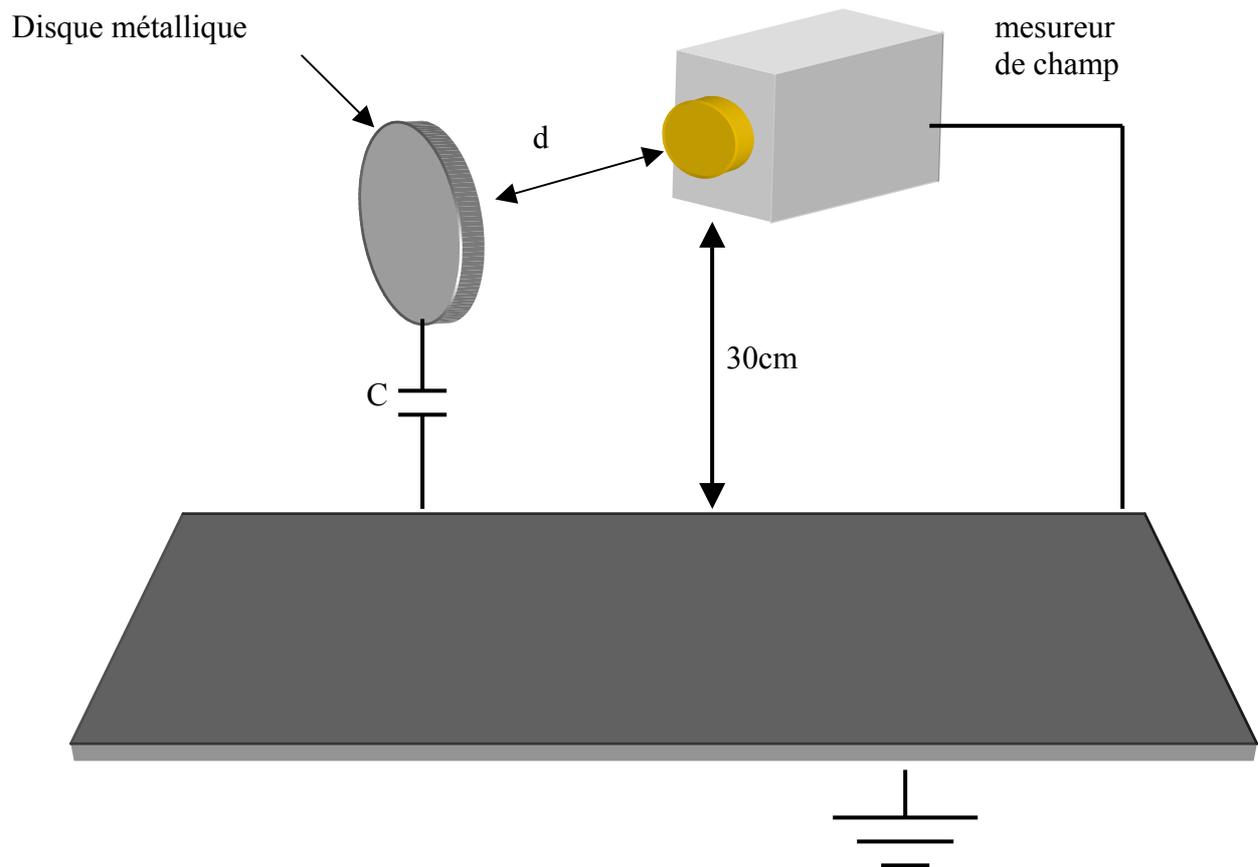


Figure II.3 – Schéma très simplifié du dispositif de mesure avec plan de masse

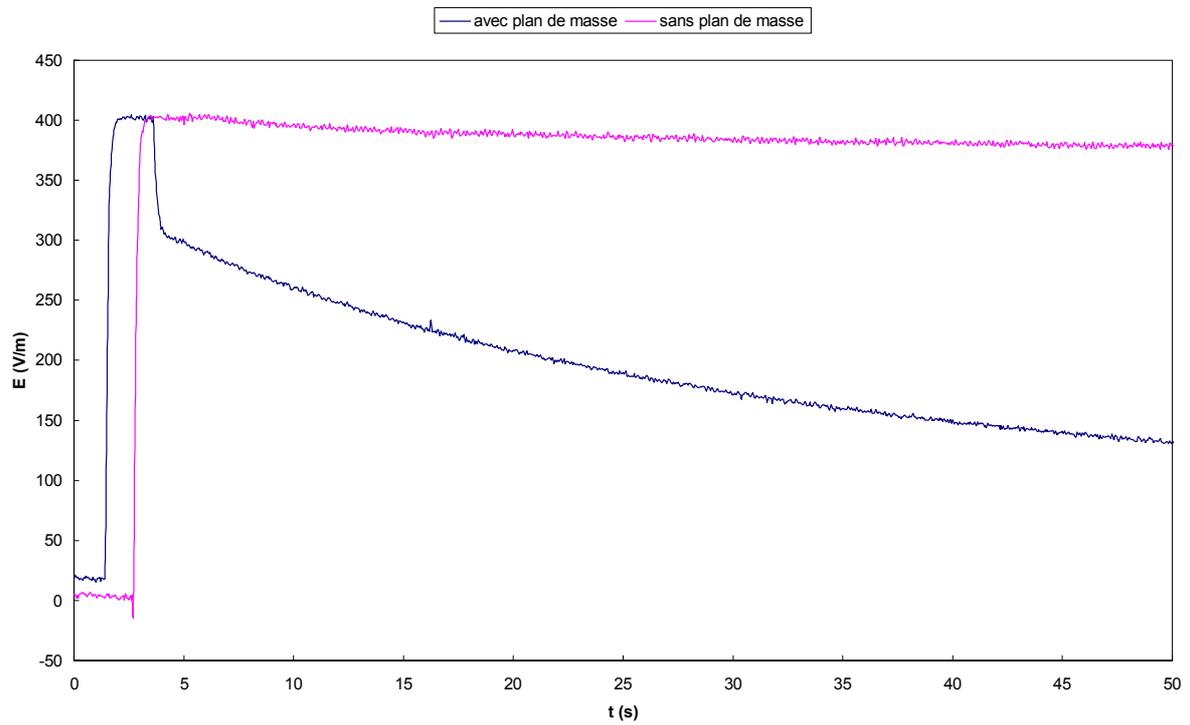
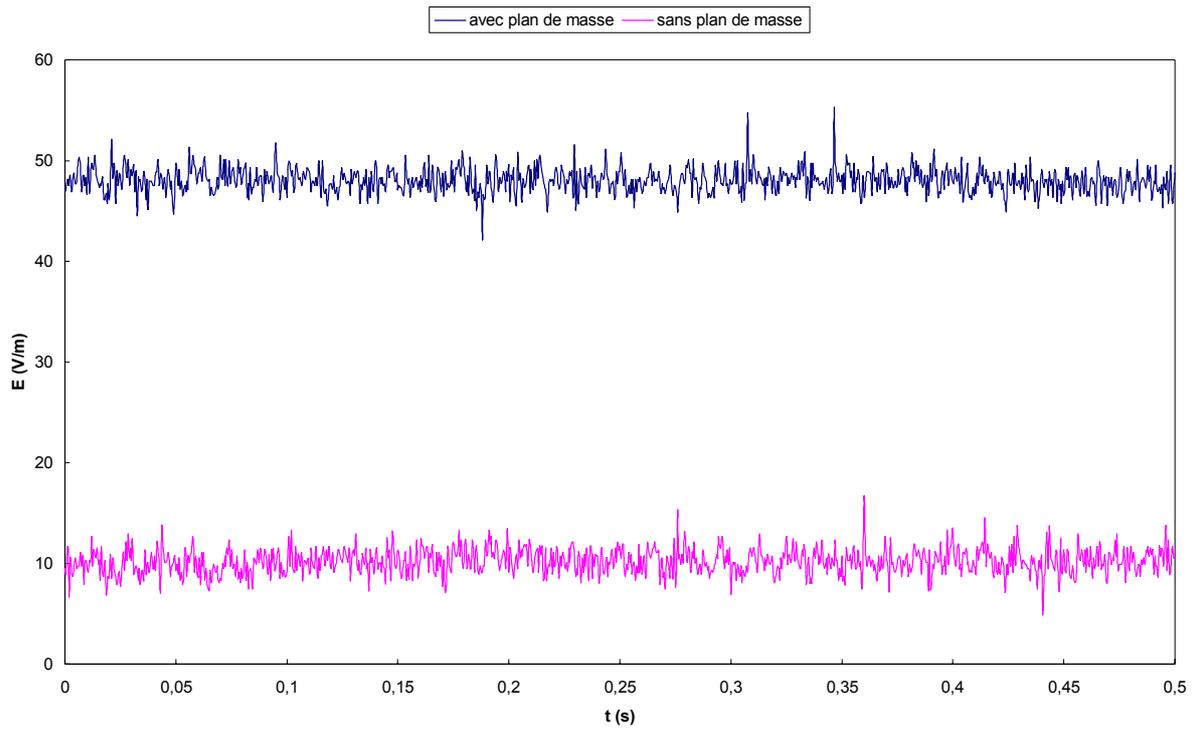


Figure II.4 – Mesures du champ électrique, en chambre conditionnée, avec et sans application de la tension de charge pour  $C=10$  nF

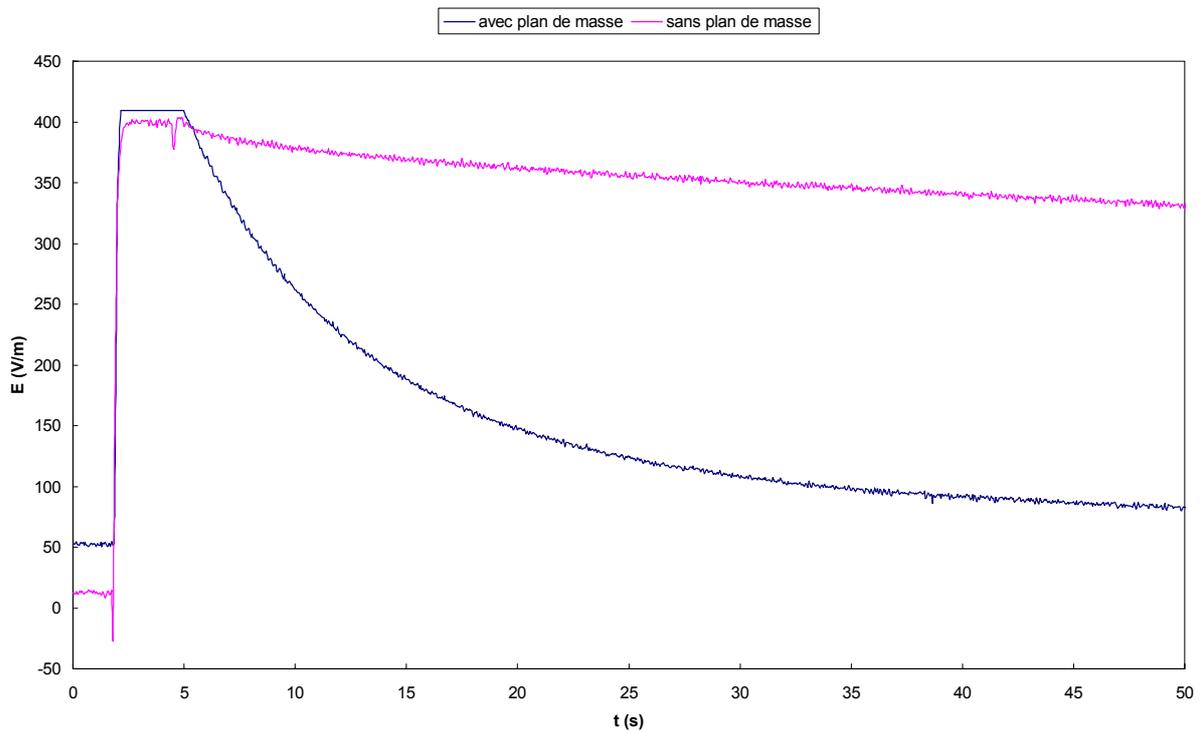
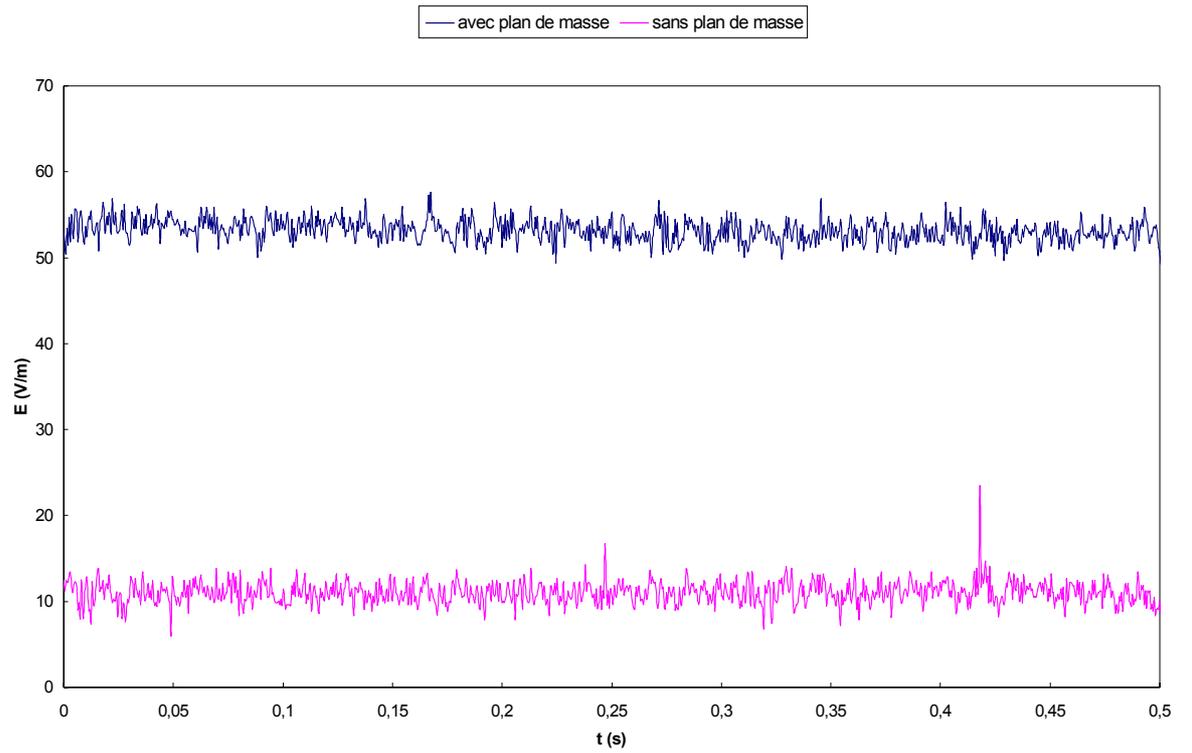


Figure II.5 – Mesures du champ électrique, en chambre conditionnée, avec et sans application de la tension de charge pour  $C=1$  nF

On observe des niveaux différents avant d'appliquer l'impulsion de tension, le niveau étant supérieur d'environ **40 V/m** dans le cas de l'utilisation d'un plan de masse, ceci étant valable pour les deux types de capacité. De plus, l'évolution du champ électrique après l'application de la de tension diffère également, la décroissance du champ étant plus rapide dans le cas de l'utilisation du plan de masse (figure II.4 et II.5).

Les niveaux différents observés ne s'obtiennent, pour ce qui est du plan de masse, qu'après un certain temps de stabilisation mais globalement il reste cet écart que l'on peut voir sur les courbes. En fait la présence du plan de masse a pour conséquence de perturber la distribution des lignes de champ électrique. En effet, il apparaît alors un couplage entre le plan de masse et le moulin à champ, mais également entre le plan de masse et tous les autres corps chargés environnant, à proximité du plan.

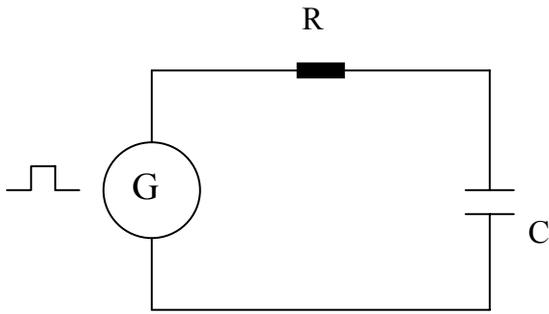
La décroissance accélérée de la quantité de charge s'explique par le phénomène d'influence. Les lignes de champ électrique vont se coupler avec le plan de masse. Il apparaît une capacité entre le disque métallique et le plan de masse  $C_p$ , cette capacité très faible s'ajoute en parallèle à la capacité  $C$  du système de sorte que la capacité équivalente soit inférieure à la capacité  $C$ , ce qui a pour conséquence de diminuer la constante de temps du système et donc d'accélérer la décroissance du champ. D'ailleurs, on peut également observer que la décroissance du champ électrique est plus importante dans le cas de la capacité de 1nF que pour celle de 10nF, encore une fois due à la constante de temps plus faible.

Le fait de s'intéresser aux faibles capacités et aux phénomènes de fuite nous rapproche petit à petit de la problématique liée aux textiles. En effet, pour les problèmes de charges sur des supports textiles, nous aurons souvent affaire à de faibles valeurs de capacité et à des courants de fuite bien plus élevés que pour des condensateurs dont la technologie est justement orientée pour permettre de stocker les charges électriques et non l'inverse.

### **3. Mesure du phénomène de fuite**

Le principe de ces expériences est basé sur l'étude de la charge et de la décharge des condensateurs. Lorsque l'on soumet un condensateur à un signal donné, celui-ci aura une réponse qui sera dépendante de sa résistance de fuite, il faudra donc l'évaluer. La méthode présentée ci-dessous pour évaluer la résistance de fuite d'un condensateur est simple, mais nous verrons qu'elle a ses limites. En effet, la mesure de résistances très élevées, comme les résistances de fuite, est un exercice toujours très délicat.

Nous allons donc en premier lieu faire un bref rappel de la réponse d'un condensateur à un train d'impulsions rectangulaires et ainsi pouvoir déterminer la résistance de fuite de ce condensateur. Considérons le système du premier ordre décrit par le schéma suivant :

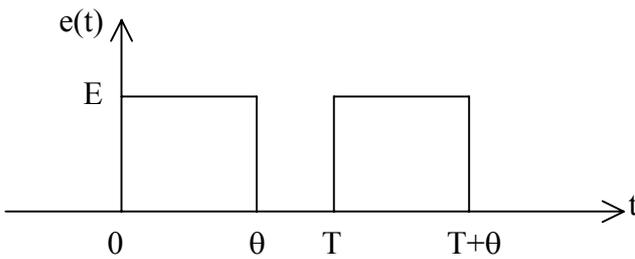


La constante de temps d'un tel système est notée  $\tau=RC$

Le générateur G délivre un signal  $e(t)$  périodique qui va charger et décharger successivement le condensateur C. Ces charges et décharges successives vont dépendre du système complet, mais aussi des caractéristiques du condensateur.

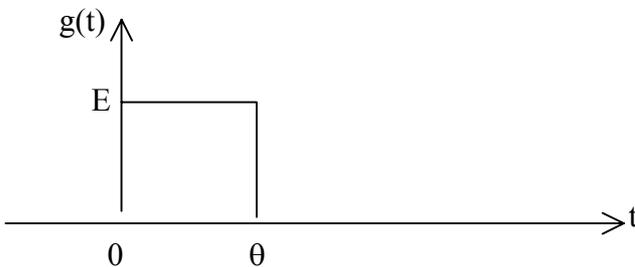
**a. Réponse du circuit à un train d'impulsions rectangulaires.**

On appelle train d'impulsions rectangulaires le signal  $e(t)$  ci-contre :



Remarque : lorsque  $\theta = T/2$  on dit que l'on a un signal carré.

Le signal est un signal périodique de période T. Il suffit d'appliquer le théorème sur les transformées de Laplace des fonctions périodiques et pour cela on cherche une fonction  $g(t)$  coïncidant avec  $e(t)$  sur une période et nulle partout ailleurs.



La fonction  $g(t)$  est un créneau de valeur E et de durée  $\theta$ , sa transformée est :

$$G(p) = E \frac{1}{p} (1 - e^{-p\theta}) \tag{II.2}$$

Le théorème sur les transformées de fonctions périodiques permet d'écrire :

$$E(p) = G(p) \frac{1}{1 - e^{-pT}} \quad (\text{II.3})$$

où  $E(p)$  représente la transformée de Laplace du signal  $e(t)$ .

Aux bornes du condensateur, on a  $V_c(p) = E(p) \cdot T_c(p)$  avec  $T_c(p)$ , la transmittance du système, c'est-à-dire :

$$V_c(p) = E \frac{1}{p} (1 - e^{-p\theta}) \frac{1}{1 - e^{-pT}} \frac{1}{\tau} \frac{1}{p + \frac{1}{\tau}} \quad (\text{II.4})$$

Soit :

$$V_c(p) = \frac{E}{\tau} \frac{1}{p \left( p + \frac{1}{\tau} \right)} (1 - e^{-p\theta}) \frac{1}{1 - e^{-pT}} \quad (\text{II.5})$$

On peut décomposer l'expression  $\frac{1}{p \left( p + \frac{1}{\tau} \right)}$  en  $\frac{\tau}{p} - \frac{\tau}{p + \frac{1}{\tau}}$

Donc après simplification par  $\tau$  on obtient :

$$V_c(p) = E \left( \frac{1}{p} - \frac{1}{p + \frac{1}{\tau}} \right) (1 - e^{-p\theta}) \frac{1}{1 - e^{-pT}} \quad (\text{II.6})$$

Par ailleurs, on peut remplacer  $\frac{1}{1 - e^{-pT}}$  par  $1 + e^{-pT} + \dots + e^{-pnT} + \dots$

Donc :

$$V_c(p) = E \left( \frac{1}{p} - \frac{1}{p + \frac{1}{\tau}} \right) (1 - e^{-p\theta}) (1 + e^{-pT} + \dots + e^{-pnT} + \dots) \quad (\text{II.7})$$

On effectue en ordonnant selon les retards croissants :

$$V_c(p) = E \left( \frac{1}{p} - \frac{1}{p + \frac{1}{\tau}} \right) (1 - e^{-p\theta} + e^{-pT} - e^{-p(T+\theta)} + e^{-p2T} + \dots) \quad (\text{II.8})$$

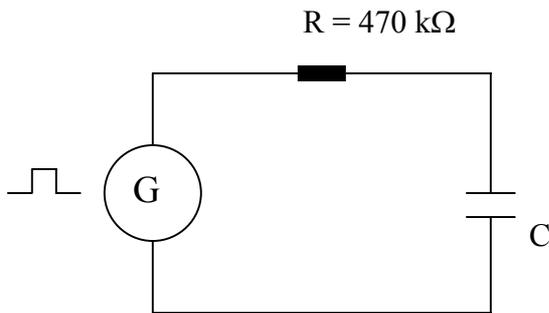
Les tables donnent  $\gamma(t)=1$  pour original de  $F(p)=1/p$  et  $f(t)=e^{-at}$  pour celui de  $F(p)=1/(p+a)$ . Enfin en appliquant le théorème sur les fonctions retardées on a :  $f(t)=1.u(t-\alpha)$  pour original de  $F(p)=1/p.e^{-p\alpha}$  et  $f(t)=e^{-a(t-\alpha)}$  pour celui de  $F(p)=1/(p+a)e^{-p\alpha}$ .

On obtient :

$$V_c(t) = E \left( \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) u(t-0) - \left( 1 - e^{-\frac{t-\theta}{\tau}} \right) u(t-\theta) + \left( 1 - e^{-\frac{t-T}{\tau}} \right) u(t-T) - \dots \right) \quad (\text{II.9})$$

**b. Application à la mesure de la résistance de fuite.**

Pour réaliser cette expérience, on se place dans le cas d'un signal carré, c'est-à-dire que  $\theta = \frac{T}{2}$



Le générateur délivre un signal carré d'amplitude 0-5V. Pour réaliser le circuit on utilise une résistance R de 470kΩ et un condensateur C de 10nF. On ajuste la fréquence de manière à visualiser les charges et les décharges successives du condensateur. On mesure la réponse du condensateur à l'aide d'un oscilloscope que l'on confronte à la théorie établie selon l'expression II.9. Les résultats sont présentés sur la figure II.6 :

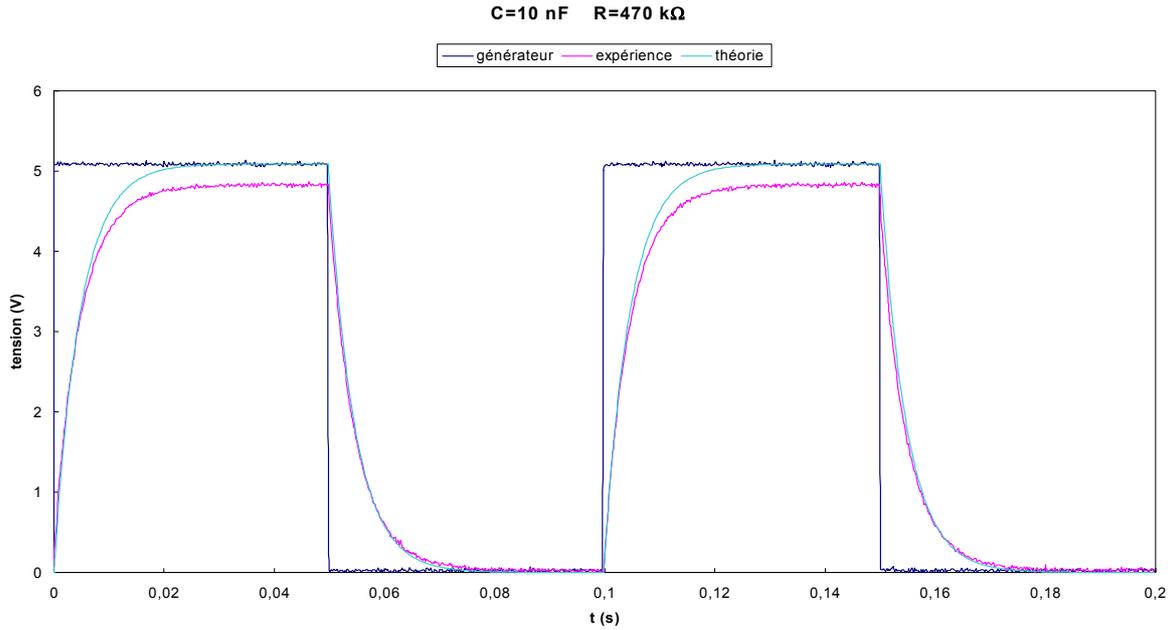
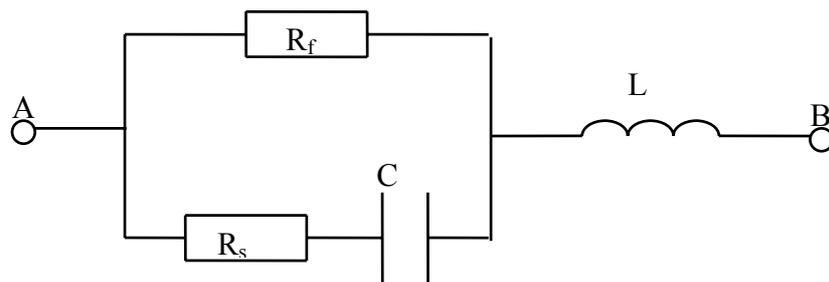


Figure II.6 – Comparaison mesure/théorie pour la réponse d'un condensateur à un train d'impulsions carrées

On remarque lors de la charge que la tension maximale atteinte n'est pas strictement égale à la tension délivrée par le générateur ce qui est contraire à la prédiction théorique. Ceci s'explique par la présence d'une résistance de fuite que l'on modélise comme une résistance en parallèle avec le condensateur  $C$  (figure II.7). La figure II.7 montre que la modélisation d'un condensateur réel ne se limite pas à une simple capacité :



- $R_f$  : Résistance qui va provoquer la décharge du condensateur d'autant plus vite que  $R_f$  est petite.  $R_f$  supérieur à  $1M\Omega$ .
- $R_s$  : Résistance en série due aux contacts, quelques dixièmes d'ohms. Lorsque le condensateur se charge et se décharge avec un courant élevé, celui-ci dégage de la chaleur.
- $C$  : Capacité du condensateur.
- $L$  : Aux hautes fréquences intervient une inductance en série.

Figure II.7 - Schéma équivalent d'un condensateur réel

Dans notre application nous pouvons négliger la résistance en série (quelques dixièmes d’ohms) et l’inductance en série (nous travaillons en basses fréquences). On peut alors déterminer la résistance de fuite  $R_f$  connaissant la tension maximale  $E'$  atteinte lors de la charge du condensateur par la formule :

$$E' = \frac{R_f}{R_f + R} E \quad (\text{II.10})$$

soit :

$$R_f = \frac{E'}{E - E'} R \quad (\text{II.11})$$

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau II.1 suivant :

C = 4,7 $\mu$ F	C = 100 nF	C = 10 nF	C = 1 nF	C = 100 pF
$R_f = 8,4 \text{ M}\Omega$	$R_f = 9 \text{ M}\Omega$	$R_f = 8,8 \text{ M}\Omega$	$R_f = 9,1 \text{ M}\Omega$	$R_f = 8,8 \text{ M}\Omega$

*Tableau II.1 – Valeurs des résistances de fuites mesurées en fonction des capacités*

Remarque : Il faut une valeur de R suffisante pour avoir un diviseur de tension conséquent et ne pas être dans le bruit (des mesures pour  $R=47\text{k}\Omega$  et  $R=100\text{k}\Omega$  ont donné des résultats insatisfaisants).

On remarque que toutes les valeurs obtenues sont proches de la valeur 10  $\text{M}\Omega$  qui correspond en fait à la résistance d’entrée de l’appareil de mesure. En effet, cette résistance étant inférieure à la résistance de fuite recherchée, et comme elle vient s’appliquer en parallèle au dispositif, elle limite notre mesure et empêche d’atteindre la valeur de la résistance de fuite. Autrement dit, la valeur de la résistance de fuite étant trop élevée, toute détermination de celle-ci par une mesure de tension perturbe la mesure et devient donc impossible. Une solution pour contourner ce problème serait de déterminer le courant dans le circuit au moyen d’une sonde qui, elle, ne perturbe pas la mesure et ainsi d’accéder à la résistance de fuite.

Dans le cas de matériaux textile, les résistances de fuite sont moins élevées que pour des condensateurs. Leurs mesures pourront être effectuées éventuellement à l’aide d’une mesure de champ électrique une fois le matériau chargé. L’utilisation d’un moulin à champ pour déterminer les résistances de fuite de condensateurs ou bien de diélectriques tels que les textiles pourrait apporter une solution à notre problème.

C’est le but des expériences suivantes : l’application de la méthode de détermination de résistance de fuite, étudiée sur les condensateurs, aux diélectriques. Pour pouvoir mesurer d’importantes résistances, il est nécessaire d’utiliser le moulin à champ. En effet, la méthode étant sans contact avec le dispositif, on ne vient pas perturber la mesure.

## II-C Principe de la méthode de mesure par polarisation

Le mode de charge du textile sera la polarisation, le même phénomène qui apparaît dans la charge d'un condensateur. La décharge du textile après polarisation va nous permettre d'évaluer la résistance de fuite qu'il présente comme cela a été fait plus haut dans le cas des condensateurs. Ce paramètre pourrait s'avérer pertinent pour caractériser le matériau. Cette méthode n'est exploitable qu'à l'aide de mesures sans contact.

### 1. Utilisation du moulin à champ

Pour réaliser les mesures sans contact, nous utiliserons un capteur de champ électrostatique de type moulin à champ déjà utilisé pour les expériences précédentes.

#### a. Application de la mesure sans contact à la mesure de la résistance de fuite

Le principe de ces expériences est basé sur la mesure du champ électrique créé par un disque métallique chargé (figure II.8). Le disque est connecté à un condensateur en parallèle avec une résistance  $R$  connue ( $R$  petite par rapport à la résistance de fuite du condensateur). Par ce procédé, on impose, au dispositif, une résistance de fuite égale à la résistance  $R$ .

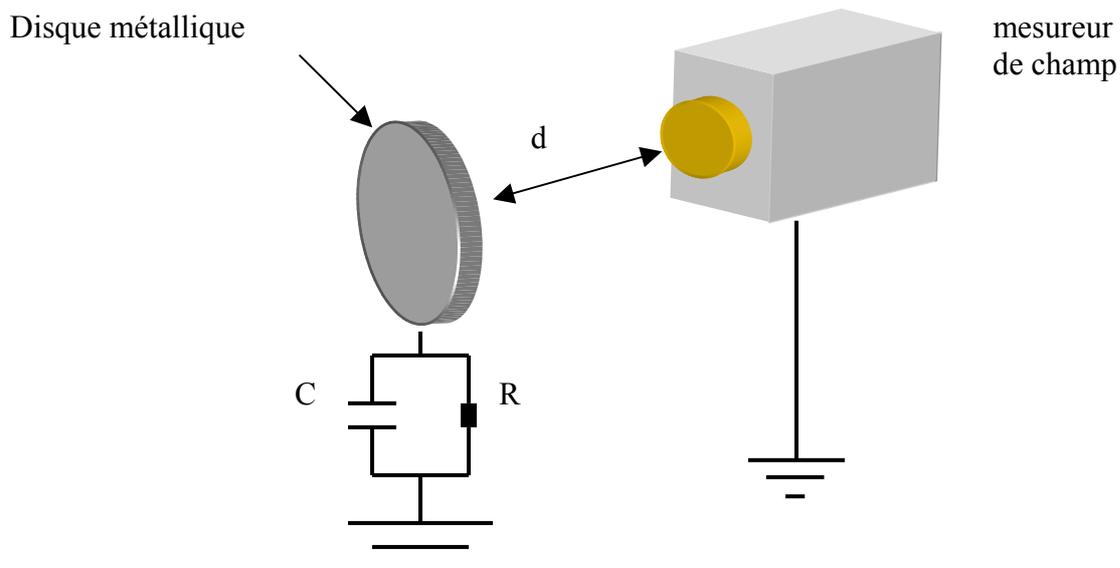


Figure II.8 – Schéma très simplifié du dispositif de mesure avec une résistance de fuite  $R$

Le condensateur utilisé est un condensateur au tantale de capacité  $C = 4,7\mu\text{F}$ . La résistance  $R$  vaut  $10\text{ M}\Omega$  puis  $20\text{ M}\Omega$ . Le but de la manipulation est de voir si l'on peut retrouver la valeur de cette résistance par mesure du champ électrique. En effet, la mesure de la décroissance du champ électrique créé par le disque, une fois chargé, va nous permettre de déterminer la constante de temps de ce circuit du premier ordre et, connaissant  $C$ , nous pouvons en déduire  $R$ . Le disque est chargé par contact, il est porté au potentiel de  $9\text{V}$ .

### b. Résultats de mesure

Les résultats obtenus sont des mesures de la décroissance du champ électrique comme le montre la courbe suivante (figure II.9). On mesure le champ électrique devant le disque métallique. Lorsqu'il n'est pas encore chargé, le niveau de champ est proche de zéro, on applique alors par contact une tension de  $9\text{V}$  sur le disque que l'on retire immédiatement, on mesure alors la décroissance du champ qui évolue selon la constante de temps du circuit.

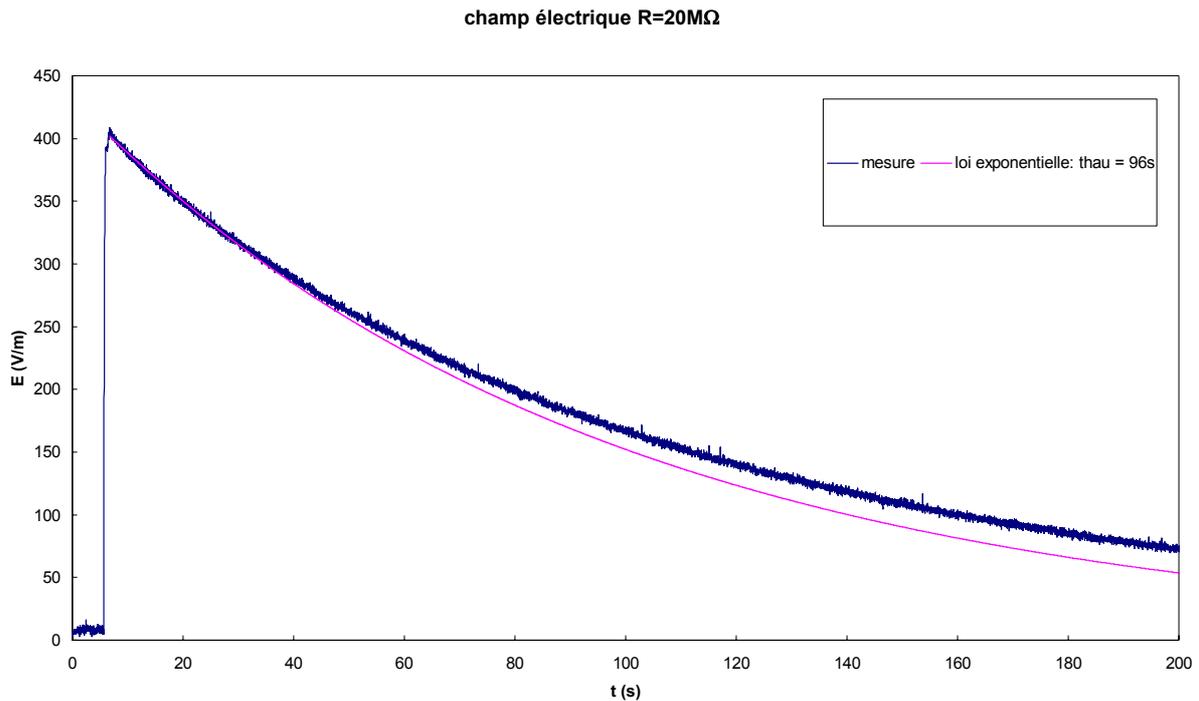


Figure II.9 – Mesure de la décroissance du champ électrique créé par le disque métallique

La détermination des constantes de temps associées est faite de manière graphique. On calcule ensuite la résistance de fuite selon la relation :  $\tau=RC$ . Sur la figure II.9, nous avons également représenté la courbe théorique correspondant à une décroissance exponentielle du champ électrique avec une constante de temps  $\tau$  égale à la constante de temps déterminée graphiquement pour la résistance de  $20\text{ M}\Omega$ . On observe que la mesure est en bon accord avec la théorie, surtout pendant les premiers instants de la décroissance : environ **40s**. Ensuite la

courbe théorique s'écarte de la mesure, ceci étant probablement dû aux effets de bords, un anneau de garde autour de l'objectif du moulin améliorerait certainement la mesure. En outre, l'influence du moulin à champ sur la mesure n'est pas sans effet, sa présence perturbe la distribution des charges à la surface du disque (cf. annexe A). Les calculs des résistances sont donnés dans le tableau II.2 :

R (utilisée)	Constante de temps $\tau$	R (mesurée)
10 M $\Omega$	46 s	9,8 M $\Omega$
20 M $\Omega$	96 s	20,4 M $\Omega$

Tableau II.2 – Comparaison entre les valeurs de résistances utilisées et les mesures

Les résultats obtenus montrent une bonne correspondance entre les valeurs mesurées et les valeurs de référence. On peut donc espérer utiliser cette méthode de détermination pour mesurer les résistances de fuite de certains matériaux tels que les textiles.

## 2. Application de la méthode aux échantillons textiles

L'idée est de réaliser un condensateur plan à l'aide de deux disques métalliques et d'un échantillon de textile qui jouera le rôle de diélectrique. L'application d'une différence de potentiel entre les deux plaques permettra de polariser le textile. Le but est d'analyser le comportement de ce textile et d'en déterminer ses caractéristiques en mesurant la décroissance du champ électrique à l'aide du moulin à champ.

Le principe de la mesure est illustré par la photo du dispositif de la figure II.10 :

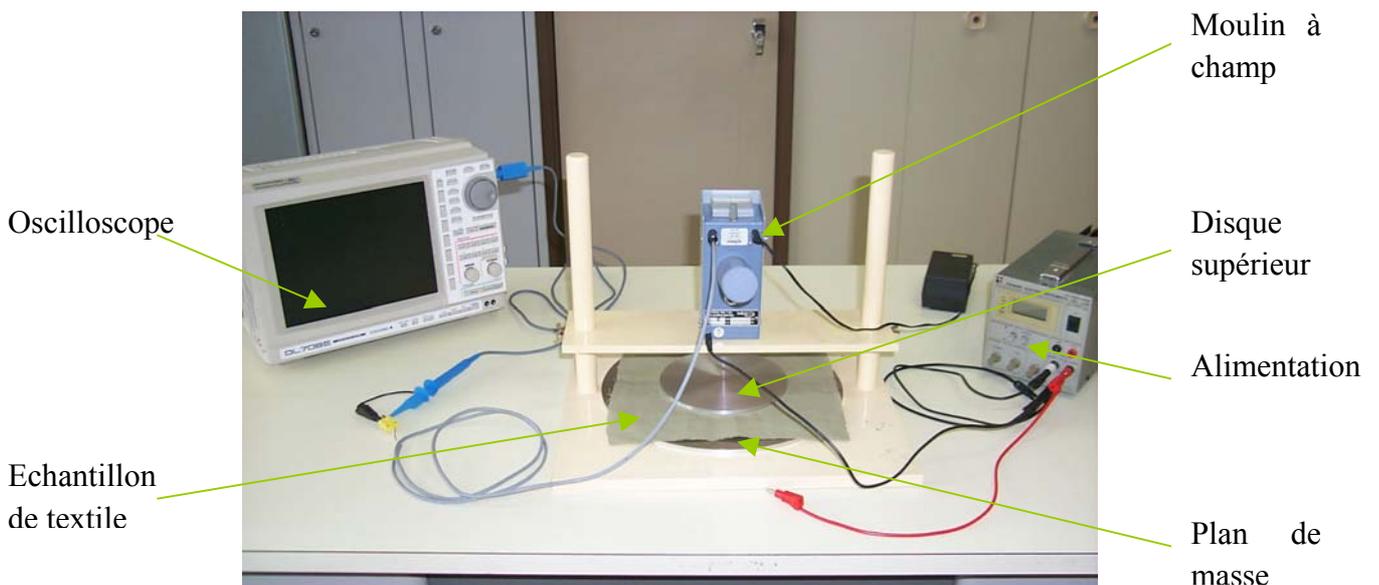


Figure II.10 – Dispositif de mesure par polarisation

On se place dans l'hypothèse d'un condensateur plan et on réalise un circuit RC du premier ordre. L'utilisation d'un mesureur de champ va nous permettre de suivre l'évolution du champ électrique au-dessus de la plaque supérieure. L'idée est de déterminer la résistance de fuite du textile par la mesure de la constante de temps du système en connaissant la capacité du condensateur réalisé.

La mesure se fait en plusieurs étapes :

- On détermine d'abord la capacité du condensateur réalisé à l'aide d'une mesure faite en court-circuitant le condensateur avec une résistance connue.
- Ensuite on détermine la constante de temps de ce système du premier ordre en mesurant la décroissance du champ électrique après la charge du condensateur par une mesure sans contact (moulin à champ).
- Enfin la connaissance de ces deux paramètres permet de calculer la résistance de fuite du condensateur, dû en particulier au textile le constituant.

### **3. Exemple d'application de la méthode sur des échantillons textiles composés majoritairement de chlorofibres**

Plusieurs échantillons de textiles composés de chlorofibres majoritairement ont été utilisés pour évaluer quelques caractéristiques liées aux matériaux eux-mêmes, mais également à la méthode d'essai. Ainsi, la première partie concerne l'effet de l'épaisseur du diélectrique composant le condensateur et son influence sur la constante de temps. Ensuite la seconde partie porte sur les limites de la méthode d'essai liées aux appareils utilisés et la solution envisageable pour résoudre ce problème.

#### **a. Influence de l'épaisseur de diélectrique**

##### **Principe**

On utilise plusieurs disques diélectriques (disques de tissu de 16 cm de diamètre) que l'on superpose pour faire varier l'épaisseur entre les armatures du condensateur créé. La mesure reste celle déjà réalisée plusieurs fois, à savoir, une mesure de champ électrique à l'aide du moulin à champ, pour déterminer le temps de décroissance de ce champ et ainsi la constante de temps du système. Deux types d'expériences ont été réalisés ; la première est une mesure du champ d'un condensateur réalisé avec différentes épaisseurs de textile, dans le cas de la seconde une résistance de fuite connue est imposée au système.

**1<sup>ère</sup> série d'expériences**

On applique manuellement (par contact) une tension de 9V entre le disque supérieur et le plan de masse. On mesure ensuite la décroissance du potentiel à l'aide du moulin à champ. On fait varier l'épaisseur de diélectrique entre les armatures en superposant successivement 1, 2, 3 et 4 disques de textile.

*résultats :*

Les résultats de mesure de constantes de temps déterminées graphiquement à l'aide des relevés de champs électriques sont donnés dans le tableau II.3 suivant :

Epaisseur de tissu	de	1 épaisseur	2 épaisseurs	3 épaisseurs	4 épaisseurs
Constante temps $\tau$	de	~ 500 ms	~ 407 ms	~ 450 ms	~ 430 ms

*Tableau II.3 – Constantes de temps mesurées en fonction de l'épaisseur de l'échantillon*

On remarque que les valeurs obtenues restent constantes au fur et à mesure que l'on augmente l'épaisseur de diélectrique.

*interprétation :*

La capacité du condensateur réalisé est donnée par :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{e} \tag{II.12}$$

- avec :
- $\epsilon_0$  : permittivité du vide
  - $\epsilon_r$  : constante diélectrique
  - S : surface du disque métallique supérieur
  - e : épaisseur du diélectrique

La résistance de fuite dépend du diélectrique, dans l'hypothèse d'un diélectrique homogène, elle est donnée par :

$$R = \frac{\rho e}{S} \tag{II.13}$$

avec : -  $\rho$  : résistivité volumique du diélectrique  
-  $e$  : épaisseur du diélectrique  
-  $S$  : surface du diélectrique

On remarque alors que la valeur de la constante de temps donnée par  $\tau=RC$  est indépendante de l'épaisseur  $e$  de diélectrique. Ce qui explique que  $\tau$  reste constant lorsque que l'on augmente l'épaisseur de diélectrique.

## 2<sup>ème</sup> série d'expériences

Pour pouvoir déterminer la résistance de fuite du diélectrique à partir de la mesure de la constante de temps, il faut connaître au préalable la capacité du condensateur ainsi réalisé. Cela correspond à la deuxième étape de la méthode par polarisation, elle se fait au moyen de résistances de fuites connues et de mesures à l'oscilloscope.

### montage :

Dans cette partie, on impose une résistance de fuite de  $20\text{ M}\Omega$  (deux résistances de  $10\text{ M}\Omega$  en série) puis de  $1\text{ M}\Omega$  au condensateur comme le montre la figure II.11

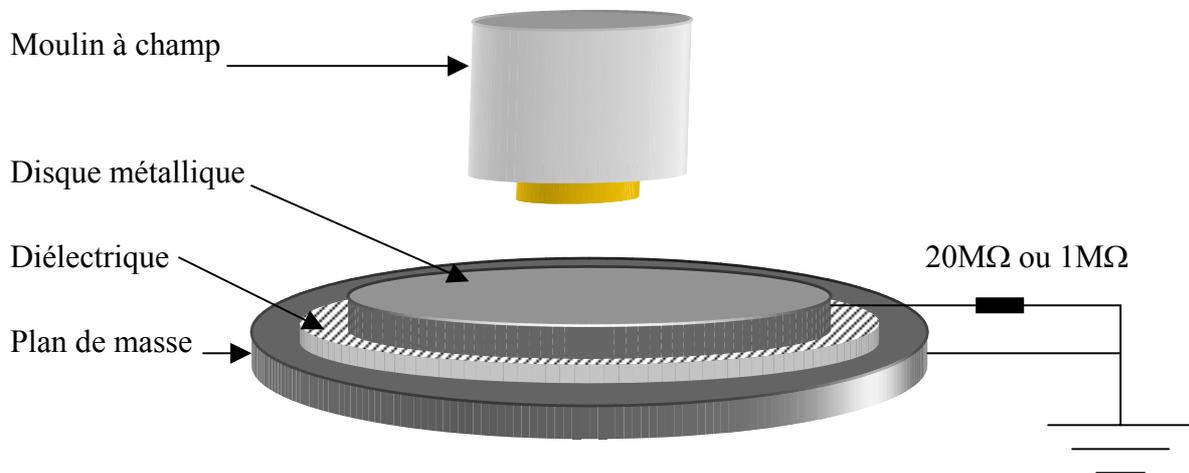


Figure II.11 – montage avec résistance de fuite de  $20\text{ M}\Omega$  et  $1\text{ M}\Omega$

La décharge se fait alors principalement au travers de la résistance ajoutée. Ainsi, connaissant la constante de temps du système, on est en mesure d'évaluer la capacité du condensateur réalisé.

résultats :

Epaisseur de diélectrique	de	1 épaisseur	2 épaisseurs	3 épaisseurs	4 épaisseurs
Constante temps $\tau$	de	~ 163 ms	~ 145 ms	~ 136 ms	~ 136 ms

*Tableau II.4 – Constantes de temps mesurées en fonction de l'épaisseur de l'échantillon pour une résistance de 20 M $\Omega$*

Epaisseur de diélectrique	de	1 épaisseur	2 épaisseurs	3 épaisseurs	4 épaisseurs
Constante temps $\tau$	de	~ 113 ms	~ 131 ms	~ 122 ms	~ 118 ms

*Tableau II.5 – Constantes de temps mesurées en fonction de l'épaisseur de l'échantillon pour une résistance de 1 M $\Omega$*

On observe encore une fois que les constantes de temps sont du même ordre lorsque l'on augmente l'épaisseur de diélectrique.

interprétation :

Dans ce cas de figure, la constante de temps ne devrait pas être indépendante de l'épaisseur du diélectrique. En effet, la résistance de fuite étant constante et connue, lorsque l'on augmente l'épaisseur du diélectrique, on modifie la capacité du condensateur et donc la constante de temps. On s'attendrait donc à avoir un rapport inversement proportionnel entre la constante de temps et l'épaisseur du diélectrique, le fait de doubler l'épaisseur devrait diviser par 2 la constante de temps. Or ce n'est pas ce que l'on constate. Il semblerait donc que d'autres paramètres entrent en ligne de compte. Il est très probable que la superposition des divers disques de tissu induit des capacités parasites (dû à l'espace entre deux disques par exemple) que l'on ne prend pas en considération ici. L'utilisation du mesureur de champ peut lui aussi être à l'origine de ces écarts, son influence fera donc l'objet de la partie suivante

#### **b. Limite d'utilisation du moulin à champ**

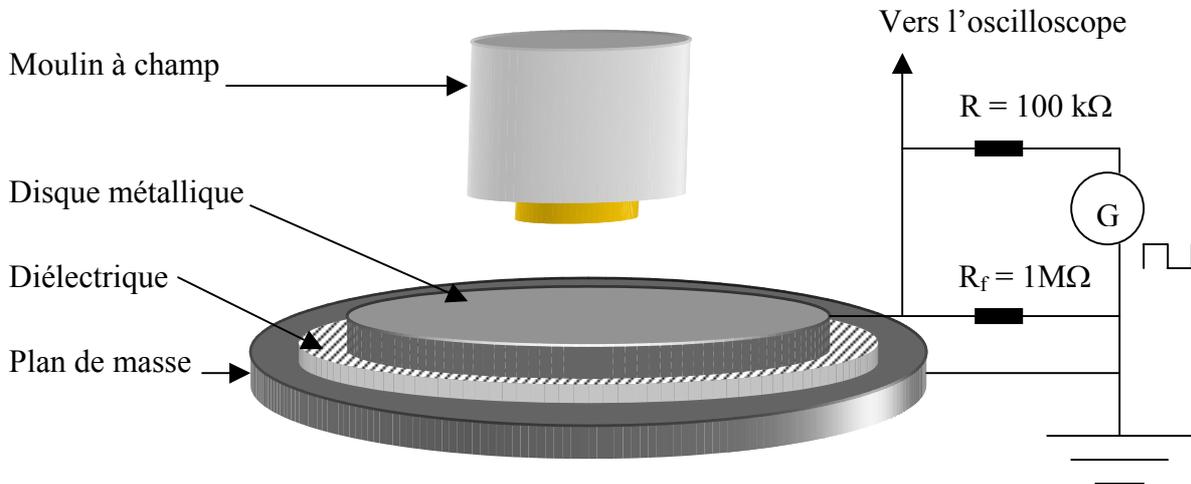
Lorsque nous imposons une résistance de fuite comme précédemment, nous fixons un des paramètres du système et nous pouvons alors déterminer la capacité du condensateur en mesurant sa constante de temps. Dans les expériences qui suivent nous tentons de déterminer cette capacité par deux méthodes : l'utilisation du moulin à champ et la mesure directe de la tension aux bornes de la résistance de fuite à l'aide d'un oscilloscope.

**1<sup>ère</sup> série d'expériences**

L'utilisation ici de l'étude de la réponse à un train d'impulsions carrées, comme dans le paragraphe II-B.3, est faite en vue de comparer les deux moyens de mesure que nous avons en notre possession : la mesure directe à l'oscilloscope et la mesure sans contact avec le moulin à champ.

montage :

Le montage réalisé (figure II.12) combine donc les deux moyens de mesure pour observer la réponse du condensateur, réalisé avec un échantillon de textile, à un train d'impulsions carrées.



*Figure II.12 – montage du système soumis à un train d'impulsions carrées : mesures avec moulin à champ et oscilloscope*

On applique un signal carré d'amplitude 10V. On mesure ensuite les charges et décharges successives du condensateur à l'aide du moulin à champ et par mesure directe de la tension aux bornes du condensateur. Deux mesures ont été effectuées : la première à une fréquence du signal carré de 10kHz et la seconde à 0.8Hz.

résultats :

On observe (figure II.13) que lorsque la fréquence du signal est trop élevée, dans le cas du premier essai, le moulin à champ n'arrive pas à suivre les variations du champ électrique, on observe alors une valeur constante du champ d'environ **300 V/m**.

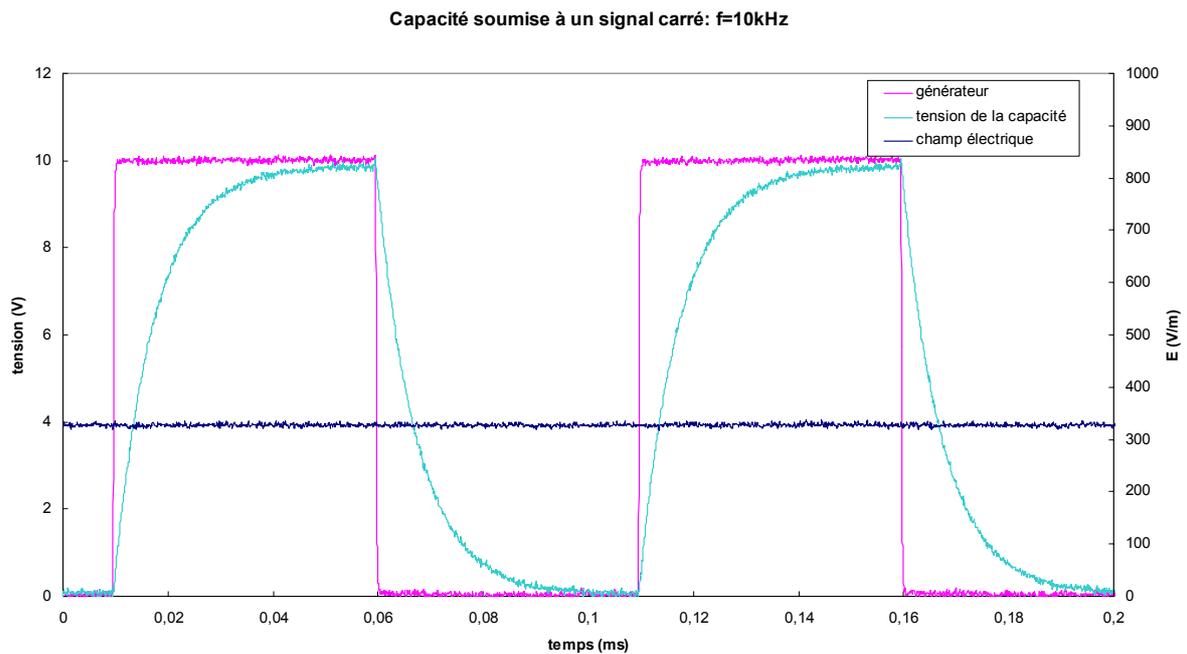


Figure II.13 – Résultats de mesure de la réponse d'un condensateur avec diélectrique textile à un train d'impulsions carrées : fréquence de 10 kHz

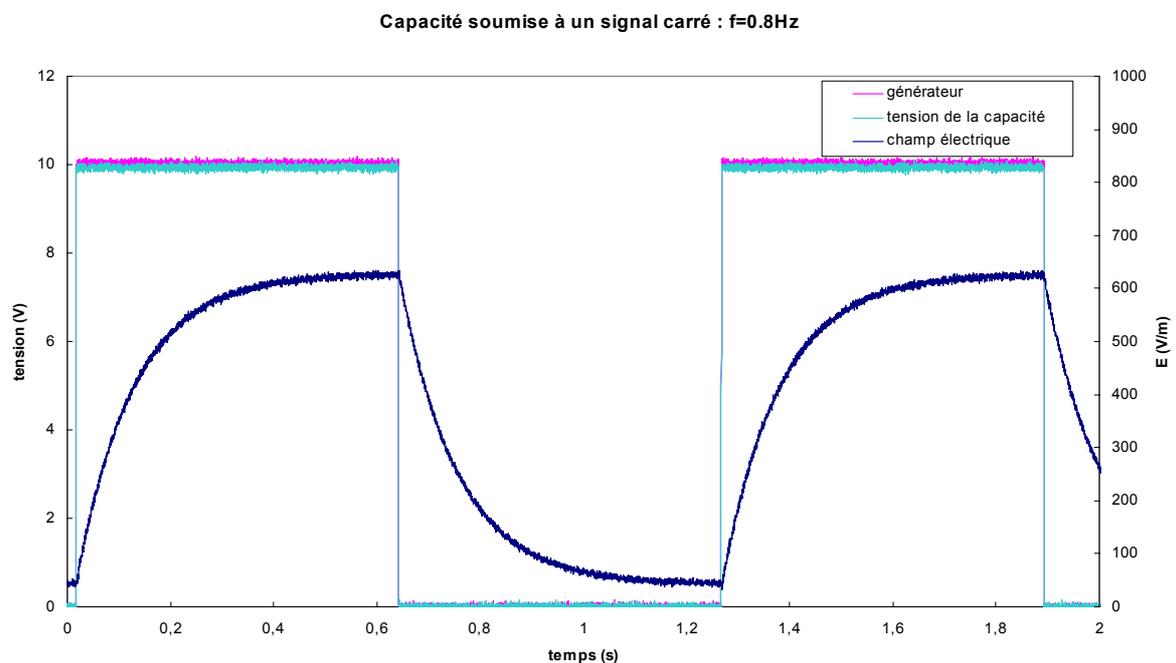


Figure II.14 – Résultats de mesure de la réponse d'un condensateur avec diélectrique textile à un train d'impulsions carrées : fréquence de 0,8 Hz

Le second essai (figure II.14) montre qu'en présence d'une variation du champ électrique suffisamment lente, le moulin peut suivre les variations du champ, mais on ne peut pas déterminer la constante de temps car celle observée est imposée par le moulin et ne correspond pas à celle du circuit.

Cela explique pourquoi lorsque l'on imposait la résistance de fuite au circuit, les mesures de constantes de temps donnaient des valeurs qui ne variaient presque pas. En fait, les constantes de temps étaient limitées par celle du circuit interne du moulin à champ.

Pour pouvoir s'affranchir de cette contrainte il est alors nécessaire de faire les mesures au moyen de l'oscilloscope, lorsque le phénomène est trop rapide, et non avec le moulin à champ. C'est le but des expériences suivantes.

### 2<sup>ème</sup> série d'expériences

On mesure les charges et décharges du condensateur uniquement par relevé direct de la tension à ses bornes et ceci pour différentes valeurs d'épaisseur de diélectrique comme pour les expériences du paragraphe précédent.

#### montage :

Le moulin à champ n'est pas utilisé dans ce cas de figure. Les mesures sont faites à l'aide de l'oscilloscope pour déterminer les capacités obtenues avec les différentes épaisseurs de textile.

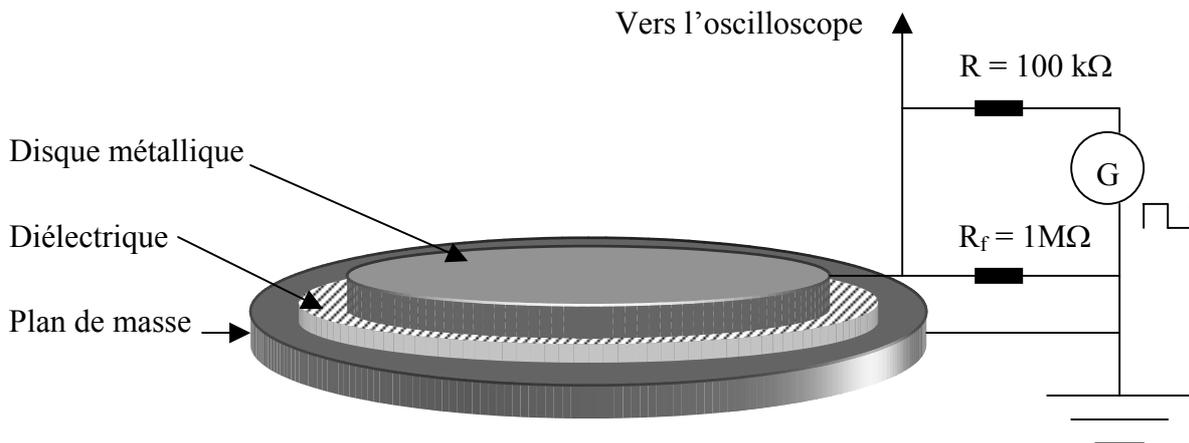


Figure II.15 – Schéma du montage avec mesure directe à l'oscilloscope

On applique un signal carré d'amplitude 10V. La fréquence est choisie de telle sorte que l'on puisse visualiser les charges et décharges successives du condensateur, dans le but de pouvoir déterminer graphiquement la constante de temps.

résultats :

Les résultats de constantes de temps pour les différentes épaisseurs de textile sont donnés dans le tableau suivant :

Epaisseur de tissu	de	1 épaisseur	2 épaisseurs	3 épaisseurs	4 épaisseurs
Fréquence signal	du	4 kHz	7.5 kHz	10 kHz	10 kHz
Constante temps $\tau$	de	$\sim 21.25 \mu\text{s}$	$\sim 13.75 \mu\text{s}$	$\sim 10 \mu\text{s}$	$\sim 8.57 \mu\text{s}$

*Tableau II.6 – Constantes de temps mesurées en fonction de l'épaisseur de l'échantillon (la fréquence du signal utilisé est donnée pour indication)*

Les constantes de temps obtenues cette fois varient avec l'épaisseur du diélectrique ce qui était prévisible compte tenu de la remarque du paragraphe précédent.

interprétation :

On observe une évolution conforme à la théorie, c'est-à-dire que la constante de temps diminue lorsque l'épaisseur de diélectrique augmente, ceci pour une résistance de fuite imposée et constante. Seulement, en théorie, lorsque l'on double l'épaisseur du diélectrique, la capacité doit être divisée par deux, et donc la constante de temps également. Or ce n'est pas ce que l'on observe : la diminution entre une et deux épaisseurs de tissu est de 38% au lieu de 50% en théorie. Cela s'explique probablement par le fait que nous ne sommes pas en présence d'un diélectrique homogène, le fait de superposer plusieurs échantillons de tissu induit des capacités parasites qu'il faudrait prendre en compte. Cela se vérifie clairement par le fait que cette dérive vis-à-vis de la théorie s'accroît à mesure que l'on augmente le nombre d'échantillons superposés.

Par ailleurs, les constantes de temps mesurées par cette méthode permettent de déterminer la capacité du condensateur réalisé avec le textile puisque la résistance de fuite est connue.

On peut déterminer la capacité C par la relation :

$$\tau = R_{//}C \tag{II.14}$$

où la valeur de  $R_{//}$  correspond à R en parallèle avec  $R_f$  (figure II.15).

Connaissant ces capacités, il devient alors possible de déterminer les résistances de fuite des textiles grâce aux premières mesures de constante de temps effectuées. Le tableau suivant donne les valeurs calculées à partir de ces données.

Epaisseur de diélectrique	1 épaisseur	2 épaisseurs	3 épaisseurs	4 épaisseurs
Capacité C	233.8 pF	151.3 pF	110 pF	94.3 pF
Résistance de fuite	$2.1 \times 10^9 \Omega$	$2.7 \times 10^9 \Omega$	$4.1 \times 10^9 \Omega$	$4.6 \times 10^9 \Omega$

*Tableau II.7 – Capacités et résistances de fuite mesurées en fonction de l'épaisseur de l'échantillon*

### **Conclusions**

On voit donc que les deux méthodes mises en œuvre sont complémentaires. En effet, l'utilisation du moulin à champ permet de mesurer de fortes résistances de fuite car il n'influence pas, ou très peu, le système (en réalité, le moulin à champ a une influence sur le système puisqu'il apporte une capacité qui va perturber la mesure de la décharge du condensateur étudié, ce point est développé dans l'annexe A). Cependant, il faut au préalable connaître la capacité du système, celle-ci peut être calculée en imposant une fuite connue, mais dans ce cas, les phénomènes de charge et décharge sont trop rapides pour le moulin à champ, il est alors nécessaire d'utiliser un oscilloscope pour mesurer ces grandeurs.

La combinaison de ces deux méthodes nous permet finalement d'évaluer la résistance de fuite des échantillons de textile. On peut se demander alors si les valeurs de résistances mesurées correspondent bien à des résistances électriques transversales des textiles. Il est donc intéressant de comparer les valeurs que l'on peut obtenir avec des valeurs de mesure de résistances transversales.

## II-D Application aux matières textiles et mesures de résistances transversales

Les expériences suivantes permettent de comparer deux méthodes de mesure : la méthode, présentée dans le paragraphe précédent, développée avec les disques métalliques et la méthode de mesure de résistance transversale proposée par la norme EN 1149-2 [11]. Ces deux méthodes nous fournissent des informations sur la résistance des textiles, il est donc intéressant de pouvoir les comparer. Cette étude faite sur plusieurs textiles différents permet d'avoir un aperçu des comportements des différents textiles pour les deux méthodes de mesure. En outre, dans l'optique de mesures normatives, une étude statistique est également développée pour évaluer leur reproductibilité.

### 1. Mesure de la résistance transversale selon la norme EN 1149-2

Le principe de cette méthode d'essai est détaillé ci-dessous. Elle est appliquée ensuite aux échantillons de textiles précédents (chlorofibre majoritaire). Ces résultats sont alors comparés aux résultats obtenus avec la méthode utilisant les disques métalliques et le moulin à champ.

#### a. Principe de la méthode d'essai

La méthode d'essai a déjà été présentée rapidement au paragraphe I-D.2 du chapitre I. Tous les détails peuvent être consultés dans la référence [11]. La figure ci-dessous (figure II.16) illustre de manière schématique le principe de cette méthode d'essai. Cette méthode correspond à la détermination de la résistance électrique à travers un matériau textile à l'aide d'électrodes spécifiques. Les électrodes (électrode de mesure et plaque conductrice) sont placées de part et d'autre du textile. Une tension continue  $U$  est appliquée entre la plaque conductrice et l'électrode de mesure, la résistance  $R$  est alors déterminée à l'aide de la mesure à l'ampèremètre (ou électromètre) du courant  $I$  en appliquant la loi d'ohm :

$$R = \frac{U}{I} \quad (\text{II.15})$$

Dans un souci de reproductibilité il est nécessaire de faire le relevé de la valeur de la résistance 15s. après l'application de la tension.

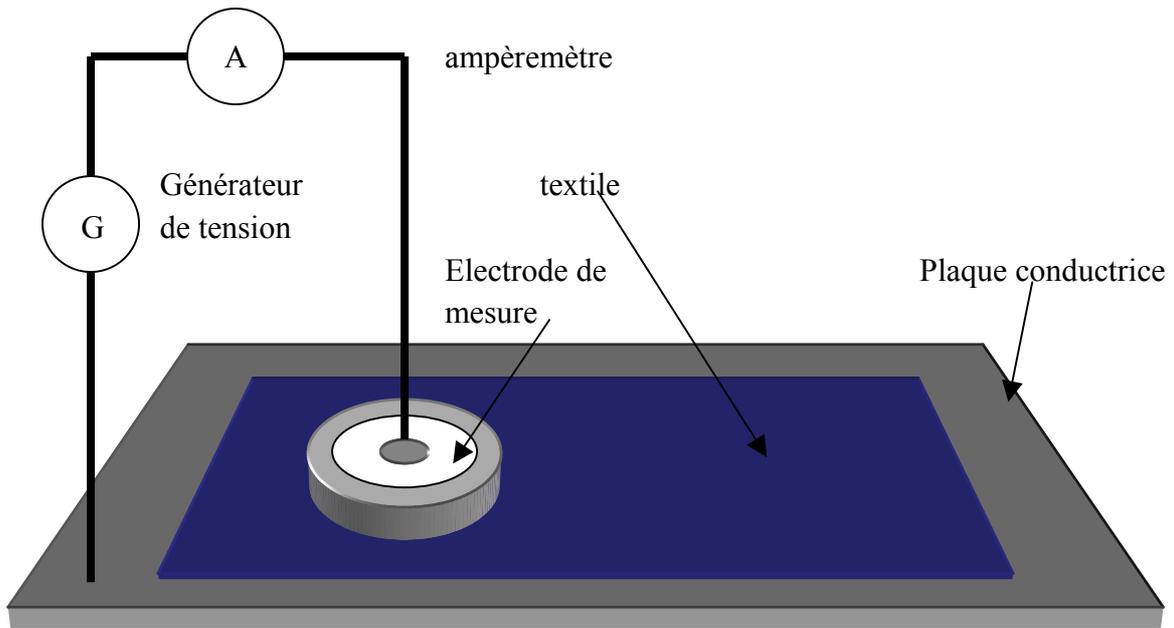


Figure II.16 – Principe de mesure de résistance transversale selon la norme EN 1149-2

### Conditions expérimentales pour nos mesures

On applique une tension de 100V au niveau du disque métallique inférieur (figure II.17). L'électrode supérieure permet de mesurer le signal, elle est reliée à un électromètre. L'électromètre utilisé est un électromètre de marque ELTEX (Tera-Ohm-Meter 6206). C'est un appareil qui présente une impédance d'entrée très élevée ( $>10^{14} \Omega$ ) et qui permet la mesure de valeurs de résistances variant entre  $10^3 \Omega$  à  $10^{14} \Omega$ .

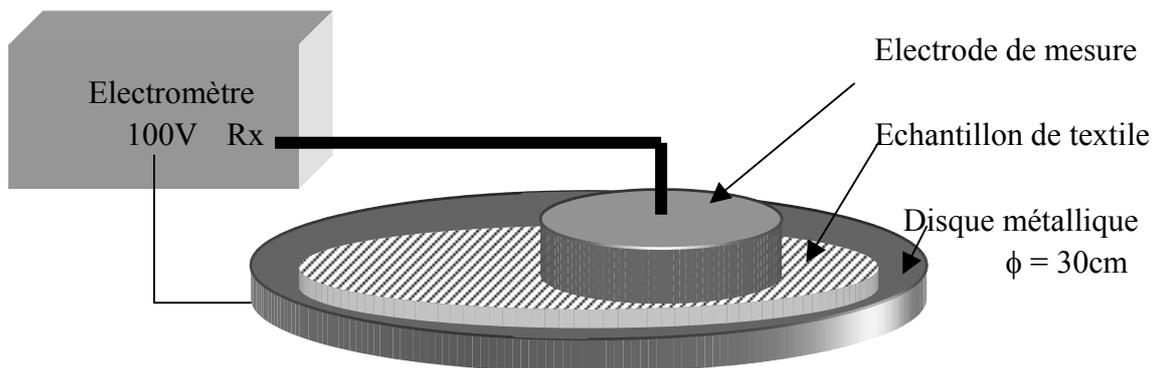


Figure II.17 – Configuration d'essai établie selon la norme EN 1149-2

On fait le relevé de la résistance au bout d'un temps de 15 secondes. Dans la norme, il est nécessaire de faire plusieurs mesures et d'en donner la moyenne. Dans notre cas, nous ne faisons qu'une mesure à chaque fois.

**b. Application de la méthode aux textiles à base de chlorofibres**

Lors des mesures précédentes, nous avons déterminé quelques valeurs de résistances d'échantillons de textile à base de chlorofibres au moyen de la méthode utilisant le moulin à champ. Le but des mesures suivantes est de comparer les résultats obtenus par cette méthode avec ceux donnés par la méthode de la norme EN 1149-2.

Le tableau suivant donne les résultats obtenus pour les deux méthodes :

Epaisseur de diélectrique	1 épaisseur	2 épaisseurs	3 épaisseurs	4 épaisseurs
Résistance par la méthode EN 1149-2	$9.1 \times 10^8 \Omega$	$1.28 \times 10^9 \Omega$	$1.68 \times 10^9 \Omega$	$3.06 \times 10^9 \Omega$
Résistance par la méthode du moulin à champ	$2.1 \times 10^9 \Omega$	$2.7 \times 10^9 \Omega$	$4.1 \times 10^9 \Omega$	$4.6 \times 10^9 \Omega$

*Tableau II.8 – Comparaison entre les résistances mesurées selon la méthode normalisée et celles mesurées au moyen de la méthode utilisant le moulin à champ*

Les résistances obtenues avec la méthode EN 1149-2 sont toujours inférieures à celles données par la mesure de la fuite, le rapport des valeurs étant compris entre 2 et 3 environ, sauf pour l'expérience avec 4 épaisseurs d'échantillon où le rapport est d'environ 1,5. En fait, il faut garder à l'esprit que l'électrode utilisée avec l'électromètre est nettement plus lourde que le disque utilisé dans la méthode du moulin à champ. L'électrode exerce alors une pression plus grande sur les échantillons de textile, ce qui améliore le contact avec le textile et favorise probablement la circulation des charges électriques.

**2. Mesures de résistances de quelques textiles : utilisation comparée des deux méthodes.**

Nous avons à ce stade deux méthodes de mesure de résistance électrique que nous pouvons appliquer aux matériaux textiles. La suite de notre travail va consister à l'application de ces méthodes sur des échantillons de textiles différents du point de vue de la composition et de la structure. Nous pourrions ainsi évaluer la dispersion des résultats et comparer les deux moyens de mesure en notre possession.

**a. Conditions expérimentales**

La méthode du moulin à champ se déroule toujours selon deux étapes comme il a été vu au paragraphe II-C. Les échantillons de textiles utilisés diffèrent selon leur composition, ils sont présentés ci-dessous :

1. 100% polyester
2. 100% coton
3. 100% laine
4. 55% lin / 45% coton
5. Jersey 100% Promix (caséine de lait)
6. Crêpe satin 100% soie

Les précisions sur leur état structural et leurs compositions internes ont été données dans le chapitre I, paragraphe I-5.2 (sauf pour l'échantillon 5 qui est un échantillon proche de la soie dans sa structure). Les résultats ont été obtenus dans des conditions expérimentales maintenues invariantes, soit :

- temps sec (mesure de l'hygrométrie impossible)
- tensions appliquées : 9V pour la méthode du moulin à champ et 100V pour la méthode normalisée (EN 1149-2)
- le disque supérieur utilisé pour la méthode du moulin à champ est un disque métallique de 16 cm de diamètre placé à une distance de 3 cm environ du moulin à champ.

**b. Résultats des mesures de résistances**

Les résultats concernant les constantes de temps et les capacités des condensateurs, obtenus par la méthode du moulin à champ sont présentés dans le tableau suivant :

Echantillon	Constante de temps (s)	Capacité (pF)
Polyester	339.7	561
Coton	3.8	418
Laine	188.6	418
Lin/coton	1.8	418
Promix	121.6	517
Soie	235.1	561

*Tableau II.9 – Valeurs des constantes de temps et des capacités mesurées avec le condensateur selon le textile utilisé*

Les calculs de résistance et les valeurs obtenues avec la méthode de la norme sont donnés ci-après :

Echantillon	Méthode du moulin à champ ( $\Omega$ )	Méthode EN 1149-2 ( $\Omega$ )
Polyester	$6.1 \times 10^{11}$	$4.8 \times 10^{11}$
Coton	$9.1 \times 10^9$	$1.9 \times 10^{10}$
Laine	$4.5 \times 10^{11}$	$5.0 \times 10^{11}$
Lin/coton	$4.3 \times 10^9$	$3.2 \times 10^9$
Promix	$2.4 \times 10^{11}$	$6.0 \times 10^{11}$
Soie	$4.2 \times 10^{11}$	$7.0 \times 10^{11}$

*Tableau II.10 – Comparaison entre les valeurs de résistances obtenues avec les deux méthodes sur les échantillons de textile*

Les résultats obtenus avec les deux méthodes sont visiblement très proches quel que soit le type de textile. Cela confirme les premiers résultats obtenus avec les échantillons de chlorofibre.

### **3. Etude statistique**

Pour faire cette étude, nous avons choisi de prendre deux échantillons dont les valeurs de résistance sont assez éloignées, en l'occurrence : le polyester et le lin/coton. Toutes les mesures ont été effectuées durant la même journée pour s'affranchir le plus possible des fluctuations des conditions atmosphériques. Pour chaque échantillon, 40 mesures ont été faites avec la méthode du moulin à champ et 40 autres avec la méthode EN 1149-2.

#### **a. Résultats des mesures**

Les résultats obtenus sont présentés sur les graphiques des figures II.18, II.19, II.20 et II.21, où figure également la valeur moyenne de résistance calculée sur l'ensemble des mesures ainsi que les valeurs correspondant à la moyenne plus un écart type et à la moyenne moins un écart type (en violet sur les courbes).

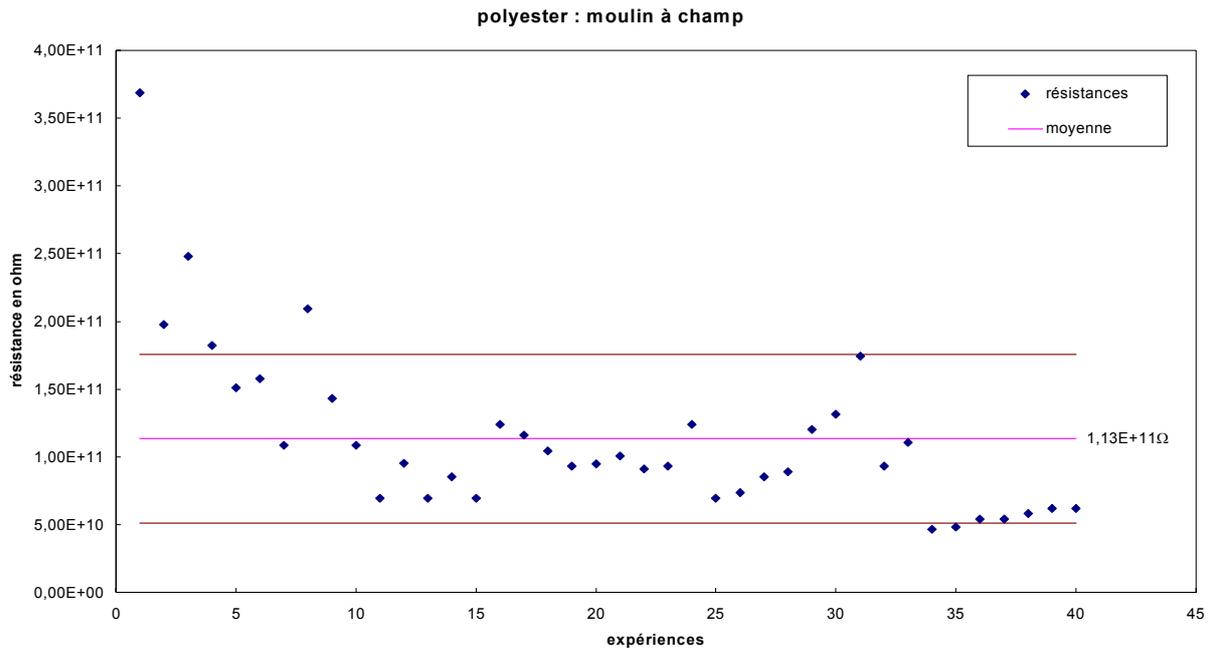


Figure II.18 – résultats statistiques sur 40 expériences pour le polyester (méthode avec moulin à champ) : représentation de la moyenne encadrée avec +/- 1 écart type

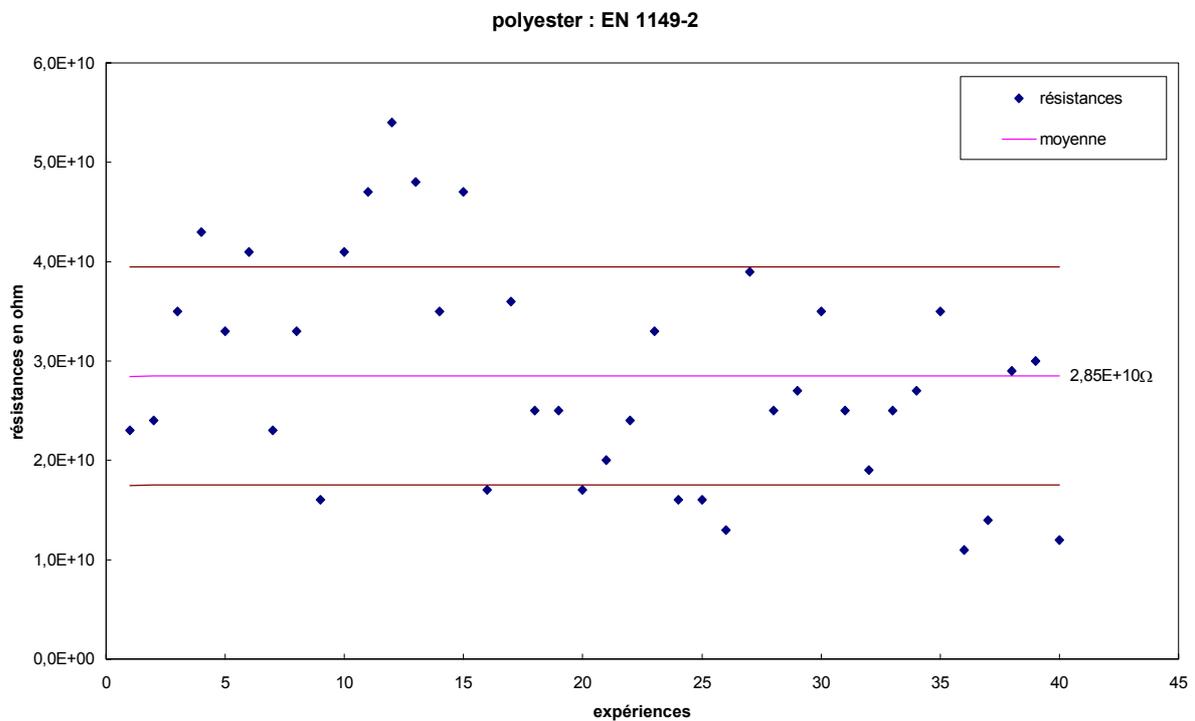


Figure II.19 - résultats statistiques sur 40 expériences pour le polyester (méthode selon EN1149-2) : représentation de la moyenne encadrée avec +/- 1 écart type

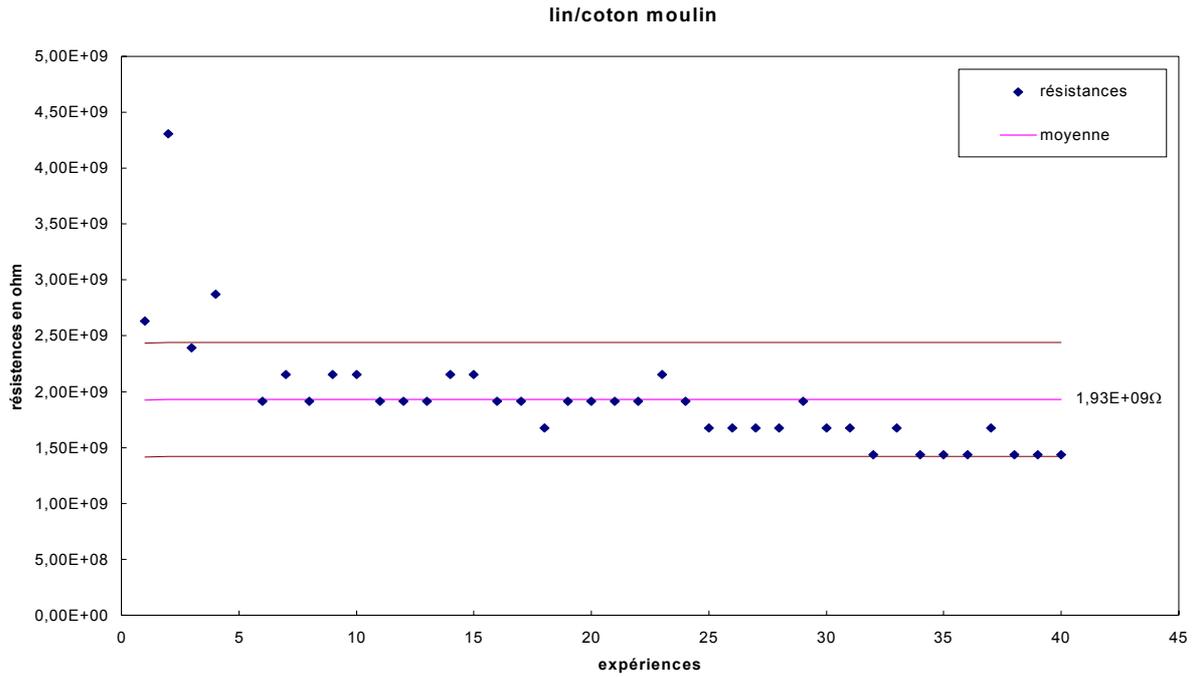


Figure II.20 - résultats statistiques sur 40 expériences pour le lin/coton (méthode avec moulin à champ) : représentation de la moyenne encadrée avec +/- 1 écart type

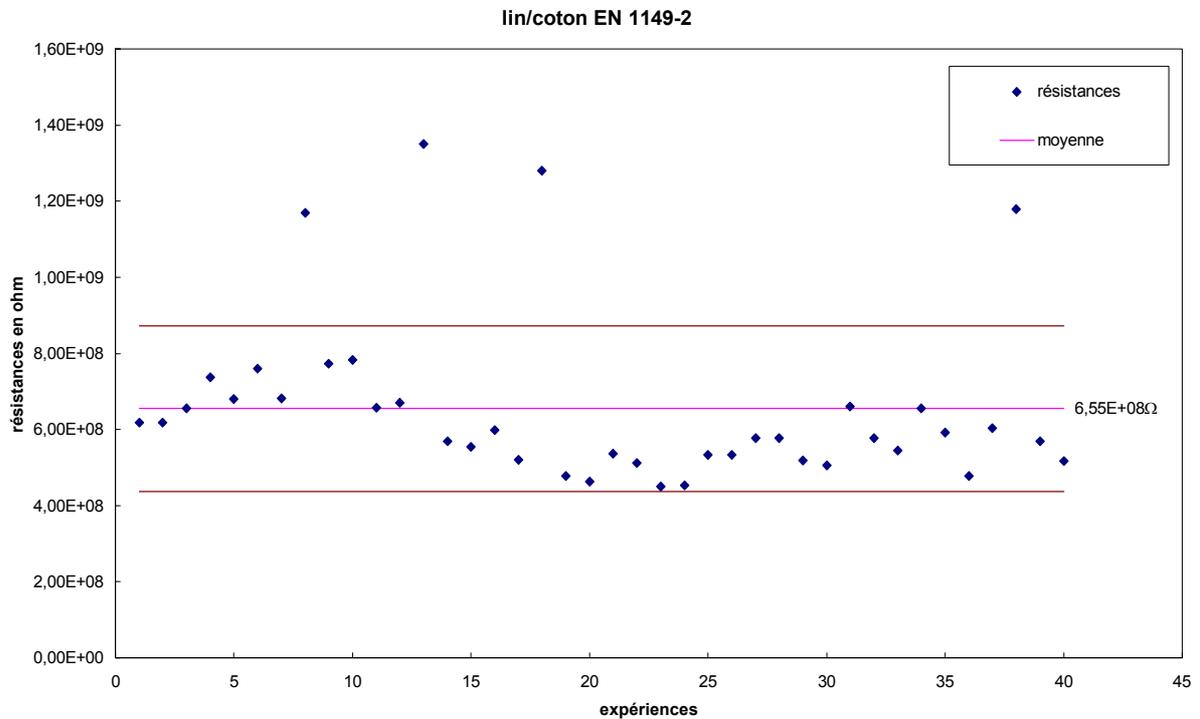


Figure II.21 - résultats statistiques sur 40 expériences pour le lin/coton (méthode selon EN1149-2) : représentation de la moyenne encadrée avec +/- 1 écart type

**b. Commentaires**

Les mesures ont été faites, selon les protocoles présentés précédemment, dans les conditions du laboratoire mais avec un temps plus humide que pour les mesures précédentes, l'atmosphère ne pouvant pas être contrôlée. On peut remarquer que les valeurs trouvées pour les deux échantillons sont plus faibles que lors des mesures précédentes, ceci étant probablement dû aux conditions plus humides.

Les valeurs de résistance obtenues avec la méthode normalisée sont plus dispersées que celles de la méthode du moulin à champ, on observe que les valeurs sont plus concentrées autour de la résistance moyenne pour cette dernière. Par ailleurs l'évolution générale des mesures montre une tendance décroissante ; en effet, les valeurs de résistance obtenues en fin d'expérience sont globalement inférieures à la moyenne alors qu'en début d'expérience elle sont globalement supérieures, et ceci pour les deux méthodes. Nous pouvons attribuer ce comportement à deux causes différentes, les deux causes pouvant contribuer à cette évolution. Premièrement les manipulations se sont déroulées pendant une journée entière dans un local où l'atmosphère n'était pas contrôlée, nous n'étions donc pas à l'abri d'une évolution des conditions climatiques, comme une augmentation de l'hygrométrie ambiante, pouvant expliquer cette décroissance générale. Deuxièmement, le grand nombre de mesures successives entraîne une modification de la surface des échantillons ; une certaine quantité de contaminants, de charges électriques résiduelles polluent cette surface et améliorent la « conductivité » électrique entraînant ainsi une diminution de la résistance électrique. En toute rigueur et pour éviter le problème, il aurait fallu faire les mesures en s'assurant de l'élimination de ces charges entre chaque manipulation, en utilisant par exemple un ionisateur à air. Enfin, les valeurs obtenues pour les deux méthodes présentent un écart comme dans le cas des échantillons de chlorofibre au paragraphe II-D.1.b: la méthode du moulin à champ donnant des valeurs supérieures à celles de la norme EN 1149-2. Cet écart représente en fait un rapport de 3 environ entre les deux méthodes. Pour expliquer cet écart, nous pouvons invoquer le contact électrique entre le disque métallique ou l'électrode et le textile. En effet, il y a deux différences majeures entre les deux méthodes :

- l'électrode utilisée dans la méthode EN 1149-2 a un poids nettement plus important que le disque métallique de sorte qu'il exerce une pression plus grande sur le tissu favorisant alors la conduction du courant.
- Le disque métallique présente une plus grande surface en contact avec le textile contrairement à l'électrode, ce qui pourrait jouer également sur les résultats obtenus.

Ces configurations différentes auront des conséquences sur les distributions de lignes de courant comme on peut le voir sur la figure II.22 :

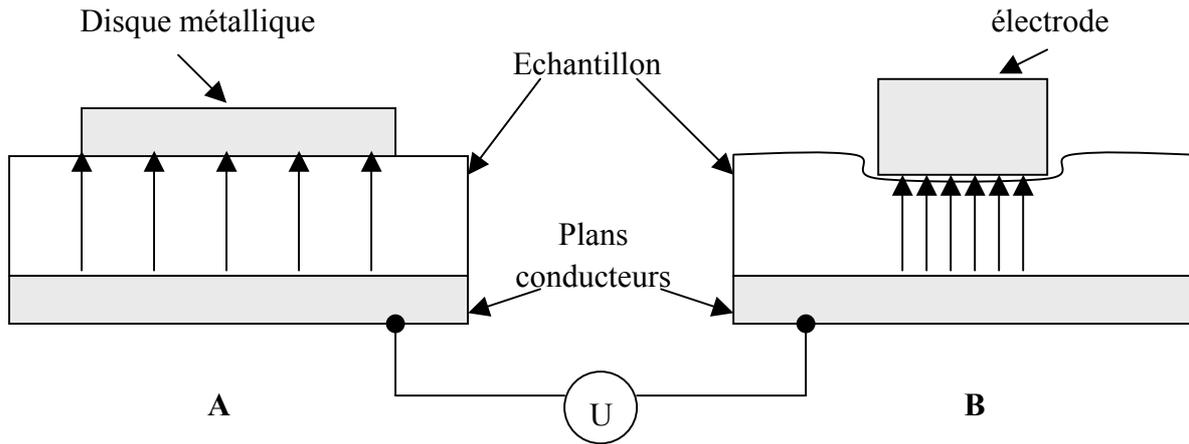


Figure II.22 – Représentation schématique des lignes de courant des deux configurations différentes : la configuration A correspond au cas de la méthode du moulin à champ, la configuration B correspond à celle de la méthode normalisée

Il est donc nécessaire de contrôler tous ces paramètres, à savoir, les conditions atmosphériques, la pression des parties métalliques et leurs surfaces, afin d'obtenir des mesures les plus comparables possibles.

#### 4. Analyse des écarts obtenus entre les deux méthodes

Le but des expériences suivantes est de comprendre les écarts obtenus lors des dernières manipulations entre les deux méthodes de mesure. Plusieurs paramètres tels que les dimensions des disques métalliques, la pression exercée par ces disques sur les textiles, les tensions appliquées pour les mesures etc. doivent probablement avoir un rôle prépondérant dans l'explication de ces écarts.

##### a. Influence des surfaces de contact et de la tension appliquée

Les dimensions des disques utilisés pour les mesures de résistance avec le moulin à champ vont jouer un rôle dans le résultat obtenu comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent. En effet, intuitivement, on imagine bien que plus la surface de contact est grande, plus la résistance mesurée est faible. Sur la figure II.23, les lignes de courant sont schématisées par les flèches, ainsi dans le cas A l'intensité du courant mesurée sera plus grande que dans le cas B. La résistance correspondante donnée par la relation II.15, sera donc plus faible dans le cas A et plus élevée dans le cas B.

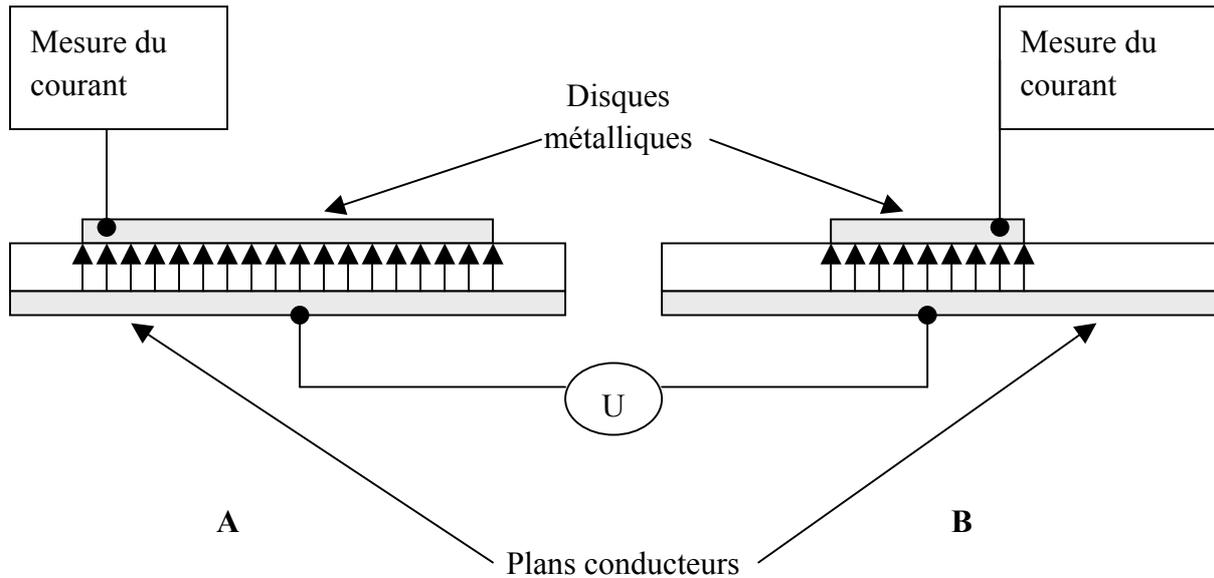


Figure II.23 – Représentation schématique des lignes de courant de deux configurations différentes : la configuration **A** correspond à l'utilisation d'un grand disque métallique pour la mesure du courant, la configuration **B** correspond à l'utilisation d'un disque plus petit.

Nous pouvons également faire le rapprochement avec l'expression de la résistance de fuite pour un condensateur homogène (équation II.13) où la résistance est inversement proportionnelle à la surface du diélectrique en contact avec les électrodes.

Or, nous n'avons pas tenu compte de ce paramètre lors des dernières expériences. En effet, les surfaces de contact mises en jeu pour les deux méthodes étaient différentes : un disque de 5 cm de diamètre pour la méthode de la norme EN 1149-2 et un disque de 16 cm de diamètre pour la méthode du moulin à champ.

### Principe et conditions expérimentales

La méthode utilisée est donc celle du moulin à champ. Elle est appliquée à trois échantillons différents : coton, soie et papier. Deux séries de mesures ont été effectuées pour déterminer les résistances de fuites des échantillons. La seule différence entre les deux séries reste l'environnement climatique qui était plus sec pour la deuxième série de mesure.

Les dimensions des différents disques utilisés sont de 9 cm et 16 cm pour la première série de mesures, un disque supplémentaire de 5 cm de diamètre est utilisé dans la seconde série de mesures.

Conditions expérimentales supplémentaires :

- air ambiant : humide pour la première série, un peu plus sec pour la seconde
- tension appliquée 10V
- distance du moulin à 3 cm

**Résultats**

1 <sup>ère</sup> série		Coton	Soie	Papier
$\phi = 16 \text{ cm}$	$\tau_1 (\mu\text{s})$	40	55	80
	C (pF)	444	610	888
	$\tau_2 (\text{s})$	2,7	76	10
	R ( $\Omega$ )	<b><math>6,1 \cdot 10^9</math></b>	<b><math>1,2 \cdot 10^{11}</math></b>	<b><math>1,1 \cdot 10^{10}</math></b>
$\phi = 9 \text{ cm}$	$\tau_1 (\mu\text{s})$	15	20	60
	C (pF)	166	222	666
	$\tau_2 (\text{s})$	2,3	80	14
	R ( $\Omega$ )	<b><math>1,4 \cdot 10^{10}</math></b>	<b><math>3,6 \cdot 10^{11}</math></b>	<b><math>2,1 \cdot 10^{10}</math></b>
EN 1149-2 ( $\Omega$ ) U = 10V		<b><math>3,9 \cdot 10^9</math></b>	-	<b><math>1,4 \cdot 10^9</math></b>
EN 1149-2 ( $\Omega$ ) U = 100V		<b><math>2,4 \cdot 10^9</math></b>	<b><math>1,1 \cdot 10^{12}</math></b>	<b><math>3,6 \cdot 10^8</math></b>
2 <sup>ème</sup> série		Coton	Soie	Papier
$\phi = 16 \text{ cm}$	$\tau_1 (\mu\text{s})$	30	55	70
	C (pF)	333	610	777
	$\tau_2 (\text{s})$	6,4	72	19
	R ( $\Omega$ )	<b><math>1,9 \cdot 10^{10}</math></b>	<b><math>1,2 \cdot 10^{11}</math></b>	<b><math>2,4 \cdot 10^{10}</math></b>
$\phi = 9 \text{ cm}$	$\tau_1 (\mu\text{s})$	14	22	60
	C (pF)	155	244	666
	$\tau_2 (\text{s})$	5,8	69	29
	R ( $\Omega$ )	<b><math>3,7 \cdot 10^{10}</math></b>	<b><math>2,8 \cdot 10^{11}</math></b>	<b><math>4,4 \cdot 10^{10}</math></b>
$\phi = 5 \text{ cm}$	$\tau_1 (\mu\text{s})$	5,5	9	16
	C (pF)	61	100	178
	$\tau_2 (\text{s})$	4,6	62	14
	R ( $\Omega$ )	<b><math>7,5 \cdot 10^{10}</math></b>	<b><math>6,2 \cdot 10^{11}</math></b>	<b><math>7,9 \cdot 10^{10}</math></b>
EN 1149-2 ( $\Omega$ ) U = 10V		<b><math>1,1 \cdot 10^{10}</math></b>	-	<b><math>3,2 \cdot 10^9</math></b>
EN 1149-2 ( $\Omega$ ) U = 100V		<b><math>7,9 \cdot 10^9</math></b>	<b><math>3,8 \cdot 10^{11}</math></b>	<b><math>1,4 \cdot 10^9</math></b>

*Tableau II.11 – Tableau récapitulatif des valeurs de constantes de temps, capacités et résistances obtenues avec la méthode du moulin à champ en fonction des dimensions des disques et des résistances mesurées selon la méthode normalisée en fonction de la tension appliquée.*

Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau de la figure II.11. La méthode du moulin à champ se fait toujours en deux étapes :

- une mesure de constante de temps notée  $\tau_1$  à l'aide de l'oscilloscope pour un système dont on connaît la résistance de fuite permettant le calcul de la capacité C (configuration présentée au paragraphe II-C.3.b figure II.15)
- une mesure de constante de temps notée  $\tau_2$  au moyen du moulin à champ pour en déduire la résistance R de l'échantillon.

La méthode déterminée par la norme EN 1149-2 est appliquée pour deux niveaux de tension différents : 10V et 100V

### **Interprétations**

On se rend compte que la surface de contact avec l'échantillon est un paramètre important pour la mesure de résistance. Plus la surface est grande, plus la résistance diminue. Cependant, les rapports entre les résistances obtenues pour les trois types d'échantillons ne sont pas en accord avec les rapports des surfaces donnés dans la première colonne, comme le montre le tableau suivant :

	Coton	Soie	Papier
16 – 9 / ratio = 3,2	1,9	2,3	1,8
16 – 5 / ratio = 10,2	3,9	5,2	3,3
9 – 5 / ratio = 3,2	2,0	2,2	1,8

*Tableau II.12 – Représentation des rapports de résistances pour la soie, le coton et le papier en fonction des rapports entre les dimensions des disques utilisés*

Ce paramètre ne permet donc pas d'expliquer les différences de résistance enregistrées jusqu'ici. Par ailleurs, si l'on regarde les résultats obtenus pour les expériences dont les configurations sont les plus comparables : à savoir la méthode des disques avec un disque de 5 cm de diamètre et la méthode normalisée avec une tension de test de 10V ; nous obtenons des résistances de  $7,5 \cdot 10^{10} \Omega$  pour la première et  $1,1 \cdot 10^{10} \Omega$  pour la méthode normalisée. Les considérations géométriques et les tensions appliquées ne suffisent donc pas pour expliquer ces écarts. Enfin on remarque que la tension appliquée par la méthode de la norme joue également sur la valeur de résistance obtenue, une tension élevée diminue cette valeur d'un facteur allant de 1,4 à 3,9. Les raisons de cette variation de la résistance électrique en fonction de la tension appliquée ont déjà été évoquées au chapitre I (paragraphe I-D.2.c). Ce sont principalement les conditions de champ fort lorsque la tension est élevée, l'injection de charges de surface au niveau de l'électrode qui en résulte, et des phénomènes locaux d'ionisation qui sont à l'origine de cette variation de la résistance. Il faudra donc se mettre dans les mêmes conditions de tension pour comparer les deux méthodes.

**b. Influence de la pression exercée sur les échantillons**

La pression appliquée par les disques métalliques sur les échantillons joue un rôle important car une pression importante favorise un bon contact métallique et augmente dans certains cas la surface effective de contact entre les parties métalliques et les échantillons. L'étude sur la pression est d'autant plus nécessaire ici que l'électrode utilisée dans la méthode de la norme a un poids (environ 1 kg) plus important que les différents disques de la méthode du moulin à champ.

**Principe et conditions expérimentales**

Les échantillons utilisés restent les mêmes. La méthode du moulin à champ et comparée à celle de la norme. Cependant, les disques utilisés sont différents :

- un disque D1 de 16cm de diamètre et 0,5cm d'épaisseur
- un disque D2 de 16cm de diamètre et 5cm d'épaisseur

Une particularité supplémentaire est apportée à ces mesures, en effet, la méthode de la norme est ici appliquée à l'aide du disque D2 en guise d'électrode. Nous pouvons ainsi faire des mesures comparatives avec des électrodes qui se trouvent dans un rapport en poids égal à 10. Le principe, pour la méthode issue de la norme, consiste à appliquer la tension au niveau du disque D2 et la mesure se fait alors au niveau de la plaque métallique, support de l'échantillon de textile (configuration différente de la norme EN1149-2, cf. paragraphe II-D.1.a).

Le moulin à champ était placé à une distance de 3 cm, la tension appliquée était de 10 V, et l'air environnant était plutôt humide.

**Résultats**

		Coton	Soie	Papier
D1	$\tau_1$ ( $\mu$ s)	45	50	60
	C (pF)	500	555	666
	$\tau_2$ (s)	1,9	72	6
	R ( $\Omega$ )	<b><math>3,8 \cdot 10^9</math></b>	<b><math>1,3 \cdot 10^{11}</math></b>	<b><math>9,0 \cdot 10^9</math></b>
D2	$\tau_1$ ( $\mu$ s)	60	85	90
	C (pF)	666	944	999
	$\tau_2$ (s)	1,4	12	11
	R ( $\Omega$ )	<b><math>2,1 \cdot 10^9</math></b>	<b><math>1,2 \cdot 10^{10}</math></b>	<b><math>1,1 \cdot 10^{10}</math></b>
EN 1149-2 ( $\Omega$ ) U = 10V		<b><math>7,9 \cdot 10^8</math></b>	<b><math>5,2 \cdot 10^{10}</math></b>	<b><math>1,21 \cdot 10^9</math></b>

*Tableau II.13 – Mesures des constantes de temps, capacités et résistances obtenues avec les disques D1 et D2, comparaison avec les résistances obtenues en utilisant la méthode normalisée avec une tension appliquée de 10V*

## **Interprétations**

On s'aperçoit que la pression exercée joue bien un rôle sur les résultats, lorsqu'elle est élevée la résistance mesurée est plus faible. Cela se voit surtout pour les échantillons de textile qui gardent une certaine souplesse et peuvent donc être comprimés sous le poids des électrodes : le coton passe de  $3,8.10^9\Omega$  à  $2,1.10^9\Omega$  mais surtout la soie passe de  $1,3.10^{11}\Omega$  à  $1,2.10^{10}\Omega$ . Par contre, en ce qui concerne le papier, on n'observe pas de différence importante lorsque le poids de l'électrode varie, la résistance mesurée reste proche de  $1.10^{10}\Omega$ . Cependant il reste une différence importante entre les deux méthodes à l'étude : pour le papier, les mesures présentent un écart d'un facteur **10** environ, la résistance vaut  $1,1.10^{10}\Omega$  pour la mesure avec le disque D2 et  $1,21.10^9\Omega$  pour la mesure normalisée.

Les écarts entre ces deux méthodes ne peuvent donc toujours pas être expliqués par les différences de pression car dans le cas du disque D2, nous nous trouvons dans des conditions de mesure très similaires pour les deux méthodes, or des écarts importants subsistent.

Ces écarts peuvent provenir de la méthode du moulin à champ elle-même, celle-ci doit encore être validée. De plus la compréhension des mécanismes de conduction mis en jeu est à ce stade nécessaire pour élucider certains phénomènes.

## **II-E Validation de la méthode de mesure et propriétés physiques de polarisation**

La méthode du moulin à champ donne des résultats visiblement différents de la méthode normalisée. Pour comprendre ces différences, il est indispensable de s'assurer de la validité de cette méthode. En d'autres termes, il nous faut pouvoir étalonner ce moyen de mesure afin de s'assurer que les valeurs obtenues, de capacité ou de résistance, correspondent bien aux grandeurs physiques mesurées. Dans ce but, des mesures complémentaires sont nécessaires, les paramètres susceptibles d'influencer les résultats doivent être contrôlés. L'utilisation d'un pont RLC nous permettra d'avoir un outil de référence pour essayer de mettre en défaut le test développé. Enfin, pour comprendre le comportement des textiles lors de la charge par polarisation il sera utile de faire quelques rappels sur la notion de polarisation.

### **1. Expériences menées sur des échantillons de papier**

Les manipulations suivantes concernent uniquement des échantillons de papier. Le papier a été choisi car c'est un bon isolant et il reste moins tributaire des conditions atmosphériques que les échantillons de textile.

**a. Principe et conditions expérimentales**

Les expériences ont été menées dans des conditions atmosphériques d'humidité relative peu élevée (temps plutôt sec) mais non contrôlées. La tension de charge appliquée étant de 10V, les différentes configurations sont les suivantes :

- **Expérience n° 1** : disque de masse épais de 16 cm de diamètre ; disque supérieur fin de 16 cm de diamètre ; échantillons de papier circulaires de 16 cm de diamètre.
- **Expérience n° 2** : disque de masse épais de 16 cm de diamètre ; disque supérieur fin de 16 cm de diamètre ; feuilles entières.
- **Expérience n° 3** : disque de masse de 30 cm de diamètre ; disque supérieur fin de 16 cm de diamètre ; échantillons de papier circulaires de 16 cm de diamètre.
- **Expérience n° 4** : disque de masse de 30 cm de diamètre ; disque supérieur fin de 16 cm de diamètre ; feuilles entières.

**b. Résultats de mesure**

Expériences		1 épaisseur de papier	4 épaisseurs de papier
N°1	$\tau_1$ ( $\mu$ s)	145	58
	C (pF)	1600	644
	$\tau_2$ (s)	16	37
	R ( $\Omega$ )	<b><math>1,0 \cdot 10^{10}</math></b>	<b><math>5,7 \cdot 10^{10}</math></b>
N°2	$\tau_1$ ( $\mu$ s)	150	60
	C (pF)	1700	666
	$\tau_2$ (s)	26	59
	R ( $\Omega$ )	<b><math>1,5 \cdot 10^{10}</math></b>	<b><math>8,9 \cdot 10^{10}</math></b>
N°3	$\tau_1$ ( $\mu$ s)	193	62
	C (pF)	2100	688
	$\tau_2$ (s)	26	39
	R ( $\Omega$ )	<b><math>1,2 \cdot 10^{10}</math></b>	<b><math>5,7 \cdot 10^{10}</math></b>
N°4	$\tau_1$ ( $\mu$ s)	155	70
	C (pF)	1700	777
	$\tau_2$ (s)	24	45
	R ( $\Omega$ )	<b><math>1,4 \cdot 10^{10}</math></b>	<b><math>5,8 \cdot 10^{10}</math></b>

*Tableau II.14 – Comparaison entre les constantes de temps, les capacités et les résistances obtenues avec les échantillons de papier en fonction de l'épaisseur.*

**c. Commentaires**

Tous ces résultats permettent de mettre en évidence l'influence de quelques paramètres sur les mesures effectuées. En effet, on peut remarquer que le fait d'utiliser des échantillons circulaires de papier ou des feuilles entières n'a pas grande influence (exp. N°3 / exp. N°4) : les résistances sont de  $1,2 \cdot 10^{10} \Omega$  et  $1,4 \cdot 10^{10} \Omega$  pour une épaisseur de papier et de  $5,7 \cdot 10^{10} \Omega$  et  $5,8 \cdot 10^{10} \Omega$  pour 4 épaisseurs de papier. De plus, les différents plans de masse utilisés ont également une très faible influence sur le résultat final, cela modifie quelque peu la capacité, la distribution des lignes de champ étant modifiée (exp. N°3 / exp. N°1) : les valeurs obtenues sont  $1,2 \cdot 10^{10} \Omega / 1,0 \cdot 10^{10} \Omega$  pour une épaisseur de papier et  $5,7 \cdot 10^{10} \Omega / 5,7 \cdot 10^{10} \Omega$  pour 4 épaisseurs de papier.

On peut remarquer que dans toutes les configurations adoptées ci-dessus, lorsque l'on multiplie l'épaisseur de diélectrique par 4, la valeur de la capacité n'est pas divisée par 4, comme le stipule la théorie, le facteur que l'on obtient se situe entre 2 et 3. Il devient alors légitime de mettre en cause la validité de la détermination de la capacité avec notre méthode. Pour faire la lumière sur une éventuelle erreur de mesure de la capacité au moyen de la méthode utilisant les disques métalliques, l'utilisation d'un pont RLC s'impose comme une nécessité. La méthode des disques pourra ainsi être confrontée à une méthode fiable pour pouvoir vérifier les valeurs obtenues.

**2. Utilisation d'un pont RLC**

Pour mettre à l'épreuve notre méthode de mesure, nous avons décidé d'utiliser un pont pour déterminer les capacités réalisées. La fréquence minimale de l'appareil est de 75 kHz, cette fréquence est plus élevée que celle de la méthode des disques, cependant, nous avons vérifié que l'augmentation de la fréquence d'un rapport 10 n'engendrait qu'une variation apparemment très faible de la capacité, de l'ordre de quelque pF.

**a. Description du pont RLC utilisé**

Le principe de fonctionnement d'un pont RLC est basé sur la mesure de l'impédance électrique  $Z$  de l'équipement sous test. L'impédance électrique se définit généralement comme l'opposition que présente un équipement ou un circuit face au flux d'un courant électrique alternatif de fréquence donnée. Cette impédance est une grandeur complexe, la partie réelle correspond à la résistance  $R$  et la partie imaginaire à la réactance  $X$ , on écrit alors :  $Z = R + jX$ .

La composante imaginaire prend deux formes : la réactance inductive  $X_L$  ou capacitive  $X_C$ .

Par définition,  $X_L = 2\pi fL$  et  $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ , où  $f$  représente la fréquence de travail.

Typiquement, l'appareil délivre un signal alternatif de fréquence  $f$  appliqué à l'équipement sous test pour déterminer son impédance. Plusieurs méthodes, selon les appareils, existent pour déterminer l'impédance d'un équipement :

- méthode du pont (type pont de Weastone)
- méthode résonnante...

Pour faire nos mesures nous avons utilisé un pont RLC de marque AGILENT, modèle 4285A. Un pont RLC peut donc nous fournir une grande quantité d'informations concernant diverses grandeurs telles que la résistance, l'inductance, la capacité... Ici, ce sont les mesures de capacité qui nous intéressent. L'appareil fonctionne sur une bande de fréquence allant de 75 kHz à 30 MHz.

#### **b. Caractérisation de l'échantillon de papier par le pont RLC**

L'expérience est menée sur les échantillons circulaires de papier de 16 cm de diamètre. Le condensateur est réalisé à l'aide du disque de 30 cm de diamètre à la masse et du disque de 16 cm de diamètre. Les conditions atmosphériques sont très sèches (cependant conditions non contrôlées). Les résultats de capacités obtenues sont les suivants :

- Pour une épaisseur : **C = 1,4 nF**
- Pour quatre épaisseurs : **C = 637 pF**

En comparant avec les résultats obtenus dans l'expérience n°3 du paragraphe précédent (expérience la plus proche de la configuration établie ici), on s'aperçoit que l'on avait obtenu une valeur **C = 2,1 nF** pour une épaisseur d'échantillon et une valeur **C = 688 pF** pour quatre épaisseurs d'échantillons. Les résultats de ces deux expériences semblent être en bon accord. On peut remarquer par ailleurs que le rapport des valeurs de capacité n'est que de **2,2** au lieu du rapport **4** attendu.

Donc les résultats donnent des valeurs de capacités qui ne sont pas dans les proportions attendues aussi bien pour la méthode utilisant les disques (expérience n°3) que pour cette méthode du pont RLC. Cela suggère que le problème est probablement étranger à la méthode utilisée. Bien que le papier soit un matériau plus homogène que le textile, cela reste cependant une matière fibreuse dont la composition peut être à l'origine des écarts obtenus par rapport à la théorie. Pour s'affranchir de cette éventualité, il devient nécessaire de tester la méthode avec des échantillons plus homogènes. Des échantillons de PVC ont été choisis dans ce but.

**c. Utilisation d'échantillons de PVC**

Pour étayer cette hypothèse nous avons voulu utiliser des échantillons de PVC, plus épais que ceux de papier, pour avoir une structure un peu plus homogène lors de la superposition des échantillons.

Les échantillons utilisés sont des morceaux de PVC dont les caractéristiques sont connues (donnée du fournisseur :  $\epsilon_r = 3,3$ ) et d'épaisseur 5 mm. Nous avons effectué des mesures comparatives entre les deux méthodes pour une épaisseur et deux épaisseurs, les résultats sont les suivants :

	1 épaisseur	2 épaisseurs
Méthode du pont F = 75 kHz U = 1 V	C = 58 pF	C = 34 pF
Méthode des disques F = 15 kHz U = 1 V	C = 73 pF	C = 50 pF

*Tableau II.15 – Comparaison en fonction de l'épaisseur des valeurs de capacités mesurées selon les deux méthodes : la méthode utilisant le pont RLC et la méthode utilisant les disques*

On remarque que les deux méthodes donnent des valeurs différentes. La méthode des disques donne une valeur de capacité supérieure de **15 pF** pour une épaisseur d'échantillon et de **16 pF** pour deux épaisseurs. Les mesures ont été menées dans les mêmes conditions, la seule différence concerne la fréquence de travail. En effet, pour la méthode utilisant le pont RLC, nous avons utilisé la plus basse fréquence autorisée par l'appareil : 75 kHz. Pour l'autre méthode, la fréquence du signal carré utilisé dépend de la capacité que l'on veut mesurer, en effet l'observation correcte à l'oscilloscope des charges et décharges successives dépend de la constante de temps du circuit : la fréquence utile étant de 15 kHz.

Nous avons précisé plus haut que l'augmentation de la fréquence d'un rapport 10 avait pour conséquence une variation dans la mesure de la capacité de quelques pF. Or les ordres de grandeur étant ici très faibles, il est utile de s'assurer que la fréquence n'est pas le facteur causant les différences dans ces mesures.

Pour pouvoir faire une expérience de comparaison, il nous faut augmenter la fréquence de travail dans la méthode des disques jusqu'à une valeur de 75 kHz qui correspond à la fréquence minimale du pont RLC. Il est donc nécessaire de diminuer la constante de temps du système. Pour cela nous décidons de diminuer la capacité du condensateur réalisé en augmentant la distance entre les disques à l'aide de plusieurs diélectriques différents (PVC, divers textiles...) cela permet ainsi de diminuer suffisamment la capacité pour avoir une fréquence de travail de 75 kHz avec la méthode des disques.

Les résultats obtenus sont donnés ci-dessous :

- méthode avec pont RLC : **C = 12 pF**
- méthode avec les disques : **C = 28 pF**

Nous remarquons que les résultats obtenus pour les deux méthodes présentent un écart de **16pF**. Ce n'est donc pas la différence de fréquence qui était à l'origine de cet écart. Ce qui différencie fondamentalement les deux méthodes dans leur application reste l'utilisation des sondes de l'oscilloscope dans la méthode des disques alors que la calibration du pont RLC fait que l'on s'affranchit totalement des capacités ajoutées par la connectique. Or il s'avère que les sondes présentent précisément des capacités de **15 à 20pF**. En fait, plus l'ordre de grandeur des capacités rencontrées est proche du pF, plus les méthodes seront sensibles aux parasites qui sont du même ordre de grandeur.

Les expériences suivantes permettent de mettre en évidence le bon fonctionnement de notre méthode en utilisant des capacités vendues dans le commerce.

#### d. Utilisation de capacités connues

Le but de ces manipulations est d'estimer la fiabilité de notre méthode de mesure pour déterminer des valeurs de capacité comparée à celle du pont. Pour cela nous avons utilisé des condensateurs vendus dans le commerce dont les capacités sont connues, à la place du condensateur créé avec des diélectriques.

Données constructeur	Pont	Disques
100 pF	C = 101 pF (F=75kHz)	C = 121 pF (F=10kHz)
1 nF	C = 981 pF (F=75kHz)	C = 1 nF (F=1kHz)
10 nF	C = 9,6 nF (F=75kHz)	C = 9,7 nF (F=100Hz)
100 nF	C = 97,4 nF (F=75kHz)	C = 103,7 nF (F=10Hz)

*Tableau II.16 – Comparaisons entre les capacités mesurées avec le pont, celles obtenues avec la méthode des disques et les valeurs des capacités données par le constructeur (les fréquences de travail sont également indiquées)*

Nous pouvons voir que les deux méthodes donnent des résultats en accord avec les données constructeur. La méthode de détermination des capacités avec le moulin à champ et les disques donne donc des résultats fiables, et la méthode peut être validée.

La méthode n'est donc pas à mettre en cause, elle n'explique pas l'obtention des écarts dans les résultats de comparaison avec la méthode normalisée EN 1149-2 (paragraphe II-D.3). Pour comprendre ces écarts, il faut s'intéresser à la nature même des mécanismes physiques mis en jeu dans les deux types d'essais. En effet, dans le cas de la méthode normalisée, la

mesure consiste en l'enregistrement d'un courant électrique à travers l'échantillon lorsque l'on applique une forte différence de potentiel. Par contre, l'autre méthode mesure un phénomène de relaxation après une charge par polarisation du textile. La nature différente des mécanismes mis en jeu expliquerait les différences dans les résultats obtenus. La notion même de résistance électrique est inadaptée dans les deux cas, et ne traduit pas la même réalité physique dans un cas ou dans l'autre.

### 3. Comportement d'un diélectrique à la polarisation

La méthode développée est basée sur la charge des échantillons de textile par polarisation. Lorsqu'un isolant est soumis à un champ électrique extérieur, une réorganisation interne des charges électriques apparaît pour s'opposer à la cause qui lui a donné naissance. Il s'ensuit alors divers mécanismes internes qui dépendent de la nature du matériau. Nous allons donc faire un rappel ici des mécanismes mis en jeu dans la polarisation des isolants.

#### a. Phénomène physique de polarisation

Le phénomène de polarisation a lieu au sein des isolants car il faut que le champ électrique puisse y pénétrer (dans un conducteur le champ électrique est nul). A l'intérieur de cet isolant, le champ électrique aura pour conséquence de réorganiser la distribution des charges [24]. Les principaux mécanismes microscopiques qui interviennent lors de cette réorganisation sont au nombre de trois :

- la polarisation électronique
- la polarisation ionique (ou atomique)
- la polarisation dipolaire (ou d'orientation)

#### la polarisation électronique

En présence d'un champ électrique, le nuage électronique, d'un atome par exemple, est étiré par celui-ci, la distribution de charges devient dipolaire. Pour tout diélectrique, la déformation d'un édifice élémentaire (atome, ion, molécule...) sous l'action d'un champ électrique local  $\vec{E}_l$  s'accompagne de la création d'un moment dipolaire  $\vec{p}$ , colinéaire à  $\vec{E}_l$ , donné par :

$$\vec{p} = \alpha \vec{E}_l \quad (\text{II.16})$$

où  $\alpha$  constitue la polarisabilité électronique de cet édifice.

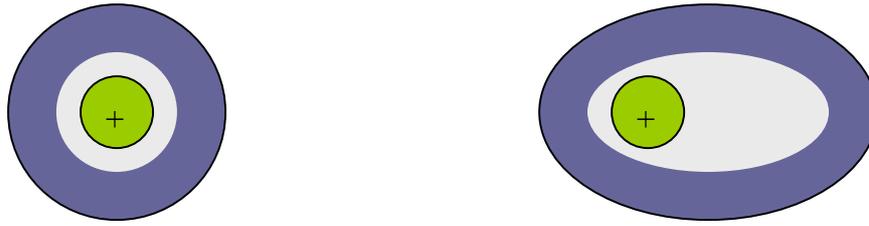


Figure II.24 – Représentation schématique de la polarisation électronique

### la polarisation ionique

Les solides ioniques sont composés d'ions de charges égales et opposées (exemple :  $\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ ). La polarisation ionique est causée par le déplacement relatif des cations dans une direction et des anions dans l'autre direction (figure II.25).

A l'échelle macroscopique, la neutralité est assurée. Au niveau microscopique, la molécule se présente comme un dipôle de moment dipolaire :

$$\vec{p} = \alpha_i \vec{E}_l \quad (\text{II.17})$$

où  $\alpha_i$  constitue la polarisabilité ionique de cet édifice.

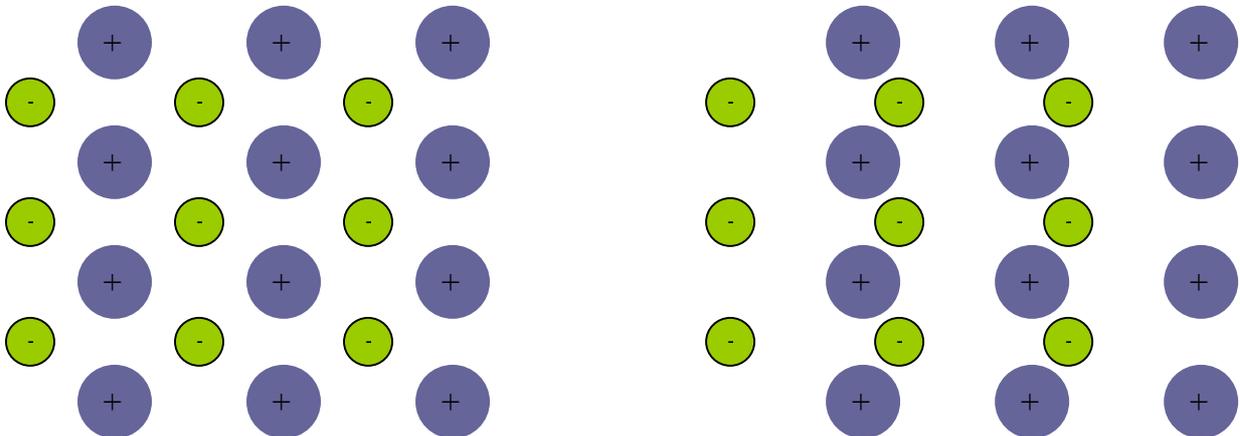


Figure II.25 – Représentation schématique de la polarisation ionique

### la polarisation d'orientation

Certaines molécules possèdent un moment dipolaire permanent (la molécule d'eau par exemple). A l'échelle macroscopique, aucune polarisation n'est décelable à cause de l'agitation thermique qui oriente de manière aléatoire ces dipôles. En présence d'un champ

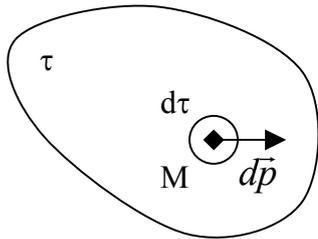
électrique extérieur, les dipôles auront tendance à s'orienter dans la même direction avec cependant une limitation due à l'agitation thermique (figure II.26). On observe alors une polarisation macroscopique qui dépend du champ électrique local mais aussi de la température.



Figure II.26 – Représentation schématique de la polarisation d'orientation

### b. Le vecteur polarisation

On peut définir le vecteur polarisation  $\vec{P}$  qui caractérise la polarisation du diélectrique par unité de volume.



Si on considère un volume de matière  $\tau$  polarisée, la polarisation pouvant être permanente ou induite par un champ électrique, on associe un moment dipolaire  $d\vec{p}$  à un élément de volume  $d\tau$ , résultante de tous les moments dipolaires élémentaires de  $d\tau$ .

On définit en tout point M du volume  $\tau$  le vecteur :

$$\vec{P} = \frac{d\vec{p}}{d\tau} \quad (\text{II.18})$$

Le vecteur polarisation a une importance capitale dans la description macroscopique du phénomène de polarisation.

Un diélectrique est dit idéal lorsqu'il satisfait les conditions suivantes :

- Il est linéaire : soumis à l'action d'un champ électrique extérieur  $\vec{E}$ ,  $\vec{P}$  et  $\vec{E}$  sont colinéaires et on peut écrire :

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E} \quad (\text{II.19})$$

avec  $\varepsilon_0$  la permittivité du vide et où  $\chi$  est appelée susceptibilité électrique.

- Il est homogène :  $\chi$  est uniforme en tout point du volume du diélectrique

- Il est isotrope :  $\chi$  est indépendant de la direction et du sens de  $\vec{E}$ .

**c. Le cas d'un condensateur plan avec diélectrique**

Faraday fut le premier à observer que lorsqu'on introduisait un isolant entre les plaques d'un condensateur plan, sa capacité augmentait. Cela veut donc dire que si la quantité de charge reste la même, alors la tension est plus faible. Etant donné que le champ électrique est proportionnel à la tension, on en déduit donc que le champ électrique diminue alors que la quantité de charge n'a pas changé [25].

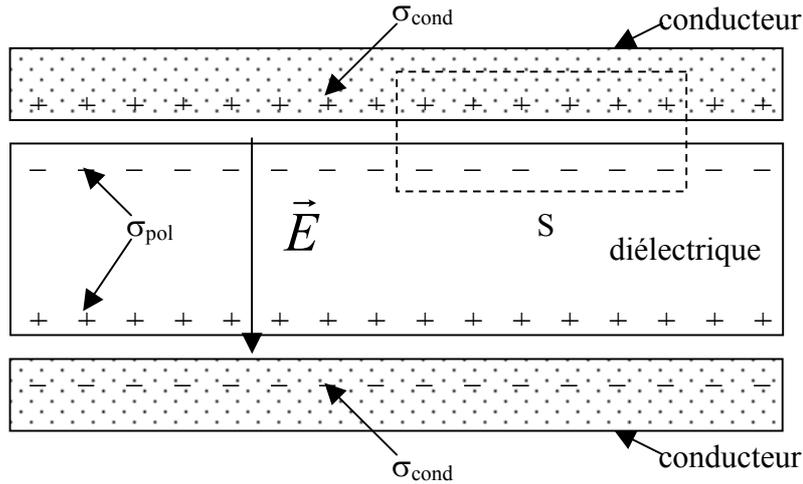


Figure II.27 – Schéma d'un condensateur plan chargé. Une densité superficielle de charge  $\sigma_{cond}$  est présente dans les plateaux conducteurs et une densité superficielle de charge  $\sigma_{pol}$  est induite dans le diélectrique.

Cette diminution du champ électrique  $\vec{E}$  s'explique par l'apparition de charges électriques positives à la surface du diélectrique (figure II.27). Cette densité de charge superficielle est égale au module du vecteur polarisation  $\vec{P}$ .

$$\sigma_{pol} = P \tag{II.20}$$

La densité de charge est donc égale à la polarisation à l'intérieur du matériau, elle est positive sur une surface et négative sur l'autre. Le champ électrique n'étant qu'atténué et non annulé, la charge à la surface du diélectrique est donc plus petite que celle du conducteur. Le théorème de Gauss appliqué à la surface  $S$  de la figure II.27 stipule que le champ électrique dans le diélectrique est égal à la densité superficielle de charge totale divisée par  $\epsilon_0$ .

$$E = \frac{\sigma_{cond} - \sigma_{pol}}{\epsilon_0} = \frac{\sigma_{cond} - P}{\epsilon_0} \tag{II.21}$$

En utilisant la relation II.19 nous pouvons écrire :

$$E = \frac{\sigma_{cond} * 1}{\epsilon_0 (1 + \chi)} \quad (II.22)$$

Cela nous donne le facteur  $\frac{1}{1+\chi}$  par lequel le champ est diminué. On peut en déduire la capacité du condensateur :

$$C = \frac{\epsilon_0 (1 + \chi) A}{d} \quad (II.23)$$

où  $A$  représente l'aire des plateaux et  $d$  l'épaisseur du diélectrique. Quand un condensateur est rempli par un diélectrique, sa capacité est donc multipliée par le facteur :

$$\epsilon_r = 1 + \chi \quad (II.24)$$

$\epsilon_r$  représente la constante diélectrique (ou permittivité relative), c'est une propriété du matériau.

Si on retire  $\sigma_{cond}$ , on décharge le condensateur,  $\sigma_{pol}$  disparaît en retournant dans le diélectrique par relaxation de la polarisation à l'intérieur de la matière.

## II-F Analyse des mécanismes de relaxation dans les diélectriques

Nous avons supposé jusqu'ici que la décroissance du champ électrique suit une loi exponentielle qui traduit la réponse à un échelon de tension d'un système du premier ordre avec une constante de temps bien déterminée. Sur la base de cette hypothèse nous faisons donc le calcul de détermination de la résistance de fuite de notre condensateur. Cependant nous verrons dans cette partie que cette hypothèse n'est pas correcte et qu'elle ne permet donc pas de rendre compte du mécanisme de relaxation observé lors de nos mesures. Il semblerait que la relaxation suit plutôt une loi polynomiale. Ce modèle introduit par la loi « Curie-von Schweider » fut appliqué aux solides cristallins à la fin du XIXème siècle.

### 1. Considérations sur la loi de décroissance exponentielle et ses limites

#### a. Le modèle de Debye

Si nous considérons le condensateur réalisé avec deux plateaux conducteurs et un diélectrique (textile ou autre isolant) compris entre ces deux plateaux, nous pouvons

déterminer, comme il a déjà été indiqué, la capacité du condensateur par la relation  $C = \frac{\varepsilon A}{d}$  avec  $\varepsilon$  la permittivité absolue du diélectrique,  $A$  l'aire des plateaux et  $d$  l'épaisseur du diélectrique. Ainsi, la mesure de la capacité mène directement à la détermination de la permittivité du diélectrique. Si la tension appliquée est une tension continue  $V_0$  la capacité mesurée est une grandeur réelle  $C_S$ , par contre si la tension appliquée est un signal alternatif de pulsation  $\omega$  la capacité mesurée est alors une grandeur complexe que l'on peut écrire [26]:

$$C(\omega) = C'(\omega) - iC''(\omega) = \frac{A}{d} [\varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega)] \quad (\text{II.25})$$

La partie réelle correspond à la capacité ordinaire, la partie imaginaire représente la contribution des pertes diélectriques. On peut ainsi définir l'angle de perte  $\delta$  qui correspond au déphasage entre le vecteur induction électrique  $\vec{D}(\omega)$  et le champ électrique  $\vec{E}(\omega)$  dû à la tension appliquée. Ces deux vecteurs sont liés par la relation :

$$\vec{D}(\omega) = \varepsilon(\omega)\vec{E}(\omega) \quad (\text{II.26})$$

La tangente de cet angle de perte (paramètre important des diélectriques) est alors donnée par la relation :

$$\tan \delta = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (\text{II.27})$$

Un autre paramètre important du diélectrique, déjà défini dans le paragraphe II-E.3.c, est sa permittivité relative qui s'exprime alors par :

$$\varepsilon_r(\omega) = \frac{\varepsilon(\omega)}{\varepsilon_0} \quad (\text{II.28})$$

Le modèle de Debye s'applique à une distribution homogène de dipôles « flottants » ponctuels permanents pour lesquels on néglige les interactions, c'est-à-dire des systèmes assimilables à un gaz polaire ou à un liquide dans lequel sont dissoutes des molécules polaires. Dans ce modèle, la relaxation diélectrique provient donc de l'orientation d'un certain nombre de dipôles par un champ électrique et désorientés simultanément de manière aléatoire par l'agitation thermique. P. Debye a montré que la permittivité complexe est liée à la pulsation  $\omega$  par l'expression suivante :

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau} \quad (\text{II.29})$$

avec :

- $\varepsilon_{\infty}$  la permittivité du matériau aux fréquences élevées ( $f \gg 1/2\pi\tau$ )
- $\varepsilon_s$  la permittivité du matériau aux fréquences basses ( $f \ll 1/2\pi\tau$ ), fréquences pour lesquelles les dipôles peuvent suivre les variations du champ sans déphasage appréciable.
- $\tau$  le temps de relaxation des dipôles, lié à leur inertie et à la viscosité du milieu.

Ce modèle suppose que l'échantillon est électriquement homogène et non chargé, il est équivalent à un circuit série linéaire.

Pour obtenir la variation temporelle de la permittivité du diélectrique après application d'une impulsion brève de tension, il faut alors effectuer une transformée de Fourier inverse sur la relation (II.29) [27] :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})(1 - e^{-t/\tau}) \quad (\text{II.30})$$

On remarque que la permittivité augmente exponentiellement, ce qui entraîne que le potentiel, lui, décroît de manière exponentielle.

#### **b. Comparaison de ce modèle théorique avec nos résultats de mesure**

La figure II.28 montre les comparaisons entre mesure et théorie. Dans le cas de la relaxation diélectrique du polyester (mais c'est également le cas pour les autres échantillons de textile) on s'aperçoit que l'on ne peut pas approcher les résultats par une loi exponentielle comme le montrent les différentes courbes théoriques. Ainsi, l'hypothèse d'une relaxation diélectrique de type exponentielle ne peut pas s'appliquer à nos expériences, les mécanismes de relaxation mis en jeu dans le diélectrique sont différents. Ces décroissances n'étant jamais exponentielles, cela montre que le phénomène est plus complexe qu'une simple polarisation dipolaire de type Debye à temps unique.

On observe en réalité que la constante de temps instantanée augmente progressivement. L'interprétation de ces phénomènes reste cependant très insuffisante, en fait, ils correspondent à la combinaison de plusieurs effets que l'on classe de manière plus ou moins arbitraire en processus de polarisation et en processus de conduction se produisant de manière plus ou moins homogène dans l'épaisseur de l'échantillon.

Du point de vue quantitatif, ce modèle reste également insuffisant à cause de sa simplicité qui, par exemple, néglige les interactions entre les dipôles. Les systèmes dans lesquels ces interactions sont négligeables, tel qu'un gaz polaire ou un solvant liquide dans lequel sont diluées des molécules polaires, sont néanmoins bien représentés par le modèle de Debye.

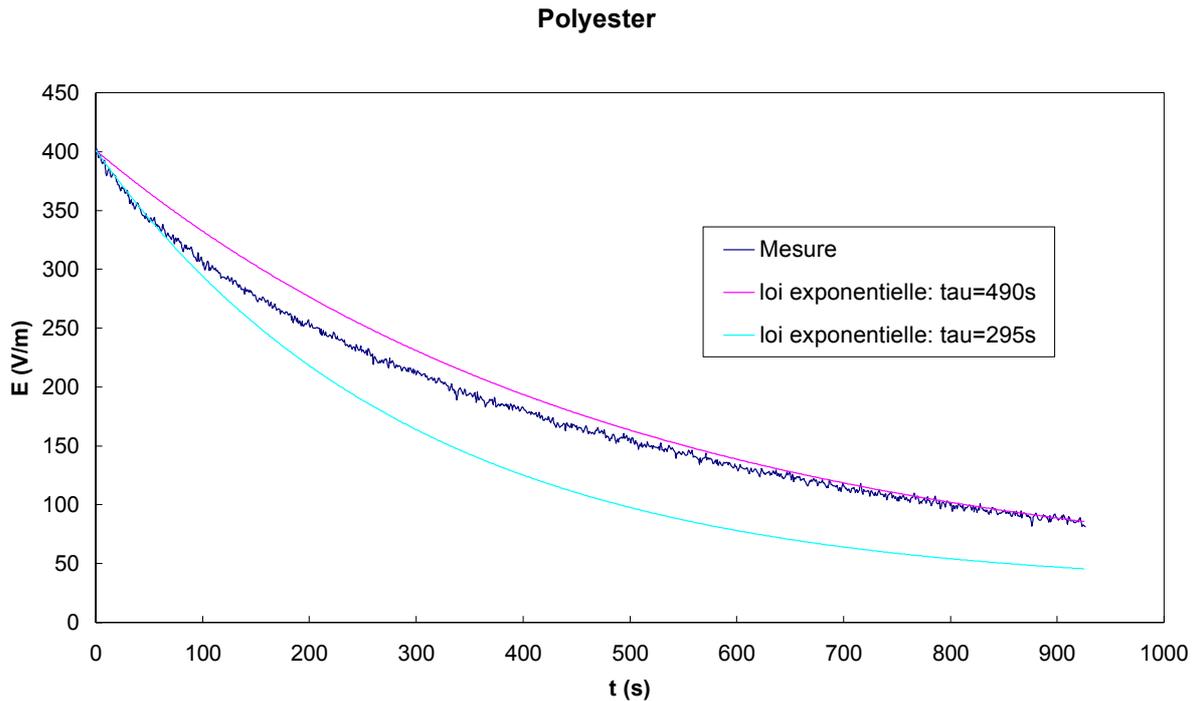


Figure II.28 – comparaison mesure/théorie de décroissances exponentielles dans le cas du polyester

## 2. Considérations sur une décroissance de type polynomial

### a. La loi Curie-von Schweidler

Dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et le début du 20<sup>ème</sup>, J.Curie [28] et von Schweidler [29] ont remarqué que les courants de résorption (passage de l'état polarisé à l'état dépolarisé) et d'absorption (passage de l'état non polarisé à l'état polarisé) de nombreux matériaux isolants différents suivaient une loi empirique de type polynomial ; ainsi le courant de résorption dépend du temps selon la relation :

$$i(t) \equiv t^{-n} \quad (\text{II.31})$$

$n$  étant compris entre 0,5 et 1,5 suivant les matériaux et les conditions expérimentales. Depuis des résultats publiés montrent ces comportements sur une gamme conséquente de matériaux, allant des polymères aux céramiques [30, 31, 32].

Cette loi de décroissance en puissance négative a été également reconnue sur une large étendue temporelle et une gamme de températures très différentes [33,34]. Cette concordance a amené à rechercher les paramètres qu'ont en commun tous ces matériaux, qui pourraient

expliquer ces mécanismes de relaxation et ainsi guider l'interprétation physique de la réponse diélectrique de la matière condensée.

Plusieurs modèles pour essayer de décrire les mécanismes physiques de ces comportements ont été développés :

- distribution de temps de relaxation
- distribution de probabilités de sauts
- fonctions de corrélation
- théorie des champs locaux
- transport par diffusion
- phénomènes d'interface et effet Maxwell-Wagner
- la théorie à plusieurs corps

Nous nous intéresserons plus loin à quelques-uns de ces modèles de manière plus détaillée.

### **b. Confrontation de la loi polynomiale aux résultats de mesure**

Dans cette partie, nous présentons les comparaisons entre la loi théorique de décroissance de type polynomial, la loi exponentielle et les mesures. Les calculs concernant la loi polynomiale présentent la forme suivante :

$$E = E_0 \left( \frac{t}{t_0} \right)^n \quad (\text{II.32})$$

$E$  représente le champ électrique,  $E_0$  le champ maximum appliqué et  $t_0$  l'instant où l'on cesse d'appliquer la tension de polarisation.

La figure II.29 montre la décroissance du champ électrique dans le cas de l'échantillon de coton. On observe que la courbe théorique de type polynomial est en bon accord avec les mesures. Cependant, l'exposant  $n$  a une valeur ici de 2,6 alors que dans le cas de la loi Curie-von Schweidler les exposants rencontrés restent inférieurs à l'unité. Dans ce cas le coton présente donc une décroissance du champ accélérée, il est possible que cela provienne de la contribution de mécanismes de conduction autres que la relaxation dipolaire, en effet, le coton étant une fibre très hydrophile, c'est un facteur qui peut favoriser l'écoulement des charges électriques.

Dans le cas de la figure II.30, la soie présente également un comportement de type polynomial avec un exposant de 0,33 en bon accord avec la loi Curie-von Schweidler.

La figure II.31 montre le comportement d'un textile contenant des parties conductrices. Ses caractéristiques structurales ont été données dans le chapitre I, au paragraphe I-E.2, il s'agit de l'échantillon de textile conducteur. On s'aperçoit que la décroissance suit une loi exponentielle (également confondue avec une loi en puissance dont l'exposant a une valeur de 38) probablement parce que le modèle trivial du circuit RC parallèle peut s'appliquer grâce à la conduction obtenue par percolation.

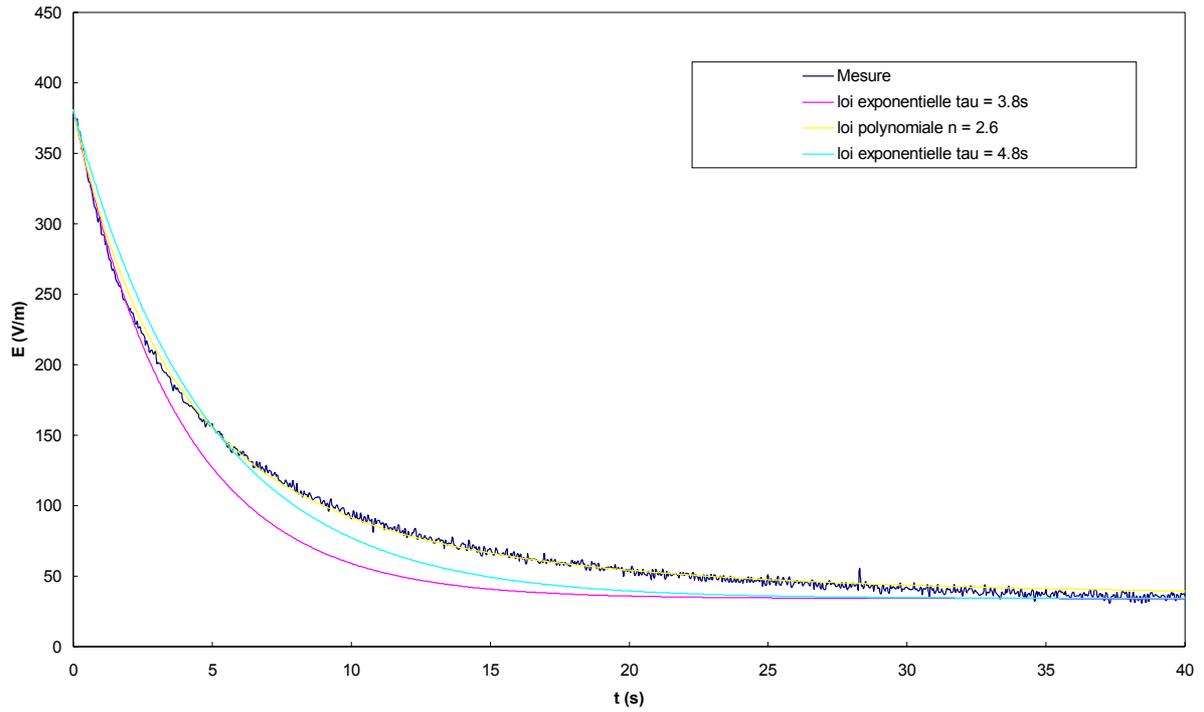


Figure II.29 – Exemple du coton

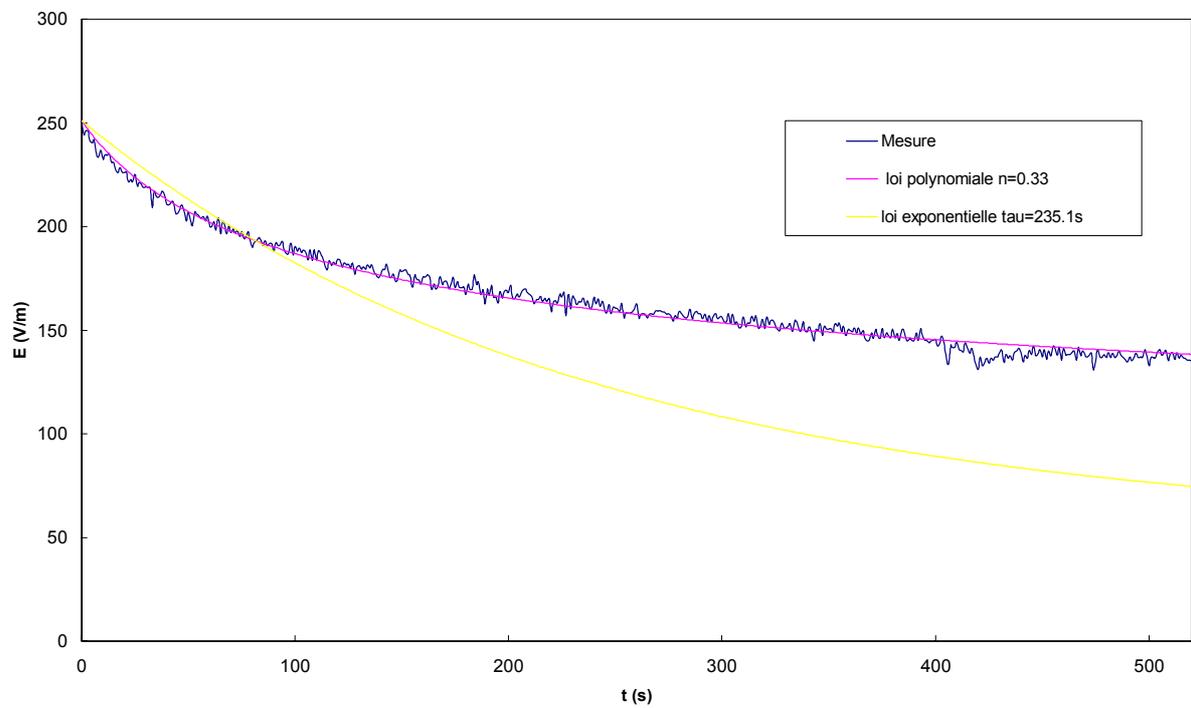


Figure II.30 – Exemple de la soie

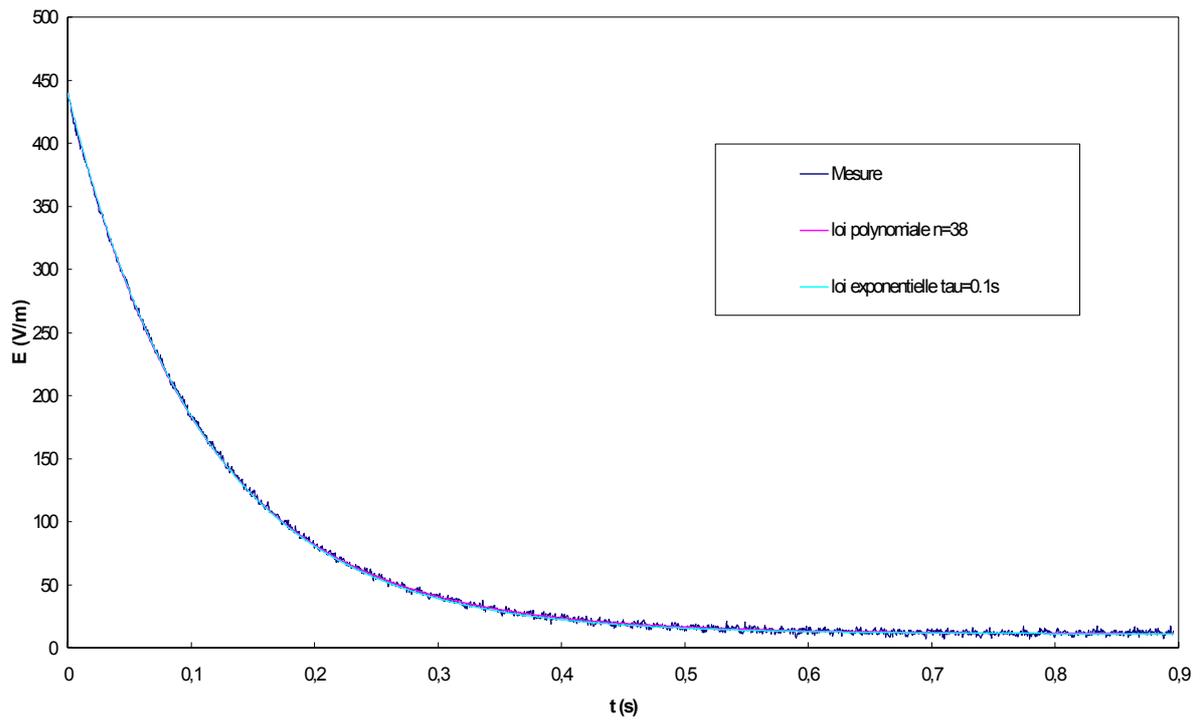


Figure II.31 – Cas de l'échantillon de textile conducteur

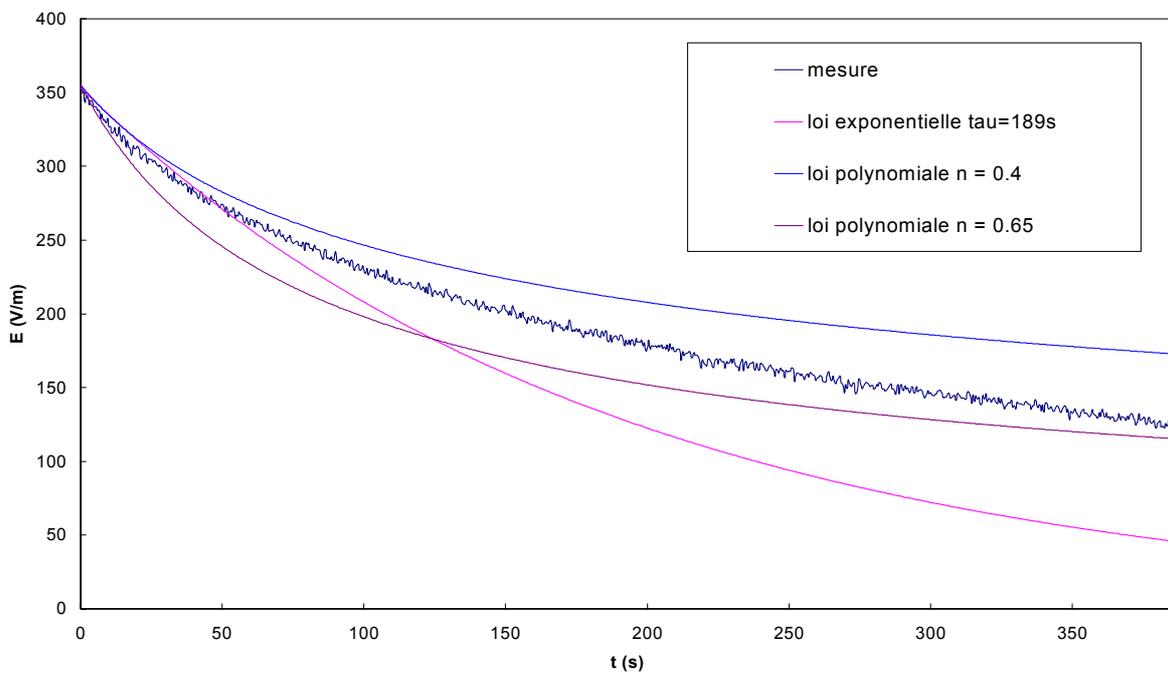


Figure II.32 – Exemple de la laine

Pour le dernier cas présenté ici, celui de la laine (figure II.32), la décroissance suit également un comportement de type polynomial, seulement un exposant unique n'est pas suffisant pour rendre compte de l'évolution du champ, en effet, il semble que deux processus de décroissance polynomiale se succèdent. Ce cas sera approfondi plus loin, mais il semble que dans la littérature ce soit le comportement que l'on rencontre le plus souvent avec les isolants. Finalement on se rend compte que la réponse des textiles à la polarisation est plus complexe que le modèle trivial du système RC parallèle ou que celui d'un circuit série, équivalent électrique du mécanisme de Debye. Les mécanismes qui expliquent ces comportements ne sont pas encore tous déterminés. Ce sont principalement des processus microscopiques de transport d'électrons par saut, où les états de surfaces et les impuretés jouent un rôle important.

### 3. Etude phénoménologique de la loi Curie-von Schweidler

La loi Curie-Von Schweidler traduit le comportement d'un matériau d'un point de vue temporel, toutefois la compréhension des phénomènes physiques de polarisation sera facilitée par l'étude de leur réponse fréquentielle. Cette dernière a donc été souvent utilisée pour étudier les mécanismes de transport dans les matériaux isolants. En particulier, on montre que la dépendance fréquentielle de la conductivité des diélectriques soumis à une excitation de champ sinusoïdale suit une loi de type polynomial :

$$\sigma(\omega) \approx \omega^n \quad (\text{II.33})$$

Cette loi polynomiale n'est pas sans rappeler la loi Curie-Von Schweidler. On montre en effet que la dépendance temporelle du courant, en réponse à une impulsion de champ électrique statique très courte, et la dépendance fréquentielle de la susceptibilité électrique, en réponse à une excitation de champ variable (sinusoïdale), sont liées par la transformée de Fourier : il y a donc réciprocity entre les deux évaluations [26].

#### a. Distribution de temps de relaxation

L'une des premières approches pour expliquer la polarisation des diélectriques se basait sur le modèle de Debye. En effet, les courants de dépolarisation obtenus présentent un comportement qui s'écarte de l'évolution exponentielle théorique de type Debye à temps unique, mais ils pouvaient sans doute correspondre à la combinaison de nombreux processus de type Debye avec des constantes de temps différentes, cette combinaison de processus de type Debye étant caractérisé par une distribution de temps de relaxation  $g(\tau)$  telle que :

$$\chi(\omega) = \int_0^{\infty} \frac{g(\tau)}{1 + i\omega\tau} d\tau \quad (\text{II.34})$$

Mathématiquement la sommation des mécanismes de Debye se fait par le biais de l'intégration de la fonction  $g(\tau)$  qui définit la distribution des temps de relaxation (équation II.34).

Cependant l'explication du choix de la distribution de temps reste encore le point faible de ce modèle, car en effet, il est toujours possible de trouver plus ou moins arbitrairement des fonctions de distribution de  $\tau$  donnant alors pour les courants de dépolarisation des lois du type Curie-von Schweidler avec des valeurs de  $n$  différentes.

Ce modèle fut l'un des premiers à essayer d'expliquer les comportements des diélectriques et est sans doute l'un des moins sophistiqué. Depuis, plusieurs autres modèles se sont succédés, les derniers considèrent les mécanismes de transport microscopiques par sauts.

## **b. Polarisation par sauts de porteurs de charges**

Ce modèle s'appuie sur la théorie des bandes d'énergie dans les isolants traitée dans la littérature [35]. La décroissance observée s'expliquerait donc par une conductivité due au déplacement de porteurs par sauts d'un état d'énergie localisé à un autre. Cette existence de sites localisés dans les diélectriques est justifiée par la nature amorphe de ces solides, en effet, nous sommes loin de la régularité des solides cristallins.

Ces sites localisés sont créés dans les solides par la présence de défauts. Ainsi, un solide amorphe présentera un grand nombre de défauts contrairement aux solides cristallins. En effet, la création de sites donneurs et accepteurs est donc favorisée avec des densités d'états d'énergie pouvant être localisées à proximité des bandes de conduction et de valence, mais également loin des bords de ces bandes, dans la zone interdite. La distribution spatiale de ces états est aussi importante que la distribution énergétique pour expliquer les transitions de charges entre eux [36].

En effet, le principe de base de ce modèle concerne l'apparition de moments dipolaires entre sites donneurs et accepteurs après le transfert d'électrons. Le transfert d'un électron, entre un site donneur et un site accepteur adjacent, donne lieu à la formation d'un dipôle au sens stricte du terme. Ces dipôles ne permettent pas, à eux seuls, d'expliquer le phénomène de relaxation observé, mais il faut aussi considérer le mécanisme suivant : un donneur ionisé va pouvoir recevoir un électron d'un autre site donneur à proximité, et donc de proche en proche un mécanisme de conduction se met ainsi en place. Cela est également valable pour les sites accepteurs. Cette conductivité sera cependant limitée par les fortes forces de Coulomb qui vont s'exercer au niveau du dipôle de base et confiner ainsi cette conduction à quelques sites voisins du dipôle initialement créé. Ces transferts sont donc restreints et les porteurs de charge ne peuvent se mouvoir uniquement que sur quelques sites localisés jusqu'à atteindre un site avec un temps de résidence particulièrement long.

**c. La théorie à plusieurs corps**

La théorie à plusieurs corps se caractérise par le fait qu'elle prend en compte les interactions existantes au sein du matériau. Ces interactions sont d'autant plus primordiales et jouent un rôle d'autant plus important que nous nous trouvons dans le cas de solides, donc de matière condensée. Dans le modèle de Debye, la relaxation diélectrique provient de l'orientation d'un certain nombre de dipôles dans un milieu visqueux par un champ électrique. Le champ impose une direction privilégiée mais qui n'est que partiellement satisfaite à cause de l'agitation thermique. Dans un solide il est plus approprié de considérer que les dipôles sont contraints par des facteurs énergétiques, ainsi certaines orientations privilégiées sont imposées. Les traitements théoriques prenant en compte uniquement les particules de manière isolées, et basés sur les mécanismes de types Debye ont tous montrés leurs limites.

Le principe de ce modèle se base sur l'observation suivante : les mécanismes de sauts de porteurs de charges dans les solides et les mécanismes de relaxation dans les systèmes dipolaires sont similaires [37]. En effet, les dipôles ne sont pas sujets à des rotations libres, mais ces rotations dans l'espace se font dans des directions imposées et de manière discrète à cause des interactions avec les plus proches voisins. Ainsi les transitions entre ces directions discrètes se font de manière abrupte et d'une manière analogue aux transitions par saut entre sites localisés. Il est également important de noter que le saut d'une charge, entre un site  $i$  et un site  $j$ , est physiquement et mathématiquement indiscernable de la rotation d'un dipôle d'un angle  $\pi$ .

Pour pouvoir établir une description mathématique rigoureuse, il faut prendre en considération les différents types de transitions possibles entre les sites et pour les dipôles au sein du matériau : saut de porteur thermiquement assisté entre deux sites, transition par effet tunnel... [26]. Tous ces mécanismes se produisent en même temps dans le matériau, mais certains seront prépondérants devant d'autres pour des intervalles de temps particuliers de sorte que l'on peut alors résumer la dépendance par rapport au temps du courant de dépolarisation par:

$$i(t) \propto t^{-n} \quad \text{pour} \quad t \ll \tau \quad (\text{II.35})$$

$$i(t) \propto \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad \text{pour} \quad t \approx \tau \quad (\text{II.36})$$

$$i(t) \propto t^{-m-1} \quad \text{pour} \quad t \gg \tau \quad (\text{II.37})$$

où  $\tau$  correspond au temps caractéristique du mécanisme de Debye.

La figure II.33 montre l'application de cette théorie à la mesure faite avec un échantillon de laine. Ces résultats décrivent bien le comportement mesuré lors des différentes expériences où l'on remarque deux décroissances successives avec des puissances différentes comme le montre la figure.

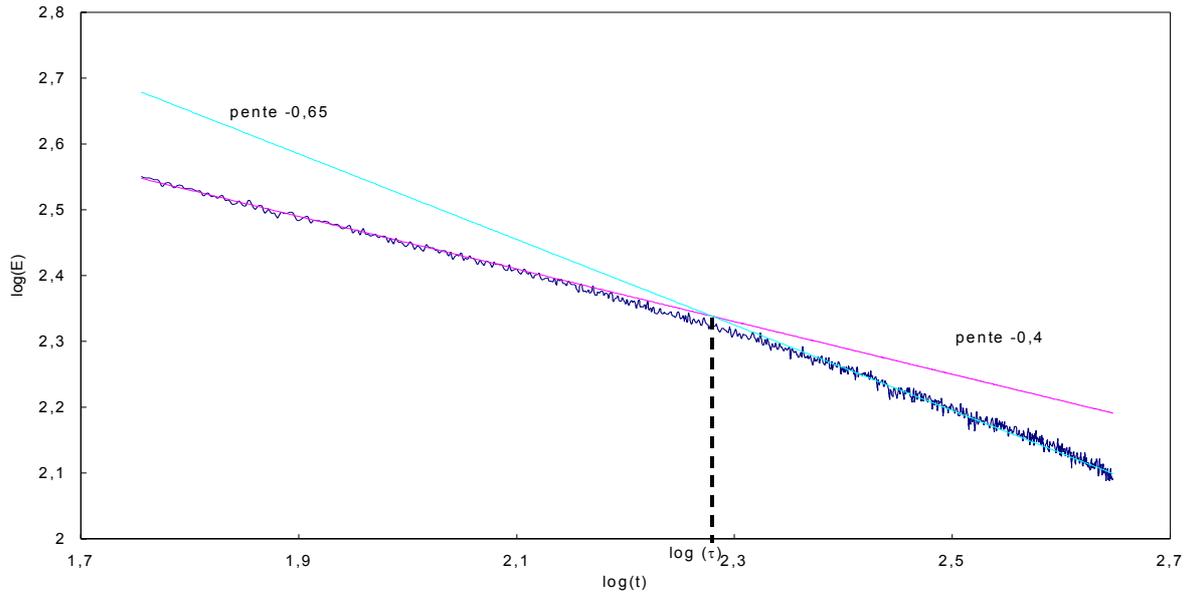


Figure II.33 - représentation de  $\log(E)$  en fonction de  $\log(t)$  pour la décharge d'un échantillon de laine (échelle linéaire)

La figure montre également le temps  $\tau$ ; *constant* de temps caractéristique du mécanisme du premier ordre de type Debye. On trouve pour cette constante une valeur de 189s. qui correspond à celle obtenue par détermination graphique et présentée dans la figure II.32.

Un autre exemple de l'application de cette théorie concerne l'échantillon de polyester, dans la figure II.34 on détermine les deux exposants :  $n=0.15$  et  $m=0.01$ . La valeur de  $\tau$  obtenue est de 300s. encore une fois en accord avec les mesures précédentes (figure II.28).

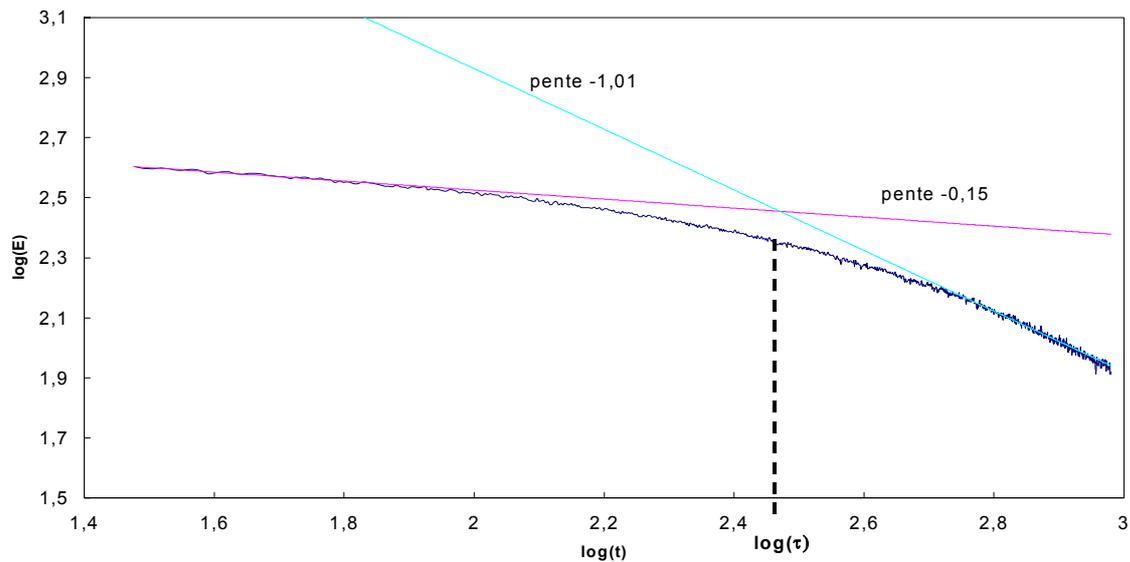


Figure II.34 - représentation de  $\log(E)$  en fonction de  $\log(t)$  pour la décharge d'un échantillon de polyester (échelle linéaire)

Il est cependant important de noter que nos échantillons étant des textiles, ils présentent donc des transitions à l'échelle des fibres notamment, qui produisent probablement des effets de surface. Cela peut expliquer certains résultats où l'on n'observe pas les deux types de décroissances polynomiales successives, comme le coton représenté à la figure II.29. Dans cet exemple, une loi de décroissance polynomiale unique semble rendre compte du comportement de l'échantillon. Cela semble également être le cas de la soie (figure II.30) : nous ne nous trouvons pas dans le cas d'isolants homogènes pour lesquels la théorie de décroissance présentée dans ce paragraphe semble très bien décrire le comportement.

## II-G Conclusion

La méthode de polarisation des échantillons de textile permet d'obtenir des informations concernant les processus de décharge dus au matériau lui-même. Nous avons vu que nous ne pouvons pas appliquer la notion de résistance de fuite à notre dispositif. En fait, la notion même de résistance n'a pas de sens physique dans les manipulations faites étant donné que nous n'avons pas affaire à des corps conducteurs. Il est donc nécessaire, pour établir la capacité d'un matériau à dissiper les charges électriques, de faire des mesures de décroissance de champ électrique.

Cependant l'interprétation de ces mesures n'est pas chose aisée comme nous avons pu le constater. Il s'avère en effet que les phénomènes de polarisation et de dépolarisation qui ont lieu au sein des échantillons de textiles étudiés n'ont pas un comportement simple comme celui que l'on peut attendre d'un condensateur standard, mais qu'au contraire, plusieurs modèles montrent l'existence d'une loi de décroissance en  $t^n$  fortement dépendante des mécanismes microscopiques de transport de charges. Au final, nous avons mis en évidence que plusieurs paramètres pourraient être utiles pour caractériser les matériaux textiles d'un point de vue électrostatique : les exposants des deux processus successifs ainsi que la constante de temps caractéristique  $\tau$ .

La polarisation reste un moyen de charger les textiles très pratique car il est simple à mettre en œuvre, ne nécessite pas de source de haute tension et est très reproductible. Cependant il n'est à première vue pas suffisamment représentatif du processus de charge le plus répandu avec les textiles, contrairement au frottement. Les mécanismes de charge par frottement et les comportements des textiles après charge par frottement seront donc les thèmes du chapitre suivant.

---

# Chapitre III

---

## Chapitre III

# Comportement des textiles après charge par frottement

### III-A Introduction

Dans le domaine du textile, la plus importante source de charges électrostatiques est la création de charges par contact ou frottement : l'effet triboélectrique. Il est dès lors naturel de vouloir reproduire ce mode de création de charges, afin d'étudier les comportements des textiles. La grande difficulté réside dans le fait que ce moyen de charger les textiles est très difficile à réaliser de manière reproductible. En effet le transfert de charge entre les deux matériaux va dépendre de nombreux paramètres tels que : la nature des matériaux, leur état de surface (rugosité), la pression lors du frottement, la vitesse de frottement, la température et le taux d'humidité du milieu ambiant... La mise au point de méthodes d'essais basées sur l'effet triboélectrique est donc très délicate, c'est un souci que l'on retrouve particulièrement au niveau de la normalisation. Un exemple d'essai normalisé (méthode n°2 de la norme EN1149-3) sera justement abordé dans ce chapitre. Les différentes mesures réalisées sont encore des mesures de champ électrique dans le domaine temporel. Ces mesures permettent d'étudier l'évolution des charges électrique après que l'on a chargé le textile par frottement, mais cela permet également de déterminer l'aptitude d'un textile à se charger et à atteindre des potentiels de surface plus ou moins importants.

Le comportement des textiles chargés de manière continue sera également étudié par mesure du champ électrique, un dispositif de mesure a été mis au point à cet effet. Par ailleurs, d'autres moyens de caractérisation seront abordés dans les deux dernières parties de ce chapitre. Ils concernent les mesures de courant de décharge et du champ électrique dynamique ; là aussi, les capteurs ont été réalisés spécialement pour ces études.

### III-B Bases théoriques de l'effet triboélectrique

L'effet triboélectrique est un phénomène connu depuis plus de deux mille ans, pourtant, la compréhension des mécanismes mis en jeu n'est pas totale. Les mécanismes de génération de charges électrostatiques par contact sont assez bien connus pour les interfaces métal/métal et métal/isolant [38, 39, 40]. La charge par contact entre métaux correspond à un échange d'électrons dû à la différence des travaux de sortie des métaux en présence. Les mécanismes restent généralement méconnus pour les interfaces isolant/isolant [41,42].

#### 1. Charge par effet de surface

##### a. Contact métal/métal

Un électron de conduction à l'intérieur d'un métal est soumis de la part de tous les ions constituant le métal à un ensemble de forces dont la résultante est nulle. Il peut donc se déplacer librement [43].

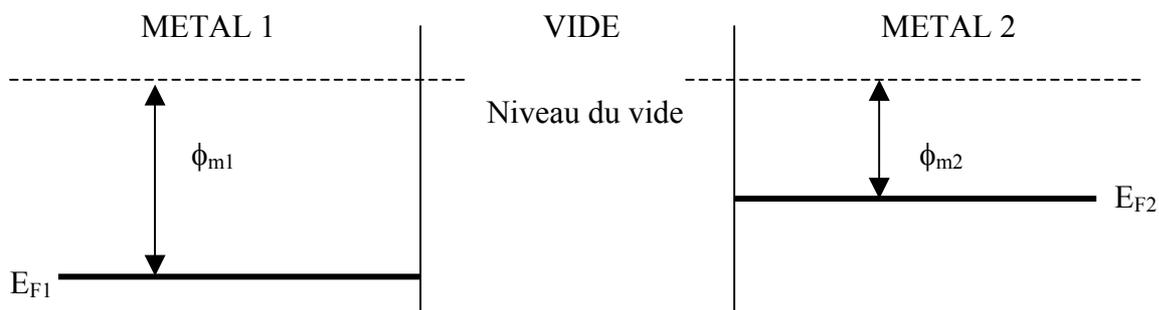


Figure III.1 – Schéma représentant les niveaux énergétiques de deux métaux avant contact

Quand le porteur arrive à la surface du métal, la compensation des forces n'est plus totale et l'électron est retenu à l'intérieur. Pour l'extraire, il faut lui fournir de l'énergie. On appelle travail de sortie du métal  $\phi_m$ , l'énergie qu'il faut donner à un électron se trouvant au niveau de Fermi  $E_F$  pour l'amener au niveau du vide (figure III.1). Le niveau du vide est l'énergie d'un électron au repos et situé à l'infini. Le travail de sortie est donc la différence d'énergie entre l'électron situé à l'infini et l'électron situé au niveau de Fermi dans le métal.

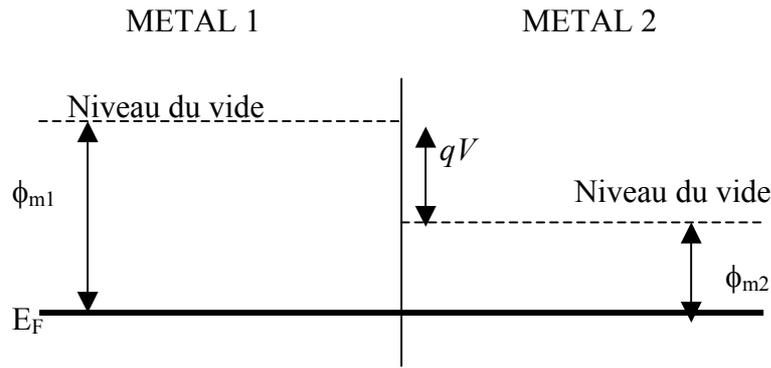


Figure III.2 – Schéma représentant les niveaux énergétiques de deux métaux en contact

Lorsque deux métaux de travaux de sortie  $(\phi_{m1}, \phi_{m2})$  sont mis en contact, la barrière de potentiel  $(qV)$  qui existe entre les deux surfaces entraîne un écoulement des électrons du métal dont le travail de sortie est le plus faible vers le métal avec un travail de sortie plus élevé (par effet tunnel), ce qui permet l'alignement des niveaux de Fermi (figure III.2).

Pour qu'un électron traverse une barrière de potentiel, il faut qu'il acquière une énergie suffisante (en appliquant un champ électrique par exemple). Cependant, la probabilité de retrouver l'électron de l'autre côté de la barrière sans que son énergie soit suffisante pour la franchir est non nulle. Il est donc possible que l'électron traverse cette barrière comme s'il existait un tunnel pour la franchir : c'est l'effet tunnel. La fonction d'onde de l'électron existe donc de l'autre côté de la barrière.

On peut exprimer le potentiel de contact par :

$$V = \frac{(\phi_{m1} - \phi_{m2})}{q} \quad \text{(III.1)}$$

la charge transmise lors du contact est

$$Q = CV = C \frac{(\phi_{m1} - \phi_{m2})}{q} \quad \text{(III.2)}$$

la capacité  $C$  du contact est donnée par

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{z} \quad \text{(III.3)}$$

où  $A$  représente la surface effective du contact,  $z$  la séparation au moment du contact,  $\epsilon_0$  étant la permittivité du vide  $(8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1})$  et  $q$  la charge électronique élémentaire de l'électron  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

Soit :

$$Q = \frac{\epsilon_0 A V}{z} \quad (\text{III.4})$$

la charge superficielle pendant le contact s'exprime alors par

$$\sigma = \frac{\epsilon_0 (\phi_{m1} - \phi_{m2})}{z q} \quad (\text{III.5})$$

Par ailleurs, lors de la séparation des métaux, il apparaît un flux d'électrons dans la direction opposée qui limite l'accumulation des charges de manière cependant très réduite. Ce phénomène est dû à la fois au retour d'électrons par effet tunnel et par ionisation de l'air. L'effet tunnel n'étant effectif que jusqu'à une distance de séparation des métaux de l'ordre du nanomètre, au-delà de cette distance le retour ne se fait plus.

### **b. Contact isolant/métal, isolant/isolant**

L'apparition de charges par contacts entre isolants et conducteurs est également la conséquence d'un transfert d'électrons [44]. Nous avons vu l'importance du rôle du travail de sortie pour les métaux. Pour les isolants, certains défauts ainsi que les états de surfaces contribuent à l'attribution d'un travail de sortie « effectif »  $\phi_i$ . Les modèles physiques pour expliquer le mode d'électrification sur les isolants sont basés sur le concept de niveaux d'énergie localisés. A cause de nombreux facteurs (traitements technologiques, chimiques, mécaniques, thermiques...), les défauts des substances sont toujours plus nombreux en surface qu'en volume. De plus, en surface l'atome ne peut établir des liaisons de valence que dans un seul plan, cette rupture de périodicité entraîne l'existence d'états électroniques permis à l'intérieur de la bande interdite. Le transfert de charge serait donc similaire à celui qui intervient entre deux métaux comme précédemment en remplaçant le travail de sortie de l'un des métaux par le travail effectif de l'isolant. Le transfert d'électrons se fait donc en théorie entre le niveau de Fermi du métal et les niveaux d'énergie localisés dans la bande interdite de l'isolant. Lors d'un contact entre un isolant et un métal ou entre deux isolants, la quantité de charge résiduelle dépend de la séparation entre les deux surfaces durant le contact et de la séparation limite pour laquelle le retour des électrons par effet tunnel cesse. En général, pour les interfaces métal/isolant la polarité de la charge développée dépend du travail de sortie « effectif » tandis que la quantité de charge générée, en l'absence de phénomène de dissipation, dépend de l'aire de contact et peut être influencée par la densité des états de surface.

Finalement la notion de travail de sortie « effectif » est conceptuellement difficile à interpréter puisque peu de choses sont connues quant au comportement et à la structure électronique des isolants, et de plus le travail de sortie d'un isolant ne peut être déterminé que par l'expérience. Par ailleurs, si le phénomène de charge ne correspond qu'à un retour à un état d'équilibre entre deux matériaux ayant des travaux de sortie différents alors il ne devrait pas avoir de

transfert de charge entre deux matériaux identiques. Or il est prouvé que deux matériaux identiques se chargent mutuellement lorsqu'ils sont mis en contact ou frottés l'un contre l'autre.

## 2. Contribution des états de surface

Les travaux de Lowell et Truscott [45,46], partant de la constatation que deux isolants identiques se chargeaient mutuellement par effet triboélectrique, ont ouvert cette autre voie d'investigation pour la compréhension du phénomène.

Prenons deux isolants, lorsqu'ils sont mis en contact, il se produit des échanges d'électrons entre les différents niveaux d'énergie libres localisés à la surface des deux isolants. En effet, chaque échantillon contient des états d'énergie localisés. Les états sont distribués sur une gamme d'énergie. En général, les états de basse énergie sont occupés, alors que ceux de haute énergie sont vides. Cependant, quelques électrons occupent parfois des états d'énergie élevés, ce sont eux qui entrent en jeu dans le phénomène triboélectrique. Le schéma suivant montre deux isolants en contact (ils sont séparés ici pour plus de clarté) :

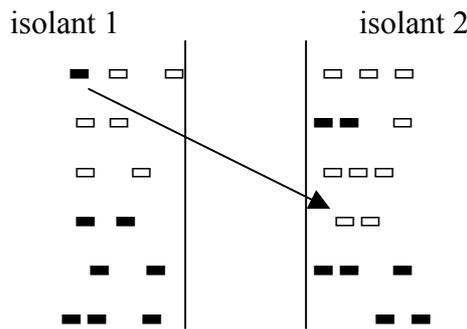


Figure III.3 – Schéma représentant les états de surface de deux isolants en contact

Les rectangles noircis représentent les états occupés par des électrons, les rectangles blancs sont des états vides. La théorie suppose que les électrons dans un état d'énergie élevée ne sont pas capables de redescendre seul, par transition, vers des niveaux plus bas en énergie dans le même isolant, même si cela est favorisé thermodynamiquement, car ces sites sont très localisés et la différence d'énergie est trop importante.

Ainsi, si deux isolants sont mis en contact et sont frottés l'un contre l'autre, certains états occupés de haute énergie près de la surface peuvent rencontrer des états vides de plus basse énergie au-delà de l'interface, il se produira alors un transfert d'électron par effet tunnel d'un isolant à l'autre. Ces échanges permettent ainsi aux deux isolants de se rapprocher de l'équilibre thermodynamique.

Si deux plans infinis d'un même matériau sont frottés ensemble, il y aura des échanges d'électrons entre les deux, mais le transfert total de charge restera nul car par symétrie on peut

prévoir qu'il y aura statistiquement autant d'échanges d'électrons dans un sens que dans l'autre. Par contre, si les frottements sont asymétriques, une surface réduite frottant avec une surface plus étendue, on peut imaginer que tout au long du frottement la petite surface va perdre tous les électrons de haute énergie en faveur de la grande surface, tandis qu'elle va recevoir beaucoup plus d'électrons de la part de la grande surface, puisque au fur et à mesure du frottement la petite surface rencontre une nouvelle partie de la grande surface où il n'y a pas encore eu de transfert d'électrons. Il y aura donc une charge totale transférée, c'est ce qu'ont tenté de montrer Lowell et Truscott [46].

Ainsi la notion de travail de sortie effectif d'un isolant peut être considérée comme une propriété liée à la surface de l'isolant, les états de surface étant des niveaux d'énergie présents dans la bande interdite du matériau mais localisés à la surface : c'est la théorie des états de surface. Il semblerait qu'il y ait deux comportements limites quant au transfert de charges dans cette théorie [47]. Ces deux comportements dépendent de la densité des états de surface dans les isolants mis en jeu.

Dans le cas d'une faible densité d'états de surface, le mécanisme intervenant est celui décrit plus haut, c'est-à-dire que les électrons de l'isolant de travail de sortie effectif le plus faible vont venir remplir les niveaux d'énergie libres de l'autre isolant. On peut déterminer la densité de charge transférée par unité de surface par la relation :

$$\sigma_L = -eN(\phi_1 - \phi_2) \quad (\text{III.6})$$

où  $e$  représente la charge électronique élémentaire,  $N$  la densité d'états de surface par unité de surface et par unité d'énergie,  $\phi_1$  et  $\phi_2$  sont les travaux de sortie effectifs des deux isolants (ici on a  $\phi_1 < \phi_2$ ).

Dans le cas d'une forte densité d'états de surface, le mécanisme est semblable à celui décrit pour l'interaction entre deux métaux, c'est-à-dire que les niveaux de Fermi s'alignent créant l'apparition d'une différence de potentiel de contact. La densité surfacique de charges transférée s'exprime alors comme suit :

$$\sigma_H = -\frac{\epsilon_0 (\phi_1 - \phi_2)}{z e} \quad (\text{III.7})$$

où  $z$  est la séparation entre les deux isolants au moment du contact,  $\epsilon_0$  étant la permittivité du vide et  $e$  la charge électronique élémentaire.

On peut interpréter cela par le fait que l'énergie acquise lors du transfert de charges sert à combler la différence d'énergie entre les travaux de sortie à la surface. Seulement, les niveaux de charge prévus par la théorie sont toujours plus élevés que les mesures effectuées. En fait, il a été montré que lors de la séparation des surfaces, il y a un retour de charges qui se fait soit par décharge dans l'air ionisé, soit par effet tunnel, la charge totale transférée dépend alors de ces mécanismes [44].

Enfin certains auteurs pensent par ailleurs qu'une partie du transfert de charge lors de l'effet triboélectrique peut être attribué à des espèces ioniques.

### III-C Expériences triboélectriques préliminaires

Nos premières expériences triboélectriques n'ont pas été réalisées avec un dispositif permettant de garantir une reproductibilité acceptable. Cependant des efforts dans ce sens ont néanmoins été réalisés afin de pouvoir comparer et interpréter les comportements des différents textiles testés.

#### 1. Mesures de champ électrique après frottement pour divers échantillons textiles

##### a. Description du protocole de mesure

Les matériaux sous test sont posés sur un support isolant en PVC. L'échantillon de textile se trouve directement sur la partie en PVC à 9.5 cm de l'objectif du moulin à champ (figure III.4). Le textile est alors frotté manuellement à l'aide d'un disque en PVC de 18cm de diamètre et le moulin à champ relève l'évolution du champ électrique. Les expériences se sont déroulées dans les conditions du laboratoire TELICE en hygrométrie et température non contrôlées.

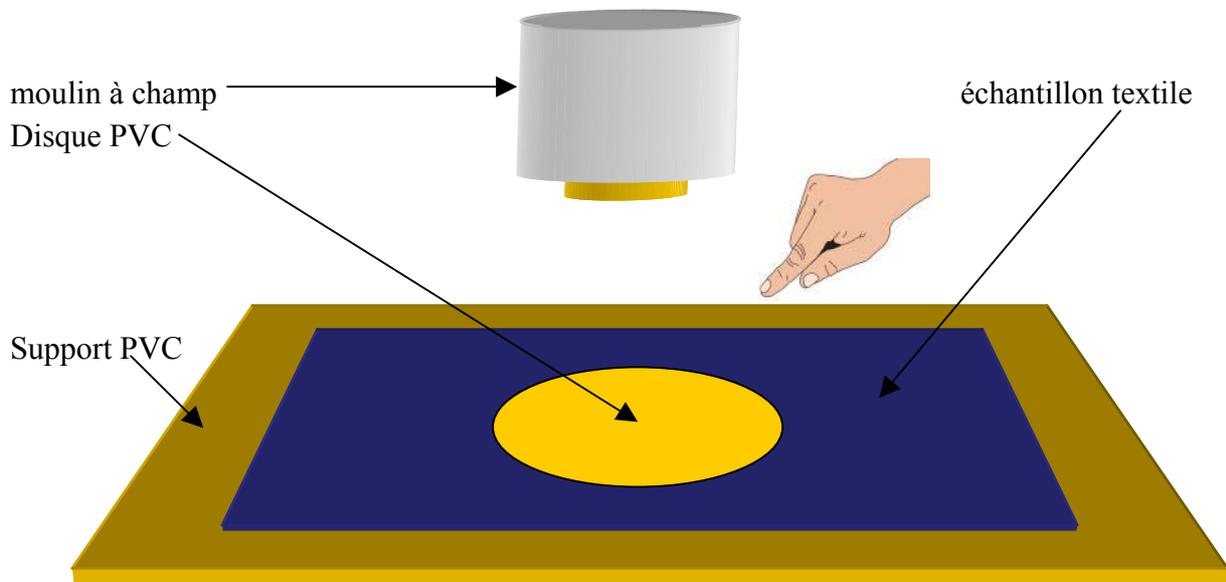


Figure III.4 – Schéma de principe des essais triboélectriques préliminaires

**b. Résultats et commentaires**

Les résultats obtenus sont présentés par les courbes des figures III.5 et III.6. Les essais ont été faits sur des échantillons posés directement sur le support en PVC sans plan de masse. Les matériaux expérimentaux ont pour origine physique :

- coton
- laine
- lin/coton
- papier
- polyester
- chlorofibre

Il a été nécessaire de séparer les courbes de polyester et de chlorofibre des autres pour un souci de clarté. En effet, on peut remarquer que les niveaux maximums de champ électrique atteints par le polyester (**900 V/m**) et par la chlorofibre (**3,8 kV/m**) sont bien inférieurs aux maximums obtenus pour les autres échantillons. Ces derniers présentent des valeurs de champ maximums tous supérieurs à **3 kV/m**, avec un maximum particulièrement élevé pour le coton qui atteint presque la valeur de **20 kV/m**.

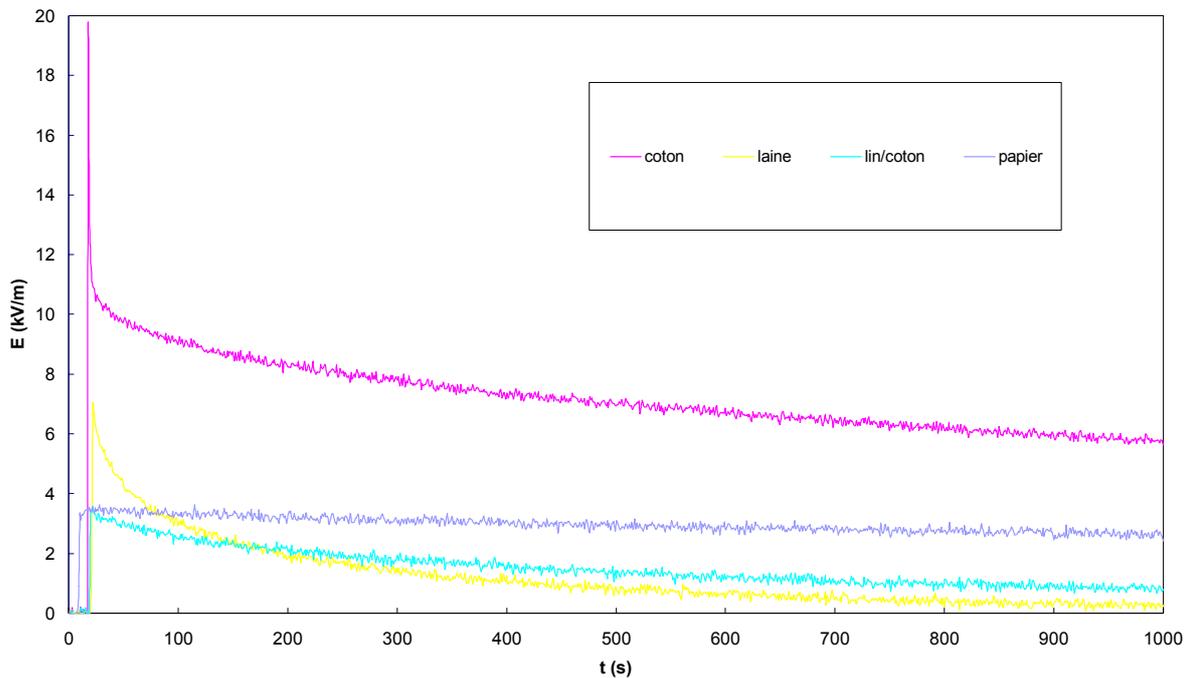
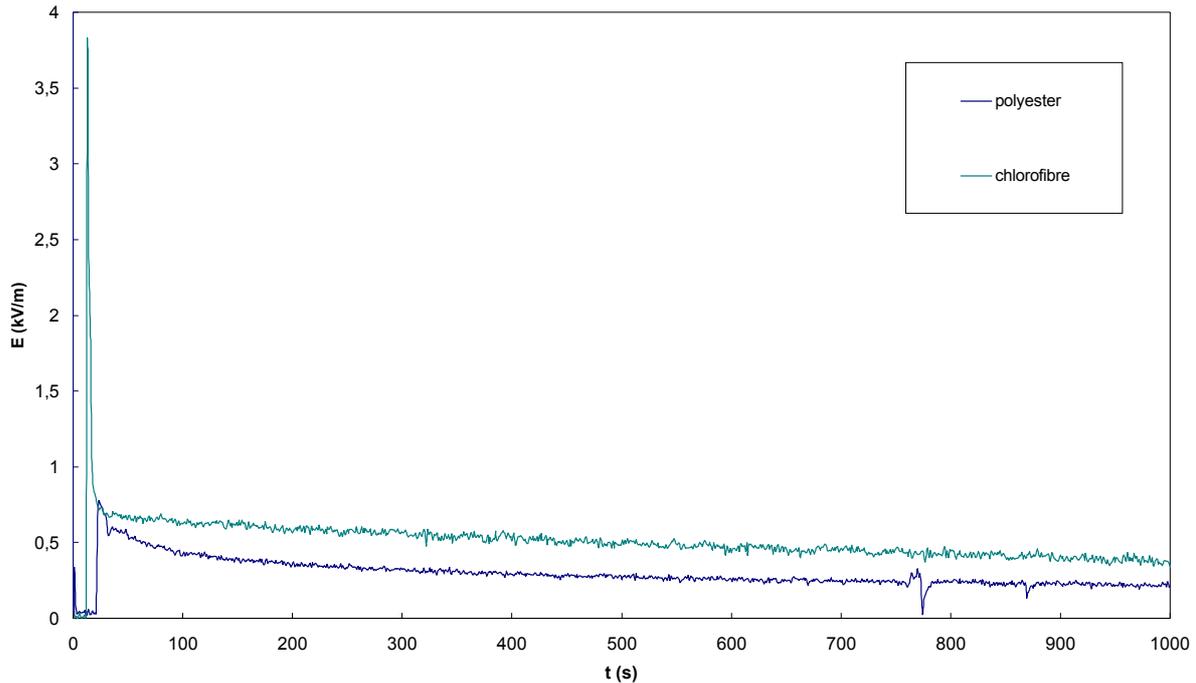


Figure III.5 – Evolution du champ électrique pour quelques textiles chargés par frottement



*Figure III.6 – Evolution du champ électrique pour les échantillons de polyester et de chlorofibre chargés par frottement*

Ces mesures permettent d'obtenir plusieurs informations sur le comportement des échantillons chargés par frottement. La principale concerne l'évolution de la charge. L'enregistrement en fonction du temps permet de suivre la décharge après frottement et nous informe sur le temps nécessaire pour que la charge s'évacue. L'autre information importante concerne le niveau de charge de l'échantillon donné par le maximum de champ électrique mesuré au début de chaque test.

On s'aperçoit que les résultats varient fortement d'un échantillon à l'autre. Les temps de décharge contrairement aux essais de polarisation sont tous supérieurs à 1000 secondes. Cependant ils diffèrent entre échantillon. La laine, par exemple, a un temps de demi-décharge de **52 s** la valeur du champ électrique passant de **7 kV/m** à **3,5 kV/m**, alors que le champ maximum dans le cas du papier n'est pas divisé par 2 durant toute la période de mesure (1000 s). En ce qui concerne les niveaux maximums de champ électrique atteints, les valeurs varient également beaucoup comme on peut le voir pour le polyester et le coton, déjà cités. Par ailleurs, dans le cas du coton et de la chlorofibre, les niveaux de champ relevés après charge sont particulièrement élevés ; environ **20 kV/m** pour le coton et **4 kV/m** pour la chlorofibre, et chutent rapidement puisque le coton passe à **11 kV/m** en **2 s.** et la chlorofibre à **1 kV/m** en **4 s.** avant de suivre une décroissance plus lente. Après plusieurs autres tests, nous nous sommes rendu compte qu'il s'agissait de pics dus à la manipulation de l'opérateur car nous ne retrouvons plus ces comportements dans les expériences suivantes menées avec un dispositif plus perfectionné. Par ailleurs, d'autres essais ont également montré que les niveaux de charge

atteints étaient fortement dépendants de la vitesse de déplacement et de la pression exercée sur l'échantillon lors du frottement.

Il est donc nécessaire de limiter le plus possible les manipulations humaines et de disposer d'un système automatisé pour améliorer la reproductibilité des mesures. Ce problème de reproductibilité est d'ailleurs le principal inconvénient relaté par les normes en ce qui concerne les tests triboélectriques. Une des rares normes basées sur l'effet triboélectrique a été présentée dans le chapitre I (paragraphe I-D.2). Ce dispositif, issu de la norme EN1149-3 (première méthode d'essai), développée pour tester des textiles techniques dédiés aux vêtements de protection, a été mis au point à l'IFTH afin de s'affranchir le plus possible du facteur humain pour les expériences suivantes. Ainsi, dans les deux paragraphes suivants (III-C.2 et III-C.3), nous utiliserons cette méthode d'essai sur deux sites différents de l'IFTH : la délégation de Lyon et celle de Lille, afin de comparer les résultats et de discuter de leur reproductibilité.

## **2. Essais triboélectriques sur le dispositif normalisé EN1149-3 de l'IFTH-Lyon**

### **a. Principe des mesures réalisées**

La figure III.7 présente le schéma de principe du dispositif de mesure. Les frotteurs utilisés sont de deux sortes : l'un en aluminium, l'autre en polyéthylène traité antistatique. Les bandes de tissu font 5 cm de large sur 30 cm de long. Elles sont situées à 5 cm de l'objectif du moulin à champ. Un poids (de 138g) à leur base permet de les maintenir tendues pendant le frottement. Pour effectuer les mesures, on lâche le mobile portant les frotteurs, situé en position haute, il frotte alors le tissu pendant sa chute jusqu'à une butée. Le moulin à champ, relié à un ordinateur, enregistre l'évolution du champ électrique en fonction du temps.

Afin de décontaminer l'échantillon, on le soumet à un jet d'air ionisé. Cet air ionisé est produit par un pistolet à air comprimé dont l'embout présente des électrodes portées à une haute tension et qui ionise l'air à son passage par effet couronne. Les essais ont tous été faits en atmosphère contrôlée, à 23°C et 50% d'humidité. En principe, dans la norme, il est nécessaire de faire les essais sur trois échantillons d'un même textile, d'en déterminer les temps de demi-décharge et de faire la moyenne de ces trois valeurs. Dans les essais qui suivent, nous avons voulu procéder de la même manière en faisant toujours trois essais avec des échantillons d'un même textile, ainsi les trois essais sont identifiés par le nom du textile suivi des chiffres 1,2 et 3. (exemple : polyester1, polyester2 et polyester3 correspondent à trois essais sur trois bandes de polyester provenant du même échantillon de textile).

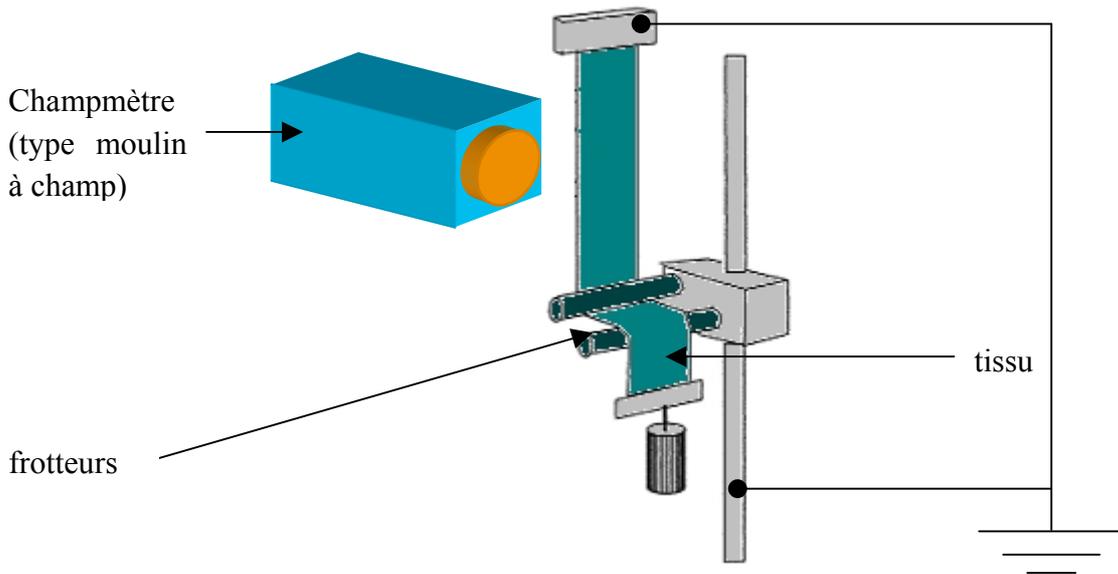


Figure III.7 – Schéma du dispositif d'essai triboélectrique issu de la première méthode de la norme EN1149-3

#### b. Résultats et commentaires

Les résultats obtenus sont présentés dans les courbes qui suivent. Les premières mesures sont entachées de bruit causé principalement par les câblages du système, en fait, les câbles utilisés n'étaient pas blindés. Par la suite nous avons décidé de filtrer les signaux au moyen d'un filtre passe bas (fréquence de coupure 4 kHz) afin d'éliminer une partie du bruit dont la fréquence est beaucoup plus grande en comparaison avec les phénomènes que nous désirons observer.

Les premières courbes concernent les échantillons de polyester (figures III.8 et III.9). Nous observons le comportement du polyester en fonction du type de frotteur. On s'aperçoit que le polyester se charge négativement au contact des frotteurs en aluminium et positivement avec les frotteurs en polyéthylène. Ce résultat est en accord avec la série triboélectrique citée dans le premier chapitre (paragraphe I-C.1) où l'on voit que l'aluminium se trouve au-dessus du polyester, lui-même au-dessus du polyéthylène. L'ordre dans la liste progresse du positif vers le négatif, en d'autres termes, lorsqu'un échantillon est au-dessus d'un autre, il se charge positivement à son contact, ce que l'on observe ici dans le cas du polyester.

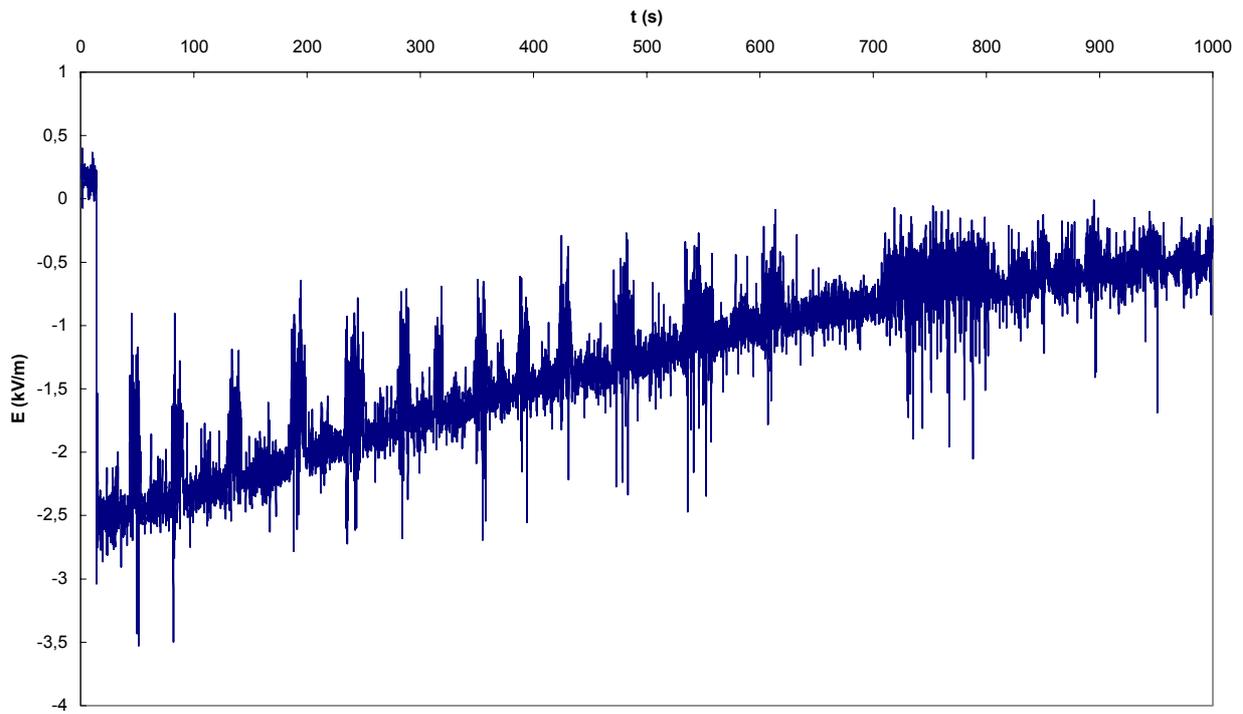


Figure III.8 – Evolution du champ électrique d'un échantillon de polyester frotté avec les frotteurs en aluminium

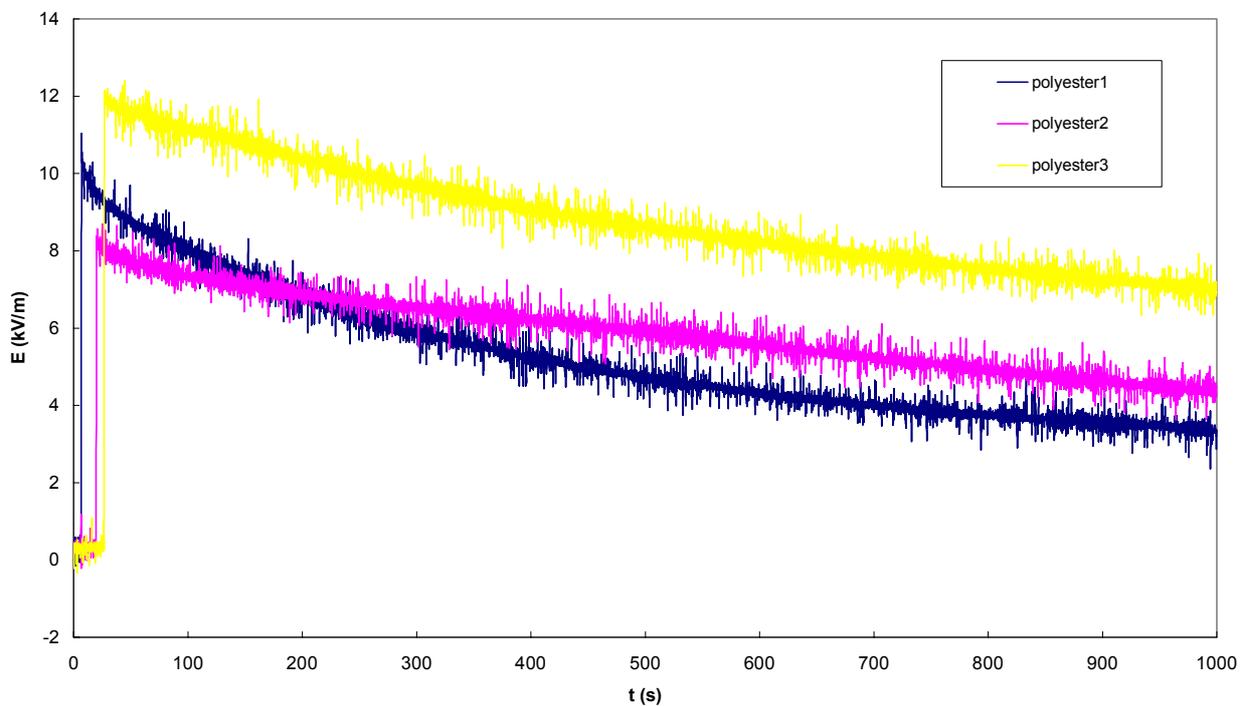


Figure III.9 – Evolution du champ électrique des échantillons de polyester frottés avec les frotteurs en polyéthylène

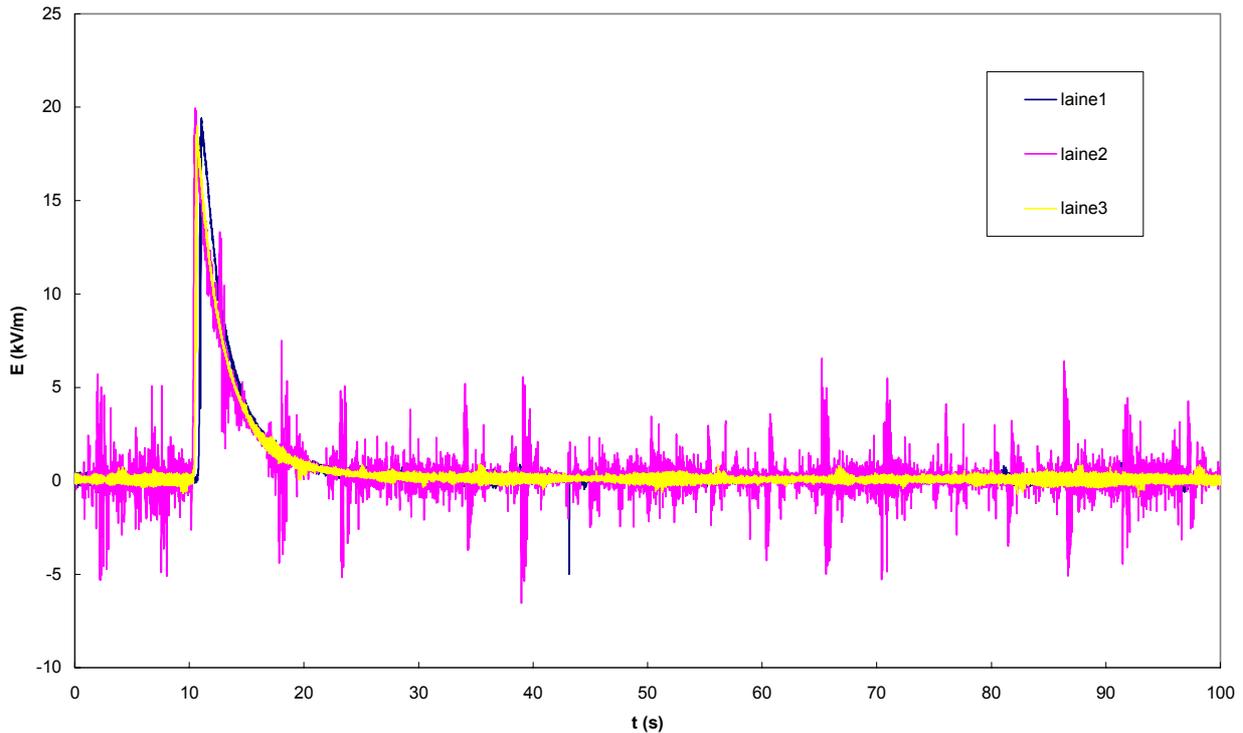


Figure III.10 – Evolution du champ électrique des échantillons de laine frottés avec les frotteurs en polyéthylène

Nous obtenons une bonne reproductibilité des résultats pour les bandes de textiles issues d'un même échantillon (figure III.10).

Ces conditions de reproductibilité sont en général vérifiées pour la laine, toutefois, elles ne le sont pas pour le polyester où des écarts sont visibles (figure III.9), même s'ils restent limités (les maximums varient entre **8** et **12 kV/m**).

Dans la série triboélectrique (section I-C.1.a), la laine et la soie se trouvent tous deux au-dessus de l'aluminium et du polyéthylène ce qui est en accord avec nos résultats puisque dans tous les essais, ces deux matériaux se chargent positivement (figure III.11). Par ailleurs la figure III.11 montre également l'effet du type de frotteur sur le niveau de charge à la surface du textile. En effet, les frottements effectués avec les frotteurs en aluminium ont toujours généré une quantité de charge inférieure à celle obtenue par le frottement avec les frotteurs en polyéthylène pour un textile donné. Cela peut s'expliquer par le fait que les frotteurs en aluminium étant plus conducteurs, lors du frottement, les mécanismes de charge et de décharge ayant lieu en même temps, il y a évacuation des charges de manière plus efficace avec les frotteurs en aluminium qu'avec ceux en polyéthylène, matériau plus isolant. De plus cela peut se voir aussi par lecture directe de la série triboélectrique puisque l'aluminium se situe juste en dessous de la laine et de la soie, alors que le polyéthylène est beaucoup plus éloigné. Selon ce classement, plus les deux matériaux sont éloignés l'un de l'autre, plus la charge générée lors du frottement sera importante.

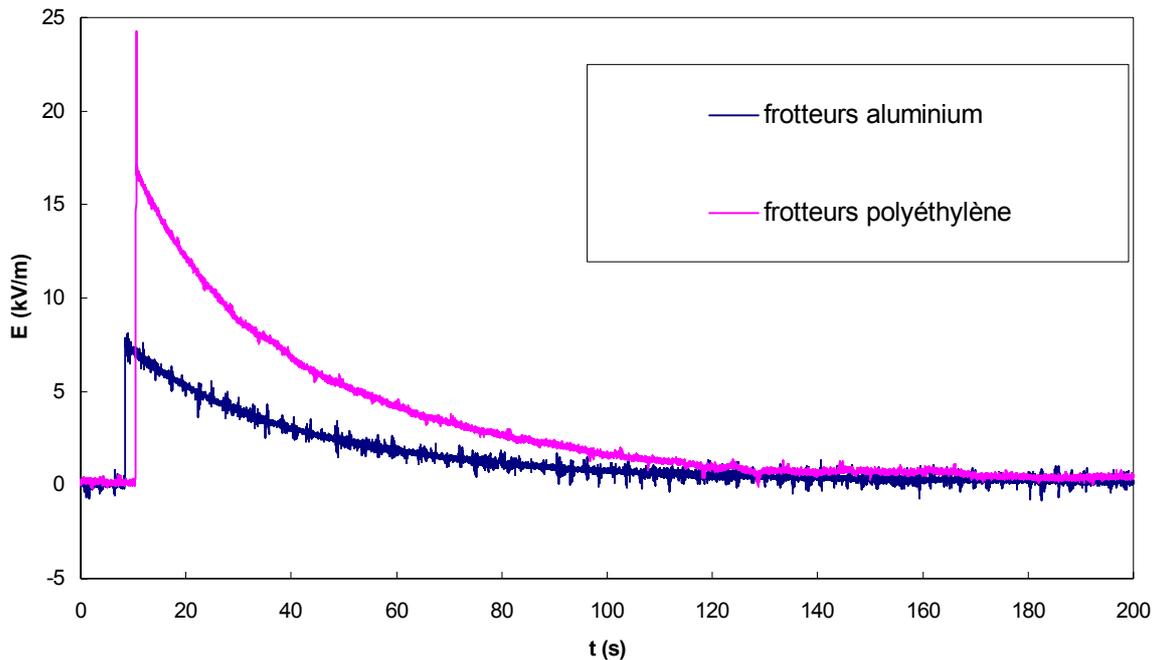


Figure III.11 – Evolution du champ électrique des échantillons de soie : comparaison entre frotteurs en aluminium et frotteurs en polyéthylène

Les niveaux de champs mesurés pour la soie sont donc très différents selon que l'on utilise les frotteurs en aluminium ou en polyéthylène. Le champ maximum dans le cas du polyéthylène est supérieur d'un facteur **2** environ. Même si les niveaux ne sont pas les mêmes, on note cependant que le temps de décharge semble identique dans les deux cas : le temps de demi-décharge étant de **22s** environ. Il semblerait donc que la nature du frottement n'influe pas sur les mécanismes de décharge qui serait donc une propriété intrinsèque au matériau.

La plus grande difficulté liée aux essais triboélectriques reste donc la reproductibilité des résultats. Dans la partie suivante, une étude comparative est menée entre le site de Lyon et celui de Lille concernant la méthode triboélectrique normalisée.

### 3. Essais triboélectriques sur le dispositif normalisé EN1149-3 de l'IFTH-Lille : étude comparative

#### a. Principe des mesures

Le principe de l'expérience est le même que précédemment, seulement, le dispositif utilisé est celui de la délégation de Lille dont la photo est donnée ci-dessous.

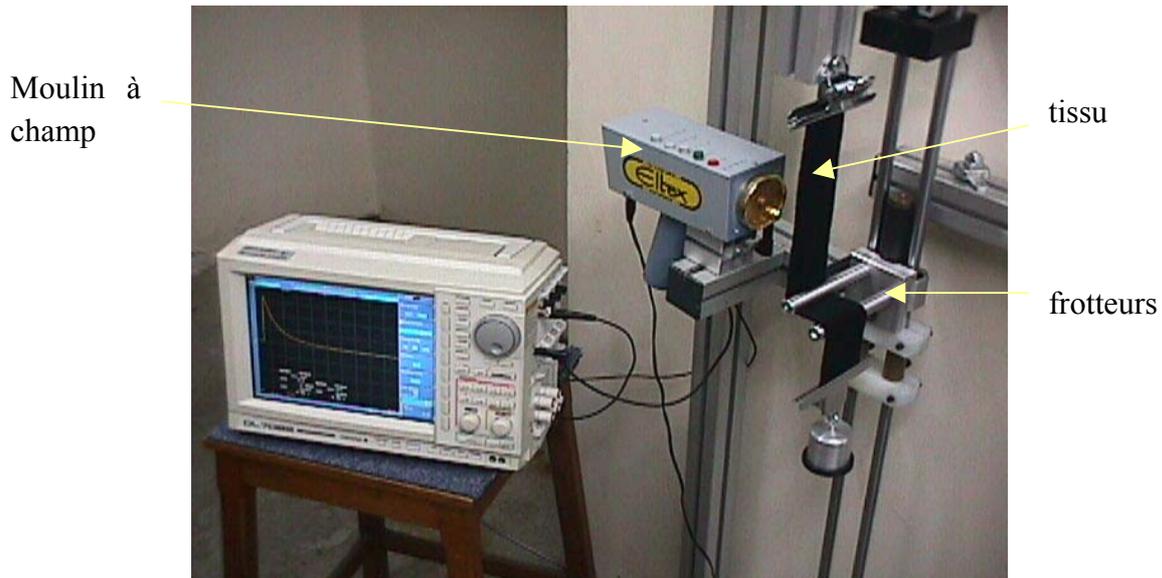


Figure III.12 – Dispositif développé à l'IFTH Lille conformément à la norme EN1149-3

Le but principal de ces manipulations est la comparaison des résultats avec ceux obtenus à Lyon. On peut ainsi évaluer la reproductibilité des mesures. Les seules mesures que nous pouvons comparer sont celles faites avec les frotteurs en aluminium, en effet, nous ne disposons pas des frotteurs en polyéthylène à Lille. Les conditions atmosphériques étaient les mêmes, c'est-à-dire : une humidité relative de 50% et une température de 23°C.

#### b. Résultats et commentaires

La figure III.13 montre les résultats de comparaison entre les mesures faites à Lyon et à Lille pour les échantillons de laine. Sur cette figure, on peut voir que les résultats obtenus pour les deux campagnes de mesures sont peu dispersés. Les amplitudes maximums de champ électrique varient entre **9 kV/m** et **13 kV/m** ce qui correspond pour les temps de demi-décharge à un intervalle compris entre **3.9 s** et **5.3 s**.

La figure III.14 représente les mêmes comparaisons pour les échantillons de soie. Les résultats, dans ce cas, sont nettement plus dispersés. L'écart, entre les maximums de champ, atteint presque 10 kV/m et les temps de décharge s'étalent de 27s à 82s environ. On s'aperçoit que la reproductibilité entre laboratoires n'est pas systématique et que pour cet échantillon, cela reste très difficile de retrouver les mêmes résultats d'un laboratoire à l'autre.

Ceci est encore plus frappant sur la figure III.15, où les courbes montrent la comparaison entre les essais faits sur les échantillons de polyester à Lyon et à Lille. On peut remarquer que le premier essai à Lille donne un résultat similaire à celui de Lyon. Par contre le deuxième essai, fait sur le même échantillon, juste après le premier, donne un résultat complètement différent, la polarité de la charge a carrément changé. Les essais sur les autres bandes de polyester montrent également des charges positives.

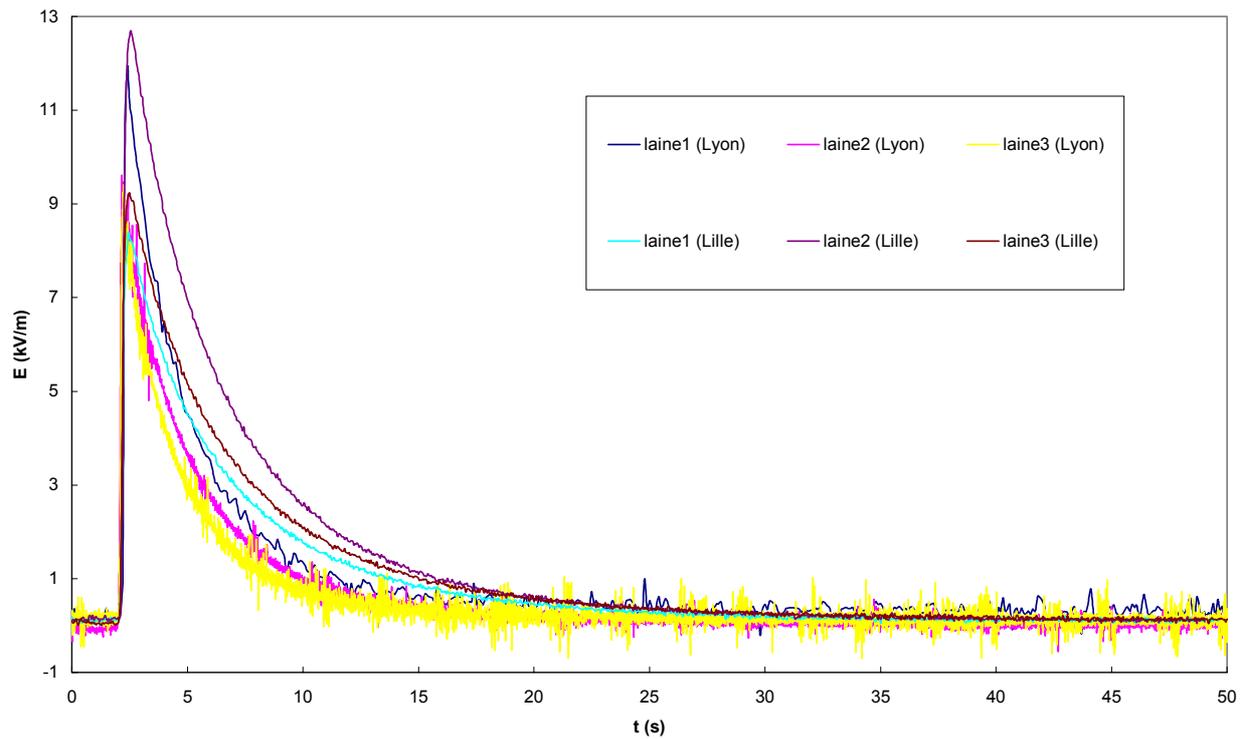


Figure III.13 – Comparaison des essais pour les échantillons de laine

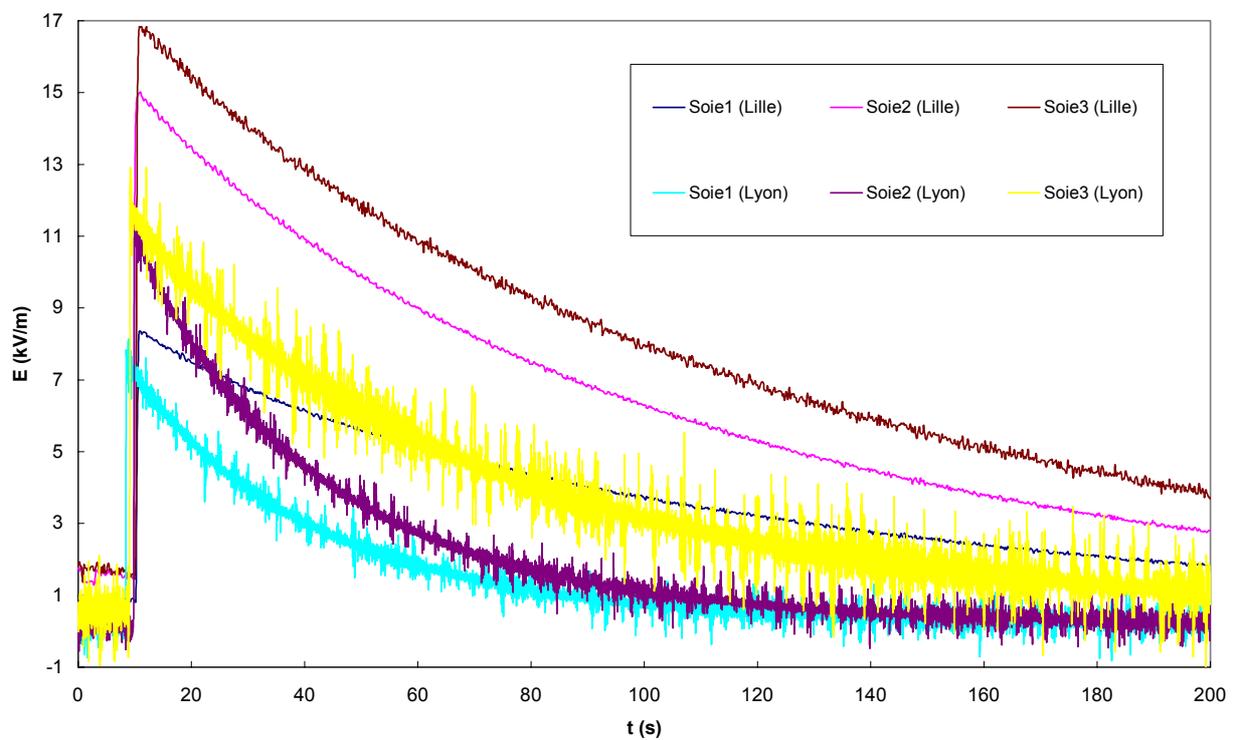


Figure III.14 – Comparaison des essais pour les échantillons de soie

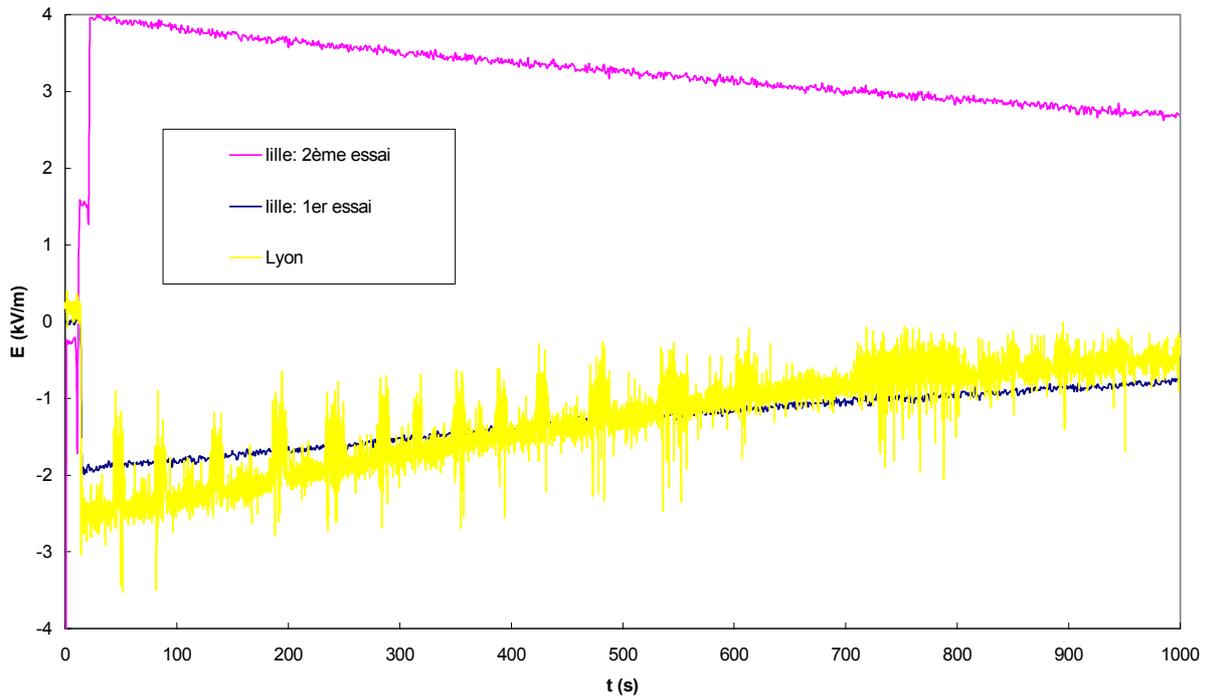


Figure III.15 – Essais triboélectriques faits sur l'échantillon « polyester3 » à Lyon et à Lille

La polarisation positive est donc en contradiction avec la position du polyester dans les séries triboélectriques vis-à-vis de l'aluminium. Ce résultat confirme que les séries triboélectriques ne respectent pas les classements absolus des matériaux. Cette facilité qu'a un matériau à changer de polarité lors d'un frottement reste un grand problème pour sa caractérisation. Ainsi, Schein [48] cite trois études différentes où le téflon se charge positivement, négativement ou pas du tout, lorsqu'il est en contact avec de l'or.

Malgré ces anomalies, une relative reproductibilité des résultats peut être obtenue. Dans le cas de la méthode normalisée (EN1149-3), dédiée à la caractérisation de matériaux antistatiques possédant certaines propriétés conductrices, cette reproductibilité a été montrée par de nombreux tests.

Cette méthode d'essai est un test pour évaluer dans quelle mesure un textile peut évacuer les charges électriques créées par frottement. Cependant cette information reste à bien des égards insuffisante pour caractériser ces matériaux. Il est important de connaître, en plus du temps de décharge, la propension qu'a le matériau à se charger ; le niveau maximum du champ électrique que l'on peut mesurer à sa surface. Ces tests nous donnent une partie de l'information par le biais de la mesure de l'amplitude maximale du champ, mais cela reste insuffisant car la charge peut en effet augmenter si les frottements sont répétitifs. La propension à l'accumulation de charge est donc une caractéristique intéressante à étudier ; elle fait l'objet de la partie suivante.

### III-D Etude de la propension à l'accumulation de charges électriques et confrontation à la décharge par relaxation dipolaire.

Les frottements entre deux matériaux entraînent un transfert de charge. La répétition de ces contacts a pour conséquence une accumulation de ces charges. Cette accumulation, si elle n'est pas concurrencée par la décharge du matériau, provoque une augmentation du potentiel électrique de surface qui peut dès lors devenir nuisible, voire dangereux. Nous appellerons cette propriété la « chargeabilité ».

#### 1. Comportement de la « chargeabilité » avec la nature du textile

On peut très bien envisager qu'un textile évacue rapidement les charges mais le niveau de potentiel atteint à sa surface lors du frottement étant trop élevé, celui-ci reste dangereux. Inversement, un échantillon peut très bien retenir des charges électrostatiques pendant une longue durée mais avec un potentiel de surface inoffensif. La figure III.16 illustre les comportements observés sur le polyester, la laine et la soie, les charges sont déposées par frottement selon la méthode EN1149-3.

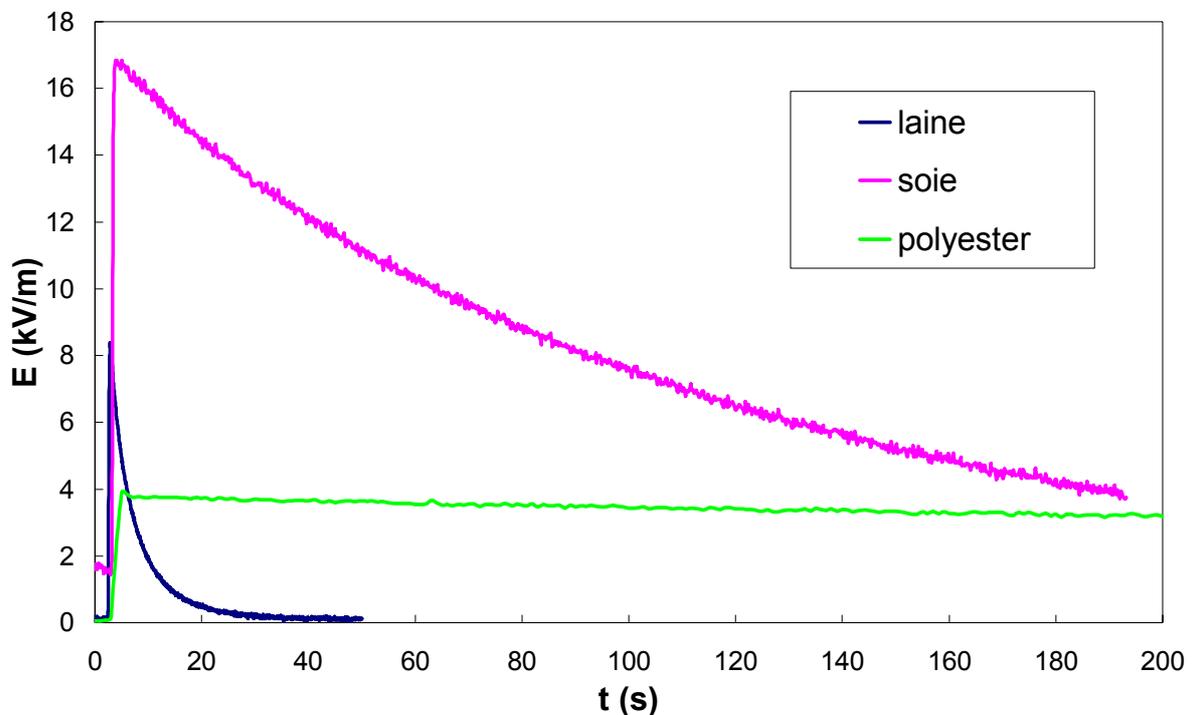


Figure III.16 – Comparaison des niveaux de champ électrique et du temps de décharge entre les échantillons de polyester, de laine et de soie après charge par frottement.

Les chiffres obtenus montrent que le dépôt de charge pour la soie présente un champ électrique maximum de **17 kV/m** avec un temps de demi-décharge d'environ **80 s.**, le champ électrique pour la laine atteint la valeur maximale de **8 kV/m** environ et se décharge presque totalement en un peu plus de **20 s.**, quant au polyester, il se charge à près de **4 kV/m** et garde pratiquement ce niveau pendant toute la durée de l'essai.

Ce phénomène a été relaté pour d'autres matériaux dans la littérature, notamment N. Wilson [49]. Il en ressort que de nombreux facteurs influencent l'amplitude de la charge générée par frottement :

- l'affinité relative des matériaux pour une polarité positive ou négative (lié probablement aux travaux de sortie des matériaux)
- la résistance électrique des matériaux (dépendant de l'humidité et de la température de l'air ambiant)
- l'aire de contact
- la pression et la vitesse de frottement entre les matériaux

La nature des charges échangées reste incertaine, probablement des électrons, mais aussi des ions ou bien les deux. Pour Wilson, les textiles présentant beaucoup d'impuretés, surtout en surface, les ions semblent être les entités responsables de ce transfert de charge.

Les données microscopiques de ces échantillons rappelées dans le chapitre I paragraphe I-E.2 peuvent aider à la compréhension de ces phénomènes.

La soie se charge à un potentiel élevé comme le montre la figure, ceci peut probablement être dû en partie à la surface de l'échantillon qui, malgré son aspect bien ordonné, présente des fibrilles à sa surface. Les fibres de soie peuvent également présenter des grés en surface ce qui favoriserait la génération de charges par frottement. La décharge est assez rapide, probablement parce que la soie est capable d'absorber jusqu'à 30% de son poids en eau. De plus, c'est une étoffe qui est un bon isolant thermique, accumulant efficacement l'air, or les essais ont été faits à des hygrométries supérieures à 50%, conditions suffisantes pour favoriser la décharge des échantillons.

L'échantillon de laine a une surface assez désordonnée, de plus, les fibres présentent des « écailles » en surface qui augmentent probablement la surface spécifique de contact ce qui peut expliquer le niveau de charge élevé. En outre, la décharge de l'échantillon est plutôt rapide, comportement dû au fait que la fibre est très hydrophile (plus hydrophile que la soie). La laine est également un bon isolant thermique, nous pouvons donc appliquer ici le même raisonnement que plus haut concernant la décharge accentuée due à l'air humide.

En ce qui concerne le polyester, il présente une surface beaucoup plus régulière que les deux autres échantillons et beaucoup plus plane également. Cette régularité est due au processus de fabrication, et explique en partie le faible niveau de charge atteint par l'échantillon. La décharge, quant à elle, est très lente, probablement due à la structure très compacte de l'échantillon et surtout à la nature hydrophobe de cette fibre.

Pour associer plus efficacement l'impact de l'état de surface lors des processus de charge et décharge, nous avons développé une méthode spécifique de test décrite au paragraphe suivant.

## 2. Description du procédé de charge continue par frottement

### a. Principe

La figure III.17 montre la photographie du dispositif dont le principe est basé sur le frottement d'un échantillon de textile posé sur un plateau circulaire tournant.

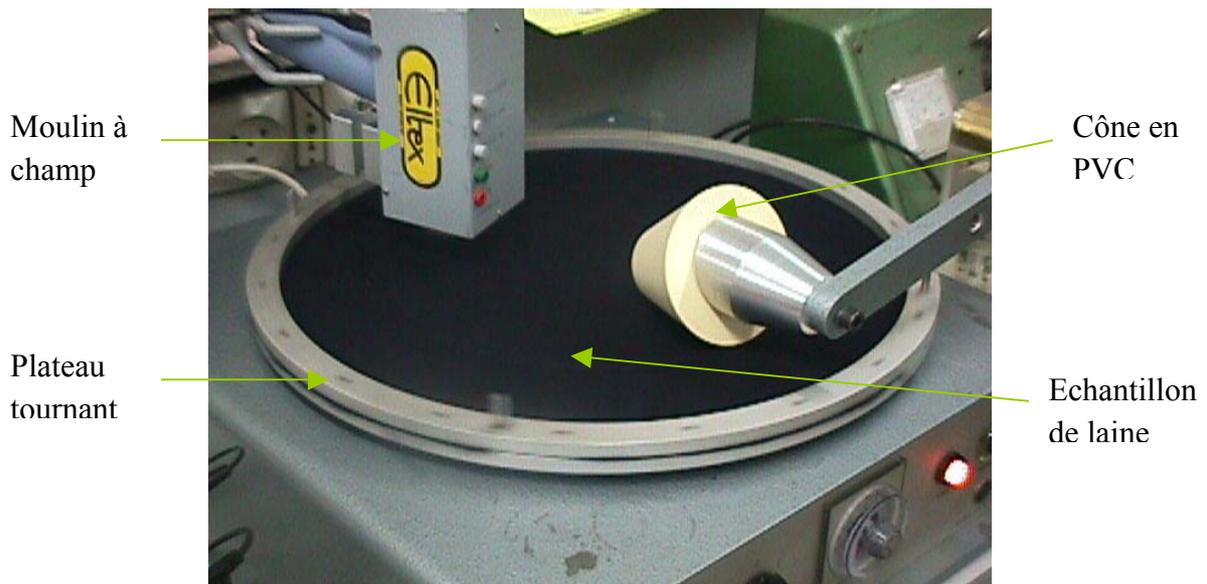


Figure III.17 – Photographie du dispositif de mesure à plateau tournant

La charge électrique est générée par frottement continu à la surface de l'échantillon de textile posé sur le plateau tournant. Le plateau est métallique, et il est relié à la terre par la masse de l'appareil. Cependant, il est possible d'isoler l'échantillon de textile en intercalant un disque isolant entre l'échantillon et le plateau métallique : dans ce cas, seuls quelques points du textile sont reliés à la terre via le plateau par le contact existant entre l'anneau supérieur servant à immobiliser l'échantillon et le plateau métallique. Le frotteur utilisé a une forme conique, ce qui lui permet de rouler sur le textile en réduisant les phénomènes de glissement. Nous disposons de deux types de frotteurs : un frotteur en aluminium et un frotteur en PVC. Un moulin à champ permet de mesurer le champ électrique à la surface de l'échantillon. Le principe est donc basé sur la génération de charges électriques à la surface du textile par contact continu entre le frotteur et l'échantillon. La vitesse de rotation est de 30 tours par minute et le diamètre du plateau est de 45 cm. Ce dispositif permet de suivre l'accumulation de charge pendant un frottement entretenu.

## b. Résultats de mesure

Les premières mesures ont été menées avec le cône en PVC. La figure III.18 représente l'évolution du champ électrique pour un échantillon de laine en contact avec le plan de masse, et ensuite isolé du plan de masse. Dans les deux cas l'échantillon a été chargé pendant 80s. pour une température de 21°C et un taux d'humidité de 50%.

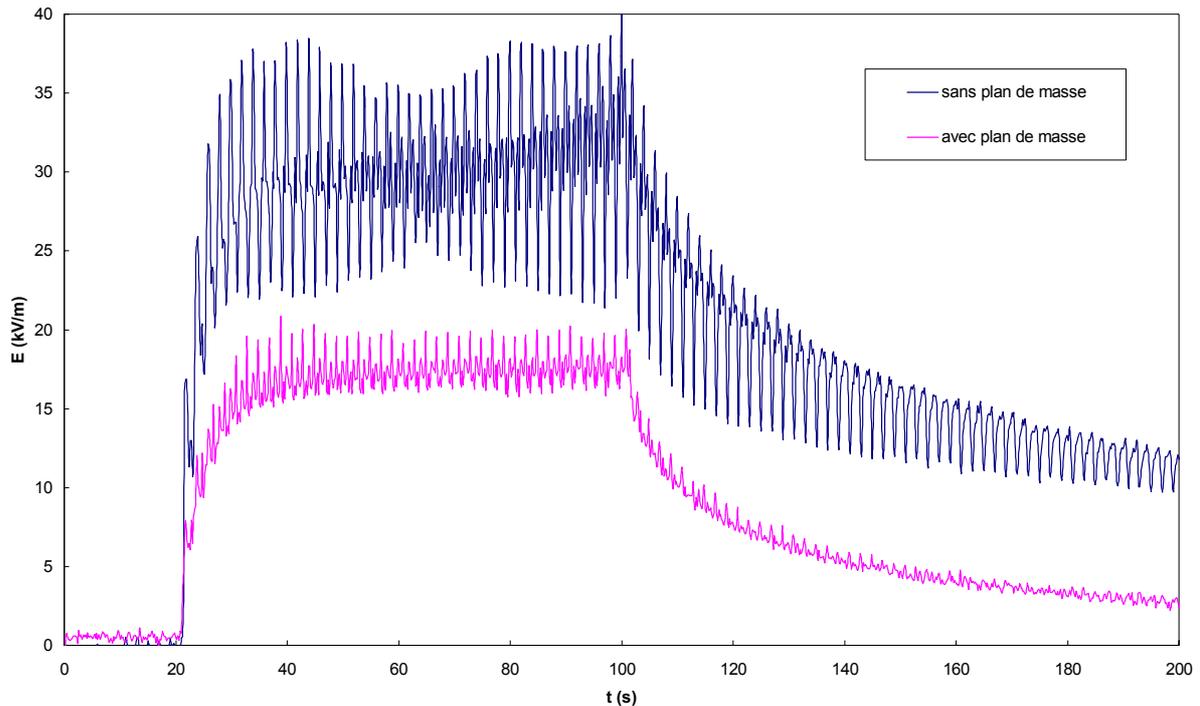


Figure III.18 – Comparaison de l'évolution du champ électrique avec et sans plan de masse, après frottement pendant 80s. de l'échantillon de laine. Le moulin à champ est positionné à 2.5 cm de la surface du textile.

Le temps de charge choisi est de 80s. pour des raisons de gain de temps. En effet des mesures menées sur des durées plus longues (4h) montrent que le champ mesuré au bout de 80s. correspond à environ **70%** du champ maximum mesuré au bout de 4h. On observe donc une charge progressive du textile jusqu'à saturation.

Les courbes de la figure III.18 montrent des signaux entachés de bruit. En fait, les fluctuations observées correspondent à des irrégularités de la surface du textile. En effet, à cause des rotations du cône et des frottements, il apparaît, à certains endroits de la surface, des plis qui ont pour conséquence de réduire la distance entre la surface du textile et le capteur de champ. On observe donc des variations périodiques de champ lors du passage de ces plis en face de l'objectif du moulin à champ. Par ailleurs, la surface du frotteur n'est pas régulière non plus, cette irrégularité contribue également à générer un frottement qui n'est pas homogène d'un

point à un autre de la surface du textile et se traduit donc par des fluctuations périodiques du champ.

On remarque que le fait d'isoler le textile permet une accumulation plus importante de charges électriques. Le champ maximum se situe alors aux alentours de **30 kV/m**, et seulement **18 kV/m** lorsque le tissu est en contact avec le plateau métallique. Cela était prévisible puisque le fait d'isoler le textile empêche la réorientation des lignes de champ vers le plan de masse. En effet, la présence d'un plan de masse en dessous de l'échantillon a pour conséquence une atténuation du potentiel en surface.

En ce qui concerne la décharge, elle n'est pas très affectée par l'isolation du plan de masse, les deux courbes de décroissance ont la même allure. Cela semble montrer que la décharge intervient plutôt en surface.

### **3. Analyse comparative des décharges produites après frottement ou polarisation**

L'étude des phénomènes de transport dans les films fins isolants a beaucoup été traitée dans la littérature. Ces études portent principalement sur des échantillons d'isolants très fins (de quelques  $\mu\text{m}$  à quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ ). L'interprétation des résultats de ces études se fait en terme d'injection de charges (annexe B). En effet, les charges électriques déposées sur un échantillon, placé sur un plan de masse, vont migrer à l'intérieur de l'isolant sous l'effet de leur propre champ électrique. Cependant cela est valable pour des valeurs de champ très élevées, donc pour de faibles épaisseurs d'échantillon (de l'ordre du  $\mu\text{m}$ ), alors que lorsque l'épaisseur de l'échantillon est importante, le champ n'est plus suffisant et le processus de polarisation devient le phénomène prépondérant pour expliquer la décharge [50,51].

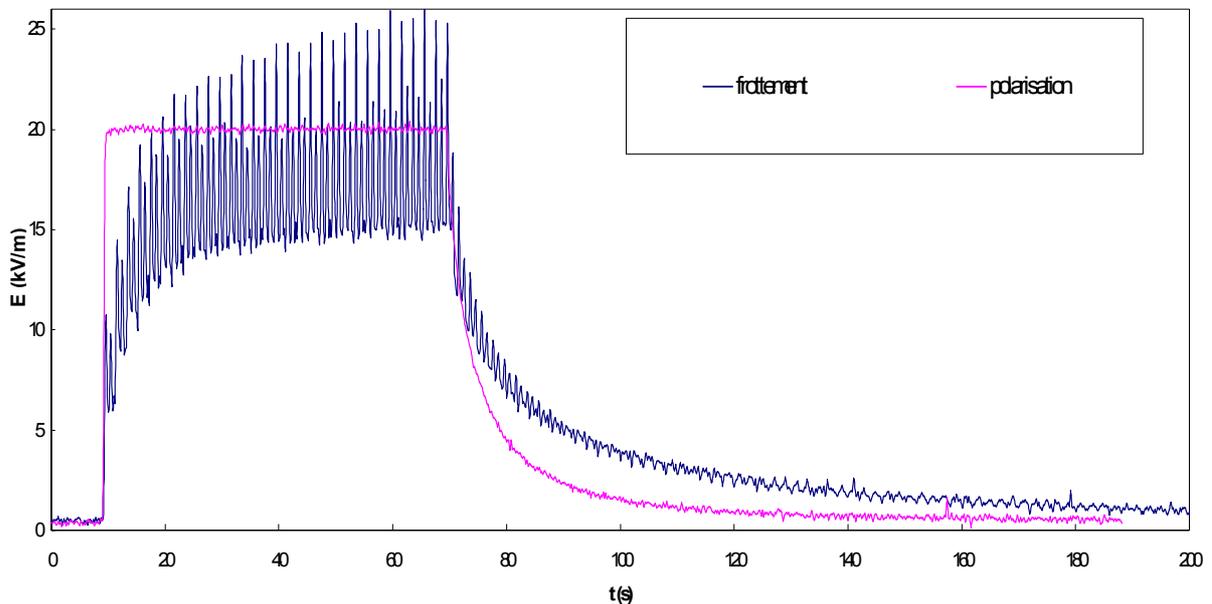
#### **a. Cohabitation des phénomènes d'injection de charge et de polarisation**

D'après ce qui vient d'être dit, nous pouvons donc émettre l'hypothèse que dans le cas de notre étude sur le frottement d'échantillons de textile, le mécanisme de décharge qui va prédominer sera la polarisation, puisque nous utilisons des échantillons dont les épaisseurs sont beaucoup plus grandes que quelques  $\mu\text{m}$ . Il serait alors intéressant de comparer la décharge du textile après frottement à la décharge du même textile après avoir été chargé par polarisation. Cependant il faut être prudent avant de comparer ces deux phénomènes. En effet, lorsque les charges sont déposées à la surface d'un échantillon, il leur faut acquérir une certaine énergie pour migrer à l'intérieur du matériau. On imagine bien que dans le cas d'un dépôt de charge directement sur la surface, produit par le frottement, la rétention des charges à la surface sera moins importante que dans le cas de l'utilisation d'un disque métallique comme pour les expériences de polarisation.

Coehlo et ses collaborateurs [52] l'ont montré grâce à une expérience sur un échantillon de polyamide présentant deux zones différentes à sa surface : une zone libre et une zone recouverte d'une pastille métallique. Un faisceau d'électron permet alors de déposer des charges électriques sur les deux zones en surface simultanément et une mesure du potentiel de surface est alors effectuée. Les mesures ont montré que le potentiel à la surface décroît plus rapidement au-dessus de la zone libre qu'au-dessus de la zone métallisée confirmant le rôle de la rétention jouée par la surface métallique.

**b. Confrontation des mesures de décharge après dépôt par frottement ou polarisation**

La figure III.19 représente la décharge de l'échantillon de laine dans les cas de frottement et de polarisation. Les expériences ont été menées à 21°C et 62% d'humidité. L'échantillon est tout d'abord chargé par frottement en utilisant le dispositif de la figure III.17 pendant 1 minute, ensuite on arrête le frottement en retirant le frotteur (rupture du contact) et on mesure la décharge à l'aide du moulin à champ placé à 2,5 cm au-dessus du textile (courbe bleue). On observe que l'échantillon se charge jusqu'à une valeur comprise entre **15 kV/m** et **20 kV/m** environ.



*Figure III.19 – Comparaison de l'évolution du champ électrique après frottement et après charge par polarisation pour un échantillon de laine (pendant 1 min). Le moulin à champ est positionné à 2.5 cm de la surface du textile.*

Ensuite, nous utilisons un disque métallique de 5 cm de diamètre que nous posons à la surface du textile et que nous chargeons par contact pendant 1 minute avec un générateur haute tension. Le potentiel appliqué sur le disque est choisi de manière à obtenir un champ électrique maximum de **20 kV/m**. Nous nous trouvons ainsi dans des conditions comparables aux expériences de polarisation du chapitre II, le tissu étant posé sur le plan de masse. On mesure ensuite la décharge avec le moulin à champ toujours placé à 2,5 cm au-dessus du disque (courbe rouge).

Ces mesures montrent que la décharge sous polarisation semble plus rapide, ce qui semble aller à l'encontre des interprétations proposées précédemment. En réalité nous pensons qu'à ce phénomène de décharge en volume se superpose une décharge en surface probablement favorisée par l'hygrométrie ambiante. En conséquence nous avons décidé d'entreprendre d'autres mesures tenant compte plus attentivement de ce paramètre.

Bien entendu ces arguments ne contredisent pas le fait que la polarisation doit être le mécanisme de décharge prépondérant pour les échantillons épais, tels que ceux étudiés par Molinié et Goldman [50], y compris pour le dépôt de charge par frottement.

### **c. Mesures de perte de charge sous faible hygrométrie**

Les expériences ont été menées dans une ambiance contrôlée comportant : un taux d'humidité de 31% et une température de 22°C. Le but de l'assèchement de l'air est de limiter les phénomènes de décharge en surface. Le principe de mesure est le même que précédemment. La charge par frottement et par polarisation se fait pendant une durée de 100s. et la mesure du champ électrique est faite par le moulin à champ placé à 2,5 cm au-dessus de l'échantillon de laine. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure III.20.

Tout d'abord on observe que le potentiel en surface est plus élevé lorsque l'humidité de l'air est moindre. En effet, si on compare avec l'expérience précédente, on voit que le champ maximum généré par frottement est plus élevé d'environ **50%** pour un taux d'hygrométrie de 31%.

Ensuite, en ce qui concerne la décharge, elle est moins rapide que lorsque l'air est plus humide. Mais surtout, on remarque que les décroissances sont similaires dans le cas du frottement et dans celui de la polarisation.

Le fait d'avoir un taux d'humidité faible entraîne une limitation de la décharge en surface, favorisant la décharge en volume. L'échantillon utilisé étant épais, les charges déposées à la surface par le frottement vont induire un champ électrique à l'intérieur du matériau. Ce champ électrique n'est pas suffisamment intense (car l'épaisseur de l'échantillon est élevée) pour que les charges pénètrent dans le volume par injection. La présence des charges en surface entraîne donc une polarisation de l'échantillon similaire à celle obtenue avec nos expériences utilisant les disques. La décharge s'explique alors principalement par les phénomènes de relaxation dipolaire vus dans le chapitre II.

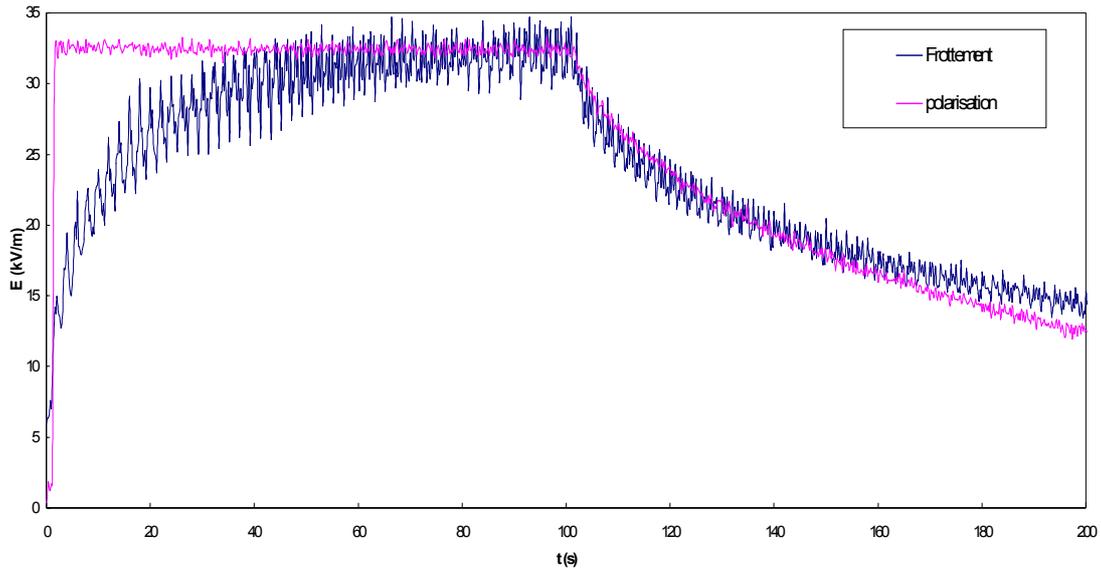


Figure III.20 – Comparaison de l'évolution du champ électrique après frottement et après charge par polarisation pour un échantillon de laine (pendant 100 s). Le moulin à champ est positionné à 2.5 cm de la surface du textile, l'hygrométrie étant de 31%.

Nous ne nous trouvons pas, bien entendu, exactement dans le même cas. L'utilisation de disques métalliques pour la polarisation peut expliquer les différences observées, puisque la décroissance du champ semble plus rapide pour la polarisation que pour le frottement à partir de **150s.** environ (figure III.20). Cela peut provenir de l'élimination de charges en surface, qui n'est plus alors négligeable devant la dépolarisation volumique et qui est alors favorisée sur la surface métallique par rapport à la surface libre du textile.

Quoi qu'il en soit, nous apprenons ici que la décharge des textiles, chargés par effet triboélectrique, pourrait s'expliquer principalement par le mécanisme de dépolarisation. Or nous avons également vu dans le chapitre II que la méthode de polarisation était très reproductible : cela pourrait donc constituer un moyen efficace de tester les matériaux textiles notamment dans l'optique de la normalisation.

#### d. Résultats d'essais obtenus sur un échantillon de polyester

Le même essai de comparaison frottement/polarisation, fait sur un échantillon de polyester, est présenté dans la figure III.21. L'échantillon utilisé est un tricot 100% polyester très fin comparé aux autres échantillons utilisés jusqu'ici. La particularité des échantillons de tricot, donc d'échantillons dont les fils ne sont pas entrelacés à la manière d'un tissu mais sous forme de mailles, est qu'ils sont très extensibles. Cela pose problème pour le test triboélectrique de la norme EN1149-3 où les échantillons de tricot auxquels on suspend la masse de 130g voient leur largeur diminuer sous l'effet de l'étirement ce qui rend le test

impossible. Par contre, la méthode du plateau tournant a cet avantage de pouvoir tester indifféremment tissus ou tricots. Les essais de la figure III.21 ont été menés dans des conditions atmosphériques correspondant à 27% d'humidité et une température de 20°C.

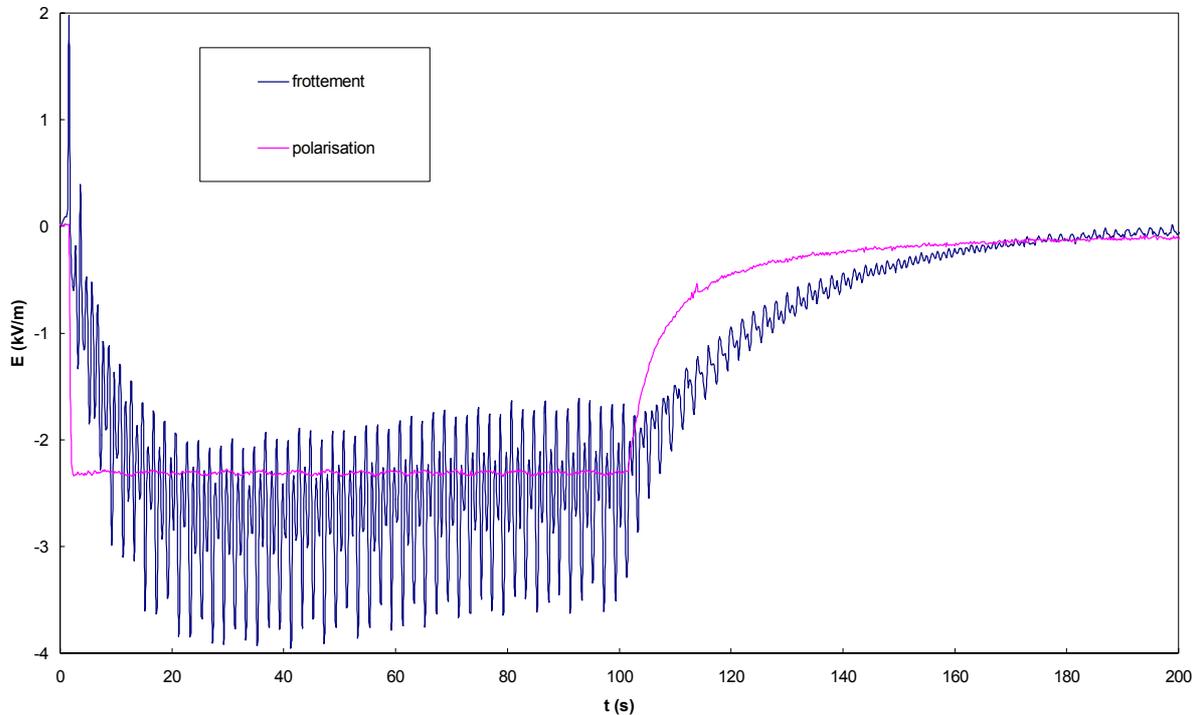


Figure III.21 – Comparaison de l'évolution du champ électrique après frottement et après charge par polarisation pour un échantillon de polyester (pendant 100 s). Le moulin à champ est positionné à 1 cm de la surface du textile, l'hygrométrie étant de 27%.

Le pic transitoire observé à **2 kV/m** correspond à la mise en contact du frotteur sur le textile, ensuite on observe que l'échantillon se charge négativement. Nous avons donc soumis cet échantillon à un échelon de tension négative pour le test de polarisation. L'échantillon se charge donc jusqu'à environ **-2,5 kV/m** on mesure la décharge après un temps de **100s**. On remarque que la décroissance est plus rapide dans le cas de la polarisation que dans celui du frottement. A priori, la décharge en surface est encore très importante, nous nous trouvons probablement dans des conditions d'hygrométrie insuffisante pour pouvoir négliger ce phénomène. La chambre conditionnée ne nous permettait malheureusement pas de descendre plus bas en hygrométrie. Par ailleurs, les phénomènes volumiques de déplacement de charges, comme la polarisation, sont probablement plus difficilement mis en oeuvre dans le polyester que dans la laine. Enfin, l'échantillon de polyester étant très fin et les écarts entre les mailles beaucoup plus important que dans le cas du tissu de laine, il se peut qu'une partie de la décharge soit due à une décharge par effet couronne entre le disque métallique supérieur et le plateau tournant métallique, à travers les jours existants entre les mailles.

Dans cet essai, la distance entre le moulin à champ et la surface du textile est de 1 cm, alors qu'elle était de 2,5 cm pour l'échantillon de laine. En fait, nous nous sommes rendu compte que lorsque le moulin à champ était trop éloigné, la mesure était parasitée par le champ électrique crée par le frotteur en PVC. En effet cela se traduit par l'enregistrement, non pas du champ électrique à la surface du textile, mais par la somme de ce champ avec celui provenant du frotteur. Or le frotteur atteint des niveaux de champ beaucoup plus importants et la polarité de la charge à sa surface est opposée à celle du textile. La figure III.22 montre les mesures obtenues pour deux valeurs de la distance entre moulin à champ et textile.

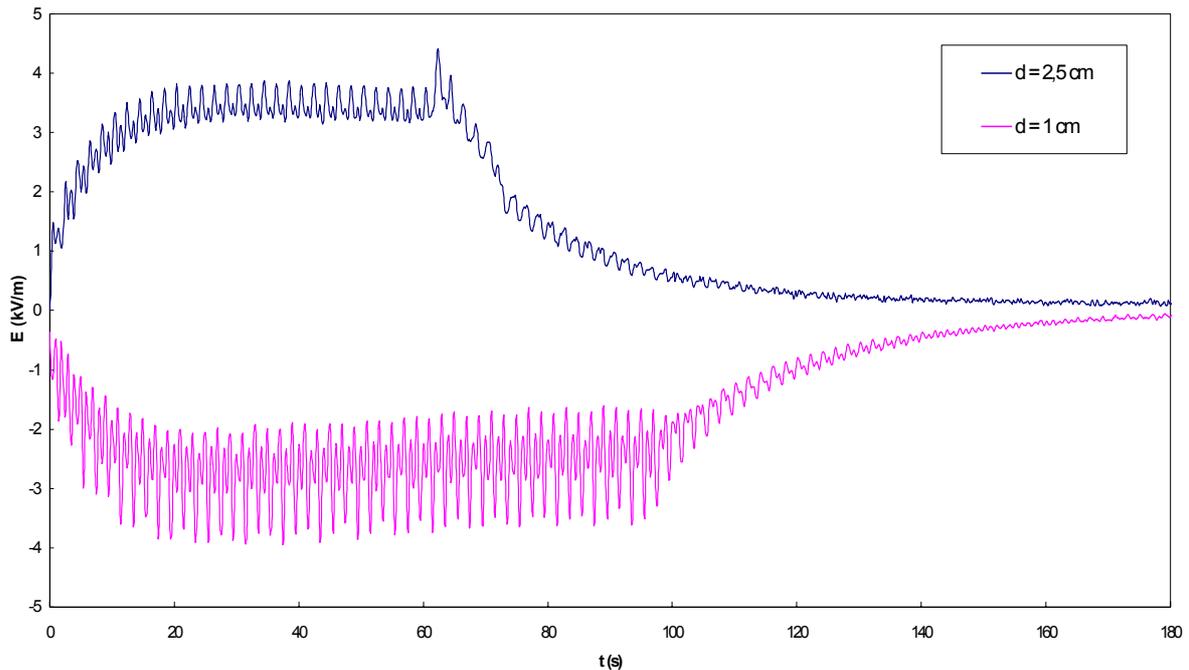


Figure III.22 – Mesures du champ électrique sur l'échantillon de tricot polyester après frottement pour des distances entre moulin et textile de 2,5 cm et 1 cm.

Il est donc indispensable de faire les mesures le plus loin possible de tout corps à la masse et de tout corps chargé. L'utilisation d'un anneau de garde, relié à la terre, autour de l'objectif du moulin à champ permettrait sans doute de réduire de façon significative ces parasites.

Quoi qu'il en soit, d'autres essais ont donné des résultats similaires à ceux présentés sur la figure III.21 ; ils portaient sur des échantillons de chlorofibre et de nontissé en polyester majoritairement. Ces échantillons présentaient une structure similaire, en effet, l'échantillon de chlorofibre était un tricot et celui de nontissé était suffisamment fin pour que l'on puisse supposer qu'une partie de la décharge se faisait à travers le textile.

**e. Résultats d'essais obtenus sur un échantillon de textile pour l'industrie automobile**

Les résultats présentés ici ont été obtenus sur un échantillon de textile utilisé dans la réalisation de l'habitacle d'un véhicule automobile (revêtement intérieur des portières). En fait, il ne s'agit pas d'un textile unique, il s'agit plutôt d'une structure composée de plusieurs couches comme le montre la figure III.23. L'échantillon est composé d'une couche fine de nontissé sur laquelle est disposée une couche plus épaisse de mousse et enfin la partie superficielle est constituée d'un textile. Le matériau principal de cet échantillon est sans doute le polyester bien que sa composition exacte ne soit pas connue.



Figure III.23 – Vue en coupe de l'échantillon pour habitacle d'automobile

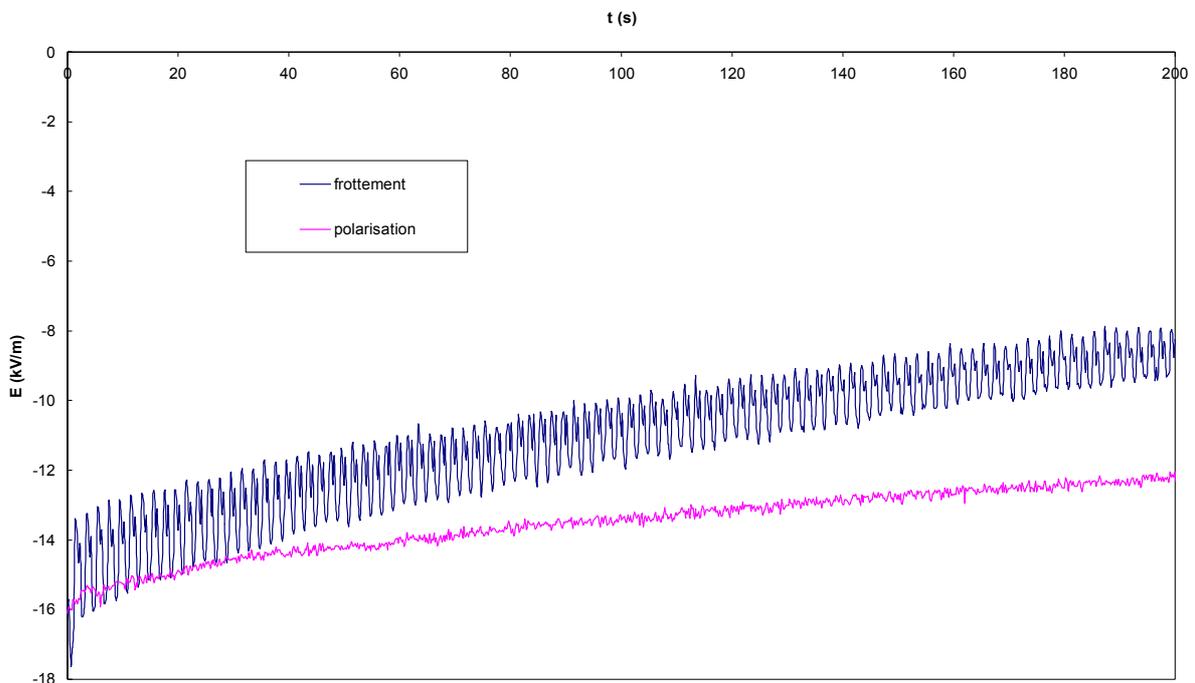


Figure III.24 – Comparaison entre la décharge après frottement et après polarisation pour un échantillon de textile automobile

L'essai mené avec le plateau tournant a été réalisé dans des conditions atmosphériques correspondant à une température de 22°C et une humidité relative de 25%. Le moulin à champ est disposé à 2 cm au-dessus de l'échantillon, les frottements ont été faits avec le cône en aluminium et la polarisation a été réalisée avec le disque de 5cm de diamètre.

Les courbes de la figure III.24 présentent la comparaison des comportements après charge par frottement et polarisation.

On observe un comportement différent des précédents : la décharge après polarisation est moins rapide que la décharge après frottement. La charge obtenue est négative, le maximum de champ étant aux alentours de  $-16\text{kV/m}$ . Après frottement, l'échantillon se décharge pour atteindre une valeur de champ d'environ  $-10\text{kV/m}$  au bout de **200s**, alors que pour la même durée, l'échantillon après polarisation présente une valeur de champ d'environ  $-14\text{kV/m}$ .

On se rend compte, en fait, que pour de faibles valeurs d'humidité relative, la décharge sous polarisation devient plus lente. Ainsi le fait d'avoir diminué l'humidité de l'air a permis de limiter la décharge en surface de sorte que la décharge en volume devienne prépondérante. Lorsque l'on dépose les charges électriques à la surface de l'échantillon, celui-ci est alors polarisé, aussi bien dans le cas du dépôt par frottement que dans celui par contact avec le disque métallique. Il se produit alors une décharge, en volume, due principalement à la relaxation diélectrique dans les deux cas. Cette décharge s'accompagne également du phénomène d'injection de charge, mais celui-ci est favorisé dans le cas du test triboélectrique car les charges déposées à la surface libre du textile peuvent migrer plus facilement dans le matériau que dans le cas du test de polarisation (à cause du disque métallique) : on observe alors une décharge plus rapide après frottement. En d'autres termes, nous pourrions obtenir des résultats comparables si nous déposons la charge électrique directement à la surface mais par deux moyens différents, par exemple : par effet triboélectrique et par effet couronne. J.Chubb [53] a d'ailleurs obtenu une certaine corrélation entre les mesures de décharge pour des tests après charge par effet triboélectrique et par effet couronne. En définitive, la décharge des textiles n'est pas due à un phénomène unique mais bien à plusieurs processus qui ont lieu simultanément dont notamment la relaxation diélectrique et l'injection de charges.

#### **f. Résultats d'essais obtenus pour des valeurs d'hygrométrie très faible**

Pour vérifier les hypothèses développées ci-dessus, nous avons effectué des essais avec des valeurs d'hygrométrie encore plus faibles, à savoir : 17%. La température était de 25°C. Les résultats présentés plus bas concernent uniquement l'échantillon de laine et l'échantillon automobile. D'autres essais faits avec les tricots de chlorofibres et de polyester ne sont pas présentés car ils ne permettent pas d'étayer les hypothèses. En effet, les décharges obtenues avec ces derniers sont très rapides, et cela est probablement dû au phénomène décrit plus haut, c'est-à-dire, la décharge par effet couronne. La relaxation diélectrique et la décharge en surface sont alors masqués par ce phénomène.

Les résultats de la figure III.25 montrent le comportement de l'échantillon de textile pour automobile. On observe une décharge plus rapide dans le cas de l'essai par frottement (avec frotteurs en aluminium). Cela confirme les résultats précédents montrant un comportement identique pour une valeur d'hygrométrie de 22%. Les niveaux de champ n'atteignent ici que **-9 kV/m** car le temps de charge est plus court, il est de 100s ; nous ne laissons alors pas le temps à l'échantillon d'atteindre les niveaux comparables à ceux obtenus plus haut.

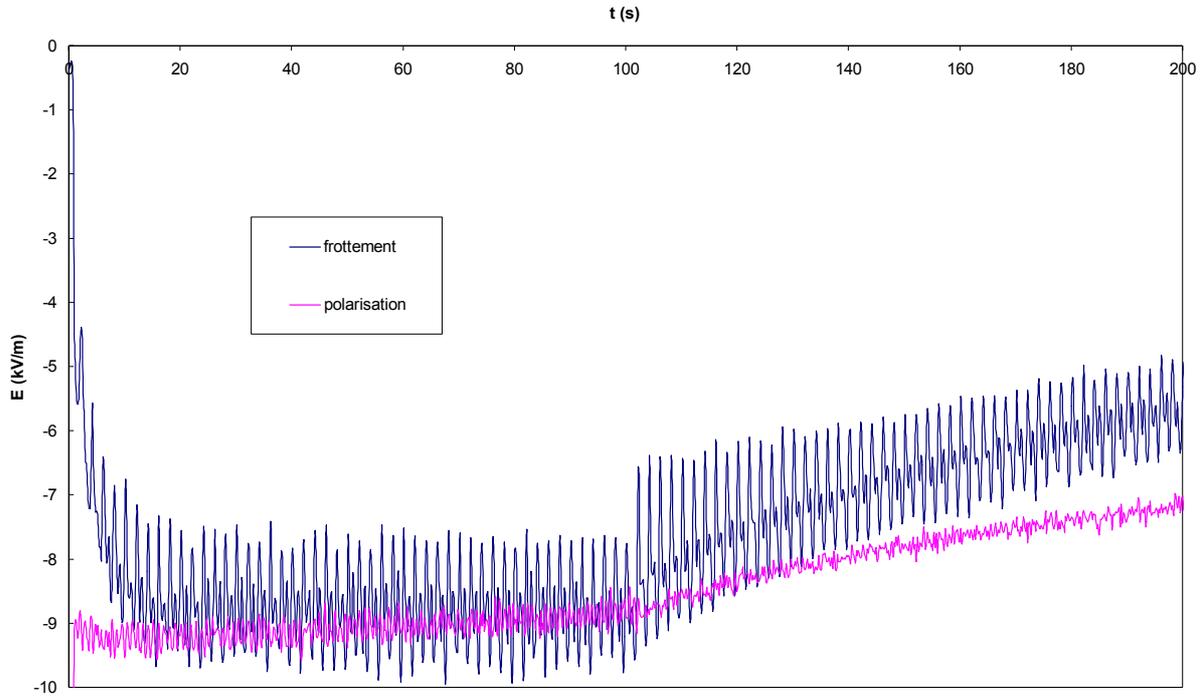


Figure III.25 – Comparaison entre la décharge après frottement et après polarisation pour un échantillon de textile automobile l'hygrométrie étant de 17%

La même comparaison a été menée pour l'échantillon de laine. Les résultats sont présentés sur la figure III.26.

La mesure est très perturbée en raison des nombreux plis à la surface de l'échantillon. L'échantillon a été chargé pendant une durée de 100s par frottement avec les frotteurs en aluminium et par polarisation avec le disque de 5cm de diamètre (également en aluminium). Il est assez difficile de comparer les décroissances de champ, mais on peut remarquer grâce à l'enveloppe inférieure de la courbe représentant la décharge après frottement que cette décroissance est plus rapide que dans le cas de la charge par polarisation.

Dans ce cas de figure, la décharge après polarisation est donc plus lente. Nous avons donc réussi à obtenir les trois types de comportement avec l'échantillon de laine, uniquement en diminuant le taux d'humidité de l'air. Pour une hygrométrie élevée, la décharge lors du test de polarisation est plus rapide car les disques métalliques utilisés facilitent la décharge en surface qui est favorisée par le taux d'humidité élevé. Plus l'hygrométrie diminue, plus la décharge en surface est limitée, l'injection de charges en volume et la relaxation dipolaire devient alors

prépondérante. L'injection de charge est favorisée dans le cas du test triboélectrique car la charge est déposée directement à la surface de l'échantillon, il ne faut pas d'énergie supplémentaire pour qu'elle pénètre dans le volume contrairement au test par polarisation à cause de l'interface disque/échantillon..

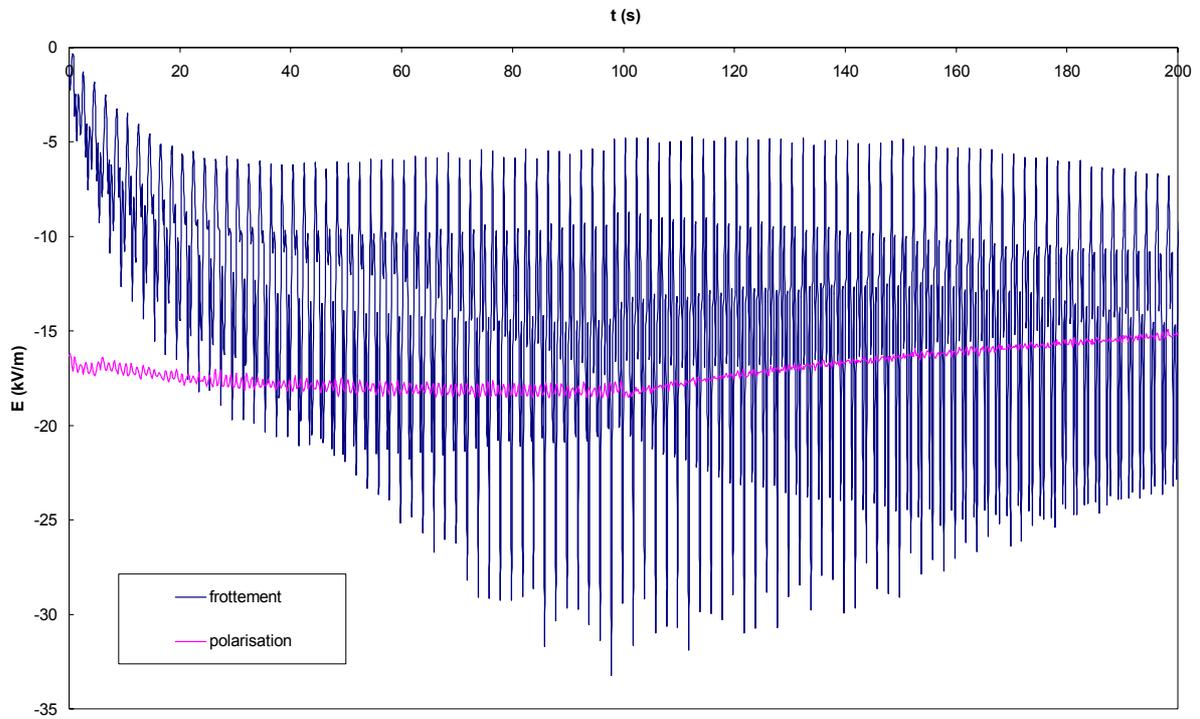


Figure III.26 – Comparaison entre la décharge après frottement et après polarisation pour un échantillon de laine l'hygrométrie étant de 17%

Ce moyen d'essai permet donc d'évaluer l'accumulation de charges électriques à la surface des échantillons et leur évacuation. Cependant l'étude de la décharge d'une surface chargée par création d'arcs reste un point important pour la caractérisation des textiles. Le paragraphe suivant essaie de tirer parti de ce phénomène par la mesure de la quantité de charge transférée lors d'un tel arc. Pour cela, l'arc est provoqué grâce à une sphère métallique et une mesure de courant de décharge permet ensuite d'en recueillir les informations.

### III-E Mesures de transferts de charges

Des décharges électrostatiques peuvent être à l'origine d'incendies ou d'explosions graves lorsque celles-ci apparaissent sous forme d'étincelles. Selon le type d'atmosphère en présence, l'énergie de l'étincelle nécessaire pour que l'accident arrive varie. De nombreuses études concernant les caractéristiques de ce type de décharge ont été menées [54,55]. Dans notre cas, nous nous intéressons à la charge transférée au cours d'une telle étincelle pour en déduire son énergie. Pour cela, l'étude suivante a été menée avec un capteur de forme sphérique, typiquement un diviseur résistif, pour mesurer le courant de décharge de l'étincelle provoquée en rapprochant ce capteur d'une surface textile chargée. La description de ce moyen de mesure et les applications associées sont présentées dans cette partie.

#### 1. Description et caractérisation du capteur

##### a. Description de l'électrode sphérique

Le capteur est composé d'une sphère en laiton de 1,57 cm de diamètre, placée sur l'embase d'un connecteur N, 5 résistances de  $1\Omega$  sont placées entre l'âme du connecteur et la masse (figure III.27).

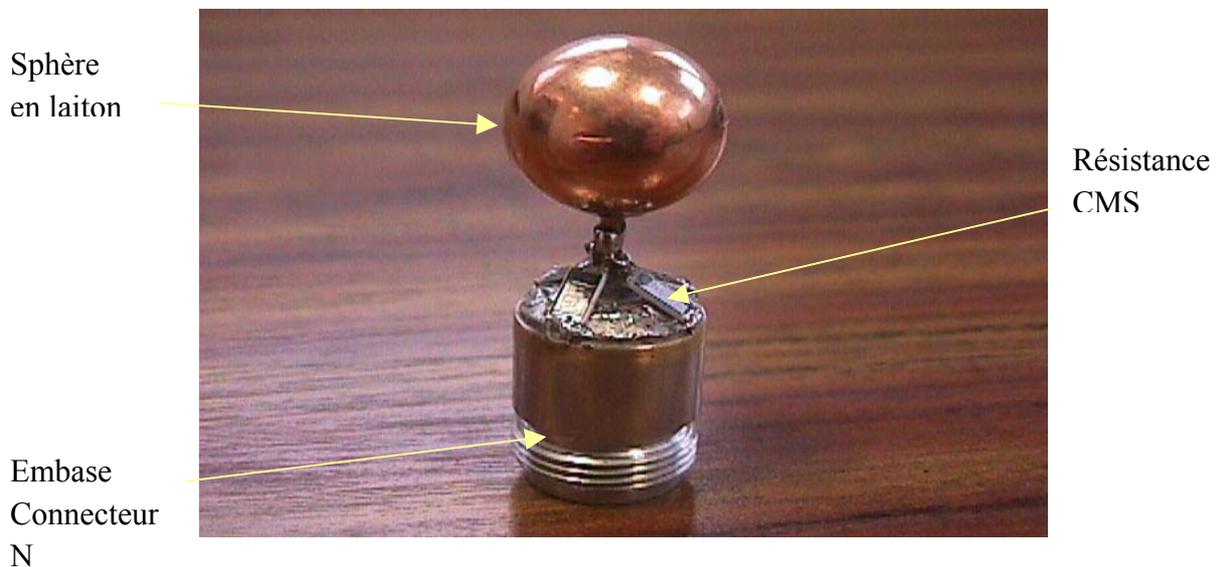


Figure III.27 – Photo de l'électrode sphérique

Le capteur permet de déterminer le courant de la décharge par une mesure de tension aux bornes des résistances. Le schéma équivalent du capteur est donc le suivant (figure III.28) :

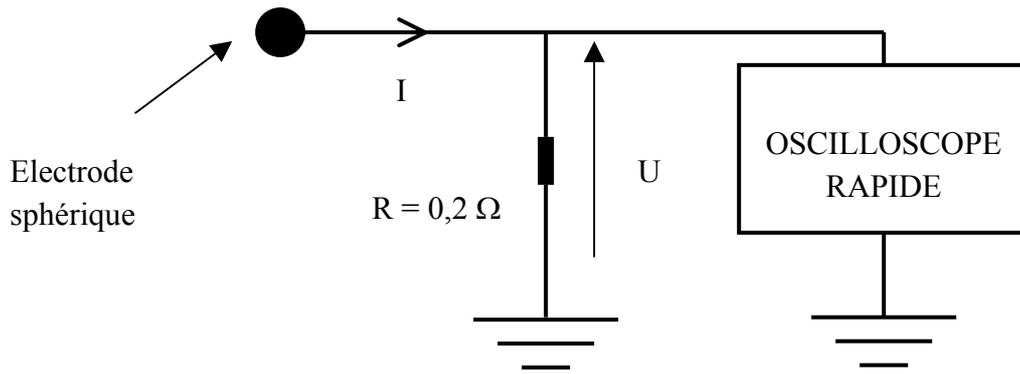


Figure III.28 – Schéma électrique du capteur

La tension  $U$  mesurée par l'oscilloscope aux bornes de la résistance  $R$  de  $0,2 \Omega$  permet la détermination du courant  $I$  injecté sur l'électrode. La résistance doit être suffisamment faible pour ne pas trop atténuer l'amplitude crête du courant mesuré, mais suffisamment grande pour avoir un signal mesurable sur l'oscilloscope. Les courants de décharge étant très rapides, de l'ordre de la nanoseconde, il est nécessaire de faire l'acquisition du signal avec un oscilloscope dont la bande passante est au moins égale à 500 MHz. Dans les expériences suivantes, l'oscilloscope utilisé a une bande passante de 1,5 GHz.

#### b. Caractérisation de l'électrode

Pour caractériser le comportement de l'électrode nous avons utilisé un générateur d'impulsions. Le but est de mesurer la réponse de l'électrode à une impulsion carrée dont les caractéristiques (durée, temps de montée et de descente, amplitude) sont connues, cette impulsion étant directement appliquée à l'électrode par contact. Le schéma du montage réalisé est présenté sur la figure III.29.

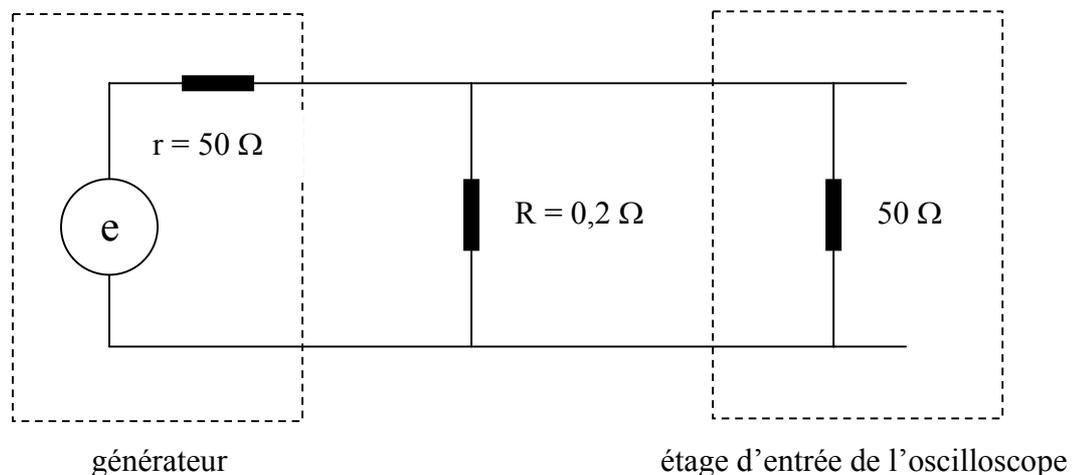


Figure III.29 – Schéma du montage réalisé pour caractériser l'électrode sphérique.

Le type d'impulsion utilisée est représenté sur le schéma de la figure III.30. Les résultats présentés plus loin correspondent à des impulsions dont les temps de montée et de descente ainsi que l'amplitude sont maintenus invariants, seule la durée  $w$  a été modifiée.

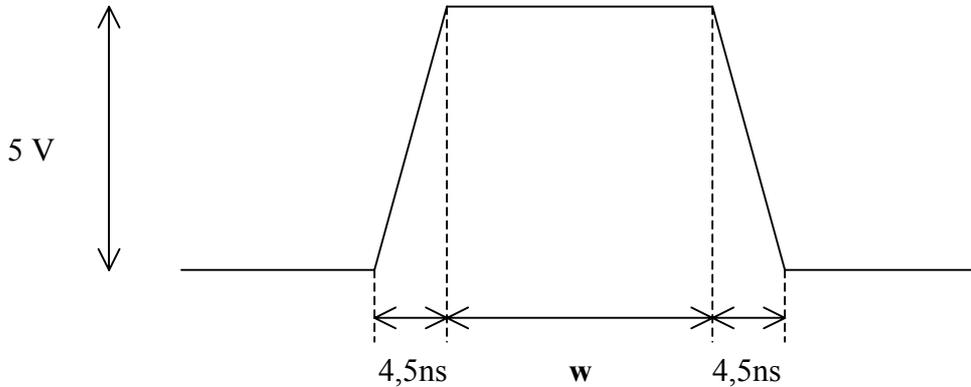


Figure III.30 – Type d'impulsion utilisée pour la caractérisation de l'électrode sphérique

Les résultats obtenus pour des durées d'impulsion de 200 ns, 100 ns, 50 ns et 10 ns sont rassemblés dans la figure III.31. On observe que l'on obtient, après mesure, des impulsions carrées dont l'amplitude est de **40 mV**. Le signal n'est pas trop déformé par l'électrode jusqu'à des durées d'impulsion de l'ordre de 10 ns. En dessous de cette valeur, le signal commence à être déformé comme on peut le voir sur la figure III.31. Le niveau reste cependant proche de 40 mV, il ne subit pratiquement pas d'atténuation.

Le courant mesuré par cette méthode a une valeur de :

$$I = \frac{U}{R} = 200 \text{ mA} \quad (\text{III.8})$$

Pour vérifier si la valeur de courant mesurée correspond à celle du courant injecté par le générateur d'impulsions, raisonnons sur le schéma du circuit complet (figure III.29).

La résistance  $R$  étant très faible devant la résistance d'entrée de l'oscilloscope, nous pouvons négliger celle-ci puisqu'elle s'ajoute en parallèle. Le courant qui traverse la résistance  $R$  correspond donc bien au courant délivré par le générateur. Celui-ci délivre une tension de 5 V lorsqu'il est branché sur une charge  $50 \Omega$ , donc pour connaître le courant délivré il faut passer par la valeur de la f.e.m. du générateur qui est alors de 10 V. Ainsi le courant traversant la résistance interne  $r$  de  $50 \Omega$  est donc :

$$I = \frac{e}{r} = \frac{10}{50} = 200 \text{ mA} \quad (\text{III.9})$$

Nous mesurons donc bien le même courant avec l'électrode.

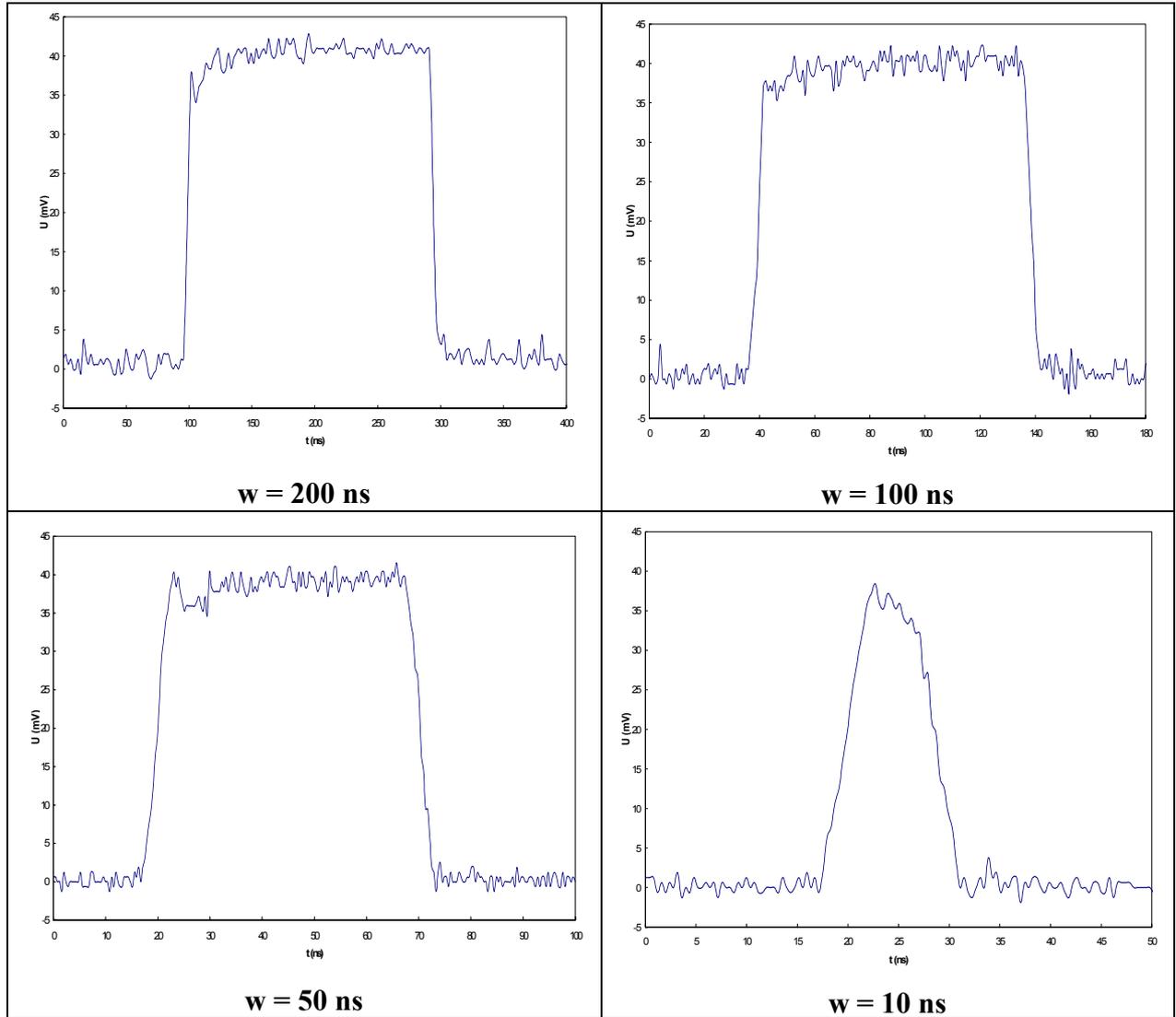


Figure III.31 – Réponses de l'électrode à des impulsions de tension de 5V d'amplitude, et de durée  $w$

### c. Simulations de décharges disruptives à l'aide d'un pistolet

Une fois cette première étape de caractérisation du capteur franchie, nous avons effectué quelques tests avec un pistolet à décharge pour s'assurer qu'il est bien possible d'enregistrer, à l'aide de la sphère, le courant provoqué par une étincelle.

Le schéma du dispositif est présenté sur la figure III.32. Pour sa réalisation, nous avons utilisé un pistolet à décharge de marque HAEFELY. Ce dispositif permet de créer une étincelle après la charge d'un condensateur. Le niveau de charge du condensateur peut être réglé, l'énergie de l'étincelle obtenue sera donc variable.

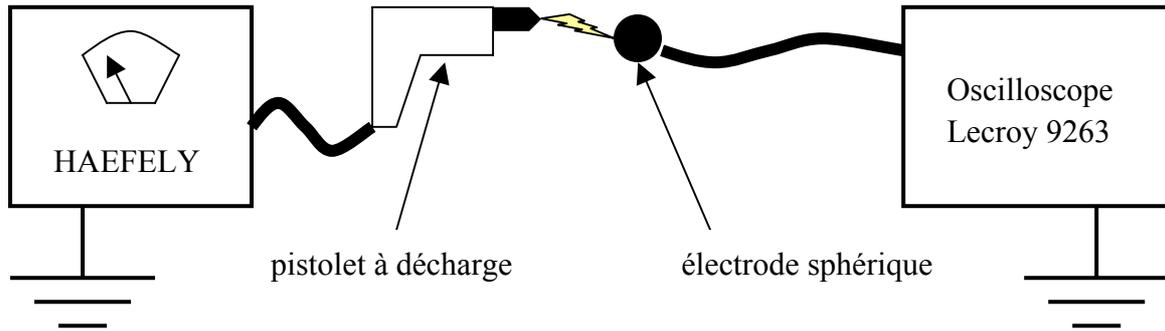


Figure III.32 – Schéma du dispositif de mesure avec pistolet à décharge

L'arc provoqué par le pistolet est recueilli par l'électrode sphérique, les mesures de courant de décharge effectuées sont représentées sur la figure III.33, les essais ont été menés pour des niveaux de charge du condensateur de 15kV et 20kV.

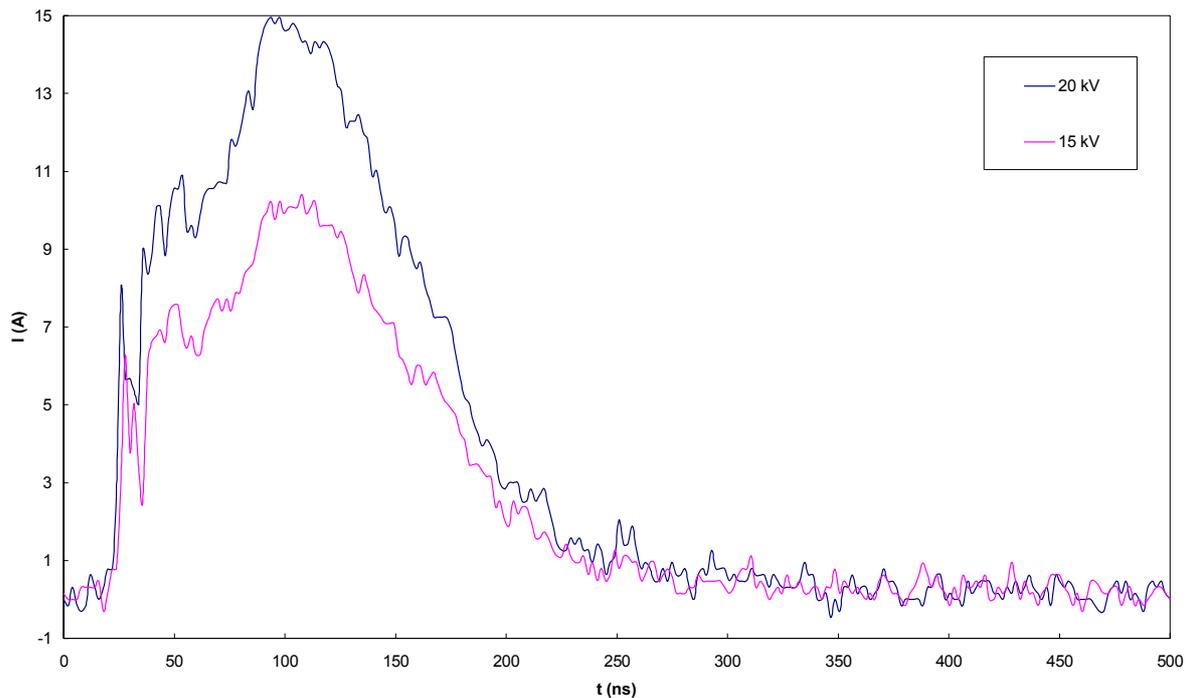


Figure III.33 – Courants de décharge mesurés à partir des décharges disruptives dans l'air du pistolet à décharge en fonction du niveau de charge

On observe des courants très brefs de l'ordre de **200 ns**. Les amplitudes atteignent **15A** et **10A** environ pour des niveaux de charge du condensateur de 20 kV et 15 kV respectivement. La mesure de décharge semble donc possible par ce procédé. Les ordres de grandeur obtenus

semblent cohérents car on obtient des courants qui restent dans les proportions des niveaux de charge appliqués, le rapport étant de **1,5** environ.

Nous pouvons donc espérer utiliser ce capteur en vue de provoquer la décharge de textiles chargés par frottement et mesurer ensuite les courants comme indiqué plus haut.

## 2. Tests de décharges disruptives sur des échantillons de textile

Dans cette partie nous présentons les résultats obtenus avec des échantillons de textile. La caractérisation du capteur nous a montré qu'il était possible d'acquérir des données en mesurant le courant de décharge lors d'un transfert de charge par arc.

### a. Description du protocole de mesure

Nous utilisons donc un moyen triboélectrique pour charger les échantillons de textile. Le moyen choisit est celui de la norme EN1149-3.

Le textile est frotté à plusieurs reprise afin qu'il accumule une quantité de charge suffisante, ensuite nous approchons l'électrode sphérique de la surface du textile pour provoquer la décharge dont le courant sera enregistré par un oscilloscope rapide (figure III.34).

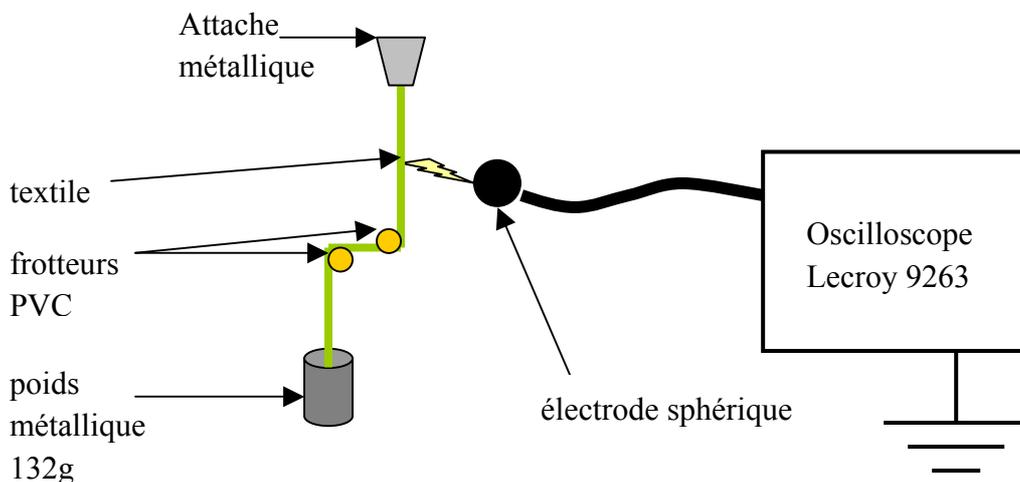


Figure III.34 – Principe de la mesure avec échantillon textile

Les frotteurs utilisés sont des frotteurs en PVC, ces expériences ont été menées dans des conditions atmosphériques correspondant à une température de 20°C et une humidité relative de 27%.

### b. Présentation des signatures recueillies pour divers échantillons de textile

Les échantillons testés sont ceux déjà utilisés dans la partie III-C concernant les tests normalisés. Il s'agit d'échantillons « purs » de laine, soie, coton et polyester. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure III.35.

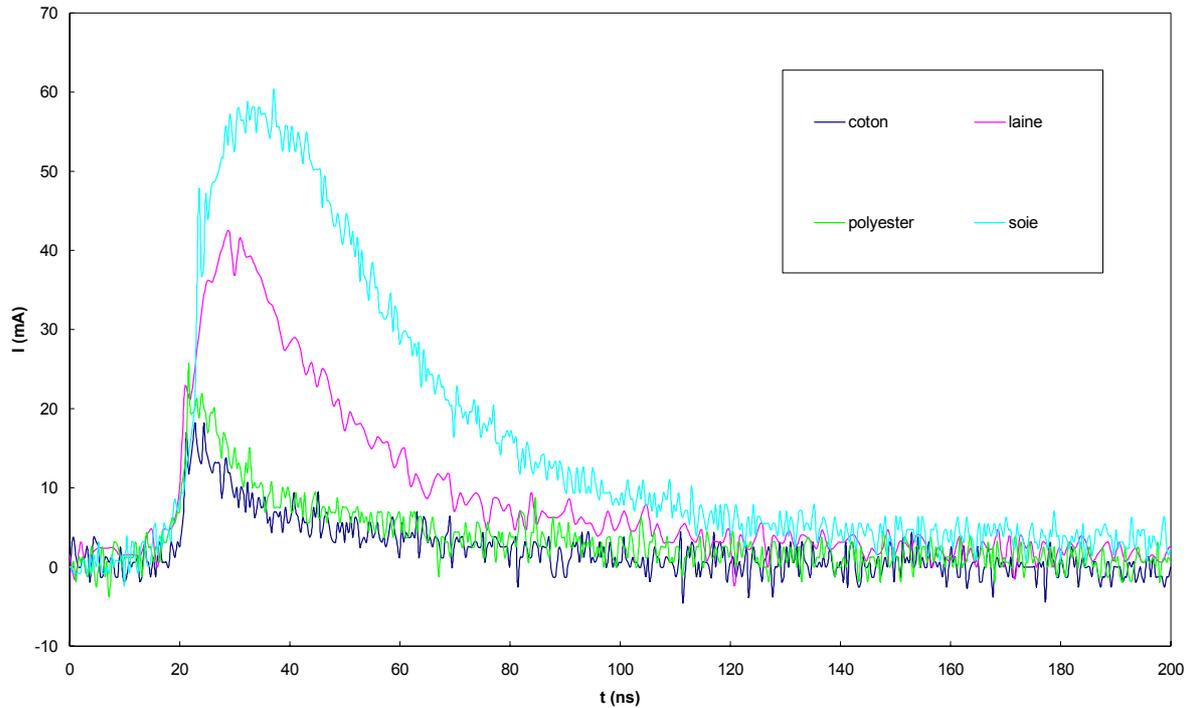


Figure III.35 – Mesure des courants de décharge sur des échantillons textiles chargés par frottement.

Nous observons sur cette figure que les amplitudes des courants de décharge varient selon le type de textile. Le coton et le polyester présentent des courants de décharge dont l'amplitude crête avoisine **20 mA**, elle peut atteindre **40 mA** pour la laine voire près de **60 mA** pour la soie. Même si cette amplitude dépend fortement des mouvements plus ou moins rapides du frotteur, les différences observées sont principalement liées à la nature physique des matériaux. Il faut préciser qu'il était plus facile de provoquer des décharges avec les échantillons de laine et de soie plutôt qu'avec ceux de coton et de polyester. Par ailleurs ces expériences ne permettaient pas d'obtenir des arcs d'une intensité lumineuse perceptible à l'œil nu, seule l'émission sonore permettait de les détecter.

Pour ce qui est de la durée du courant de décharge, on remarque qu'elle est du même ordre de grandeur pour tous les échantillons : environ **100 ns**.

Les mesures de courant de décharge sont donc faisables par ce système. Une étude statistique de ces mesures est présentée dans la suite pour pouvoir discuter de la reproductibilité.

### c. Etude statistique sur un échantillon de laine

L'un des critères décisifs pour ce type d'essai est bien entendu la reproductibilité, qu'il faut estimer au moyen de tests récurrents. Dans ce but, nous avons effectué 50 mesures sur un échantillon de laine (figure III.36). Ces mesures ont été menées dans des conditions d'humidité relative de 28% et une température de 20°C selon le même protocole que précédemment.

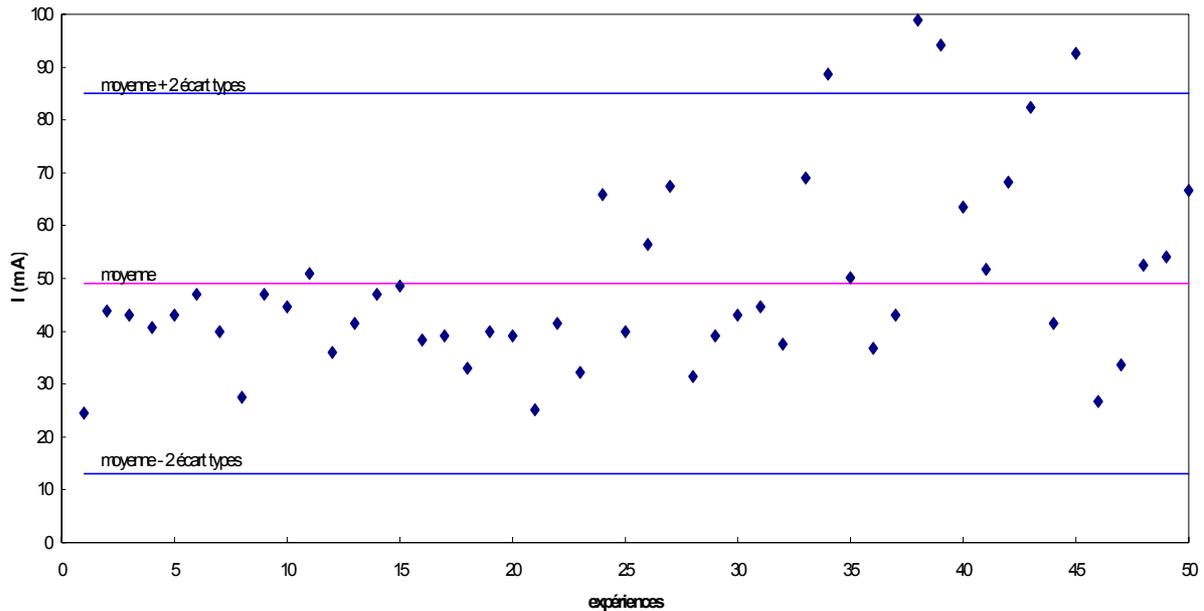


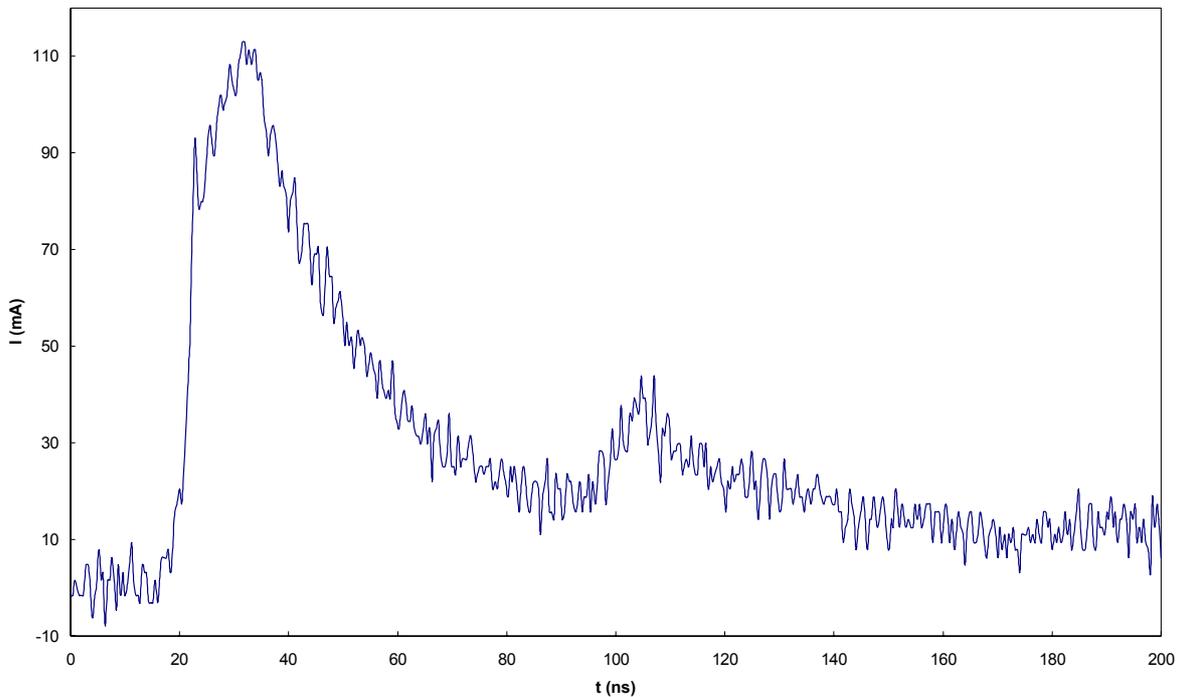
Figure III.36 – Mesures statistiques de courants de décharge sur un échantillon de laine chargé par frottement suivant la méthode de la norme EN1149-3.

Les amplitudes crêtes des courants de décharge présentées sur la figure III.36 montrent des valeurs assez dispersées, la moyenne se situant aux environs de 50 mA. On retrouve 92% des mesures dans l'intervalle constitué par la moyenne + ou - 2 écart-types, cet intervalle ayant une largeur de 70mA environ.

Cette dispersion s'explique principalement par l'utilisation du système de frottement de la norme EN1149-3. En effet, un seul frottement, lors de la chute du mobile portant les frotteurs, ne permet pas d'atteindre le potentiel de surface maximum que peut atteindre le textile. Ainsi après plusieurs essais, le textile accumule des charges et les potentiels atteints en surface seront plus importants pour les dernières expériences que pour les premières, provoquant des courants de décharge également plus importants (figure III.36). Par ailleurs, l'intervention d'un opérateur pour approcher l'électrode sphérique près du textile est également une source de dispersion pour les mesures, car si l'approche est plus ou moins rapide, le textile a plus ou

moins le temps de se décharger partiellement, entraînant alors un courant de décharge plus ou moins élevé.

La figure suivante (III.37) illustre bien le fait que l'on peut obtenir des valeurs de courant de décharge très variées si l'on ne contrôle pas strictement la manière de charger le textile. Le courant de décharge a été mesuré à la suite des 50 expériences, la mesure est faite après plusieurs frottements successifs intenses du textile.



*Figure III.37 – Mesure du courant de décharge sur un échantillon de laine après plusieurs frottements.*

On voit bien que dans ce cas de figure on obtient un courant de décharge d'amplitude crête supérieure à **110 mA** : valeur plus élevée que pour les expériences précédentes, ce qui se traduit par un potentiel électrique en surface beaucoup plus élevé, cela est encore dû à la « chargeabilité » du textile. Donc en changeant légèrement la manière de froter l'échantillon, on peut avoir des valeurs de courant de décharge bien différentes.

Pour améliorer la reproductibilité, on pourrait se servir, par exemple, du dispositif à plateau tournant du paragraphe III-D de ce chapitre, on s'assurerait ainsi d'atteindre le niveau maximal de potentiel à la surface du textile (on se placerait ainsi dans le pire cas). On pourrait également combiner à cela un moyen automatique, et dont la vitesse est contrôlée, pour approcher l'électrode sphérique de la surface du textile.

Globalement, la mesure de la décharge en elle-même est reproductible, ce qui reste très difficile à rendre reproductible est la manière de charger un textile en le frottant.

### 3. Exploitation des résultats de mesure de courants de décharge

La mesure des courants de décharge peut être un outil fort intéressant pour acquérir un certain nombre de données sur la décharge d'un textile. Cette décharge étant obtenue par étincelle, on peut déterminer la quantité de charge transférée par cette étincelle. On peut également déterminer l'énergie de cette étincelle, et ainsi, évaluer si elle est potentiellement dangereuse.

#### a. Détermination de la quantité de charge transférée

La première méthode que l'on peut utiliser pour déterminer la quantité de charge transférée lors d'une étincelle est de recueillir le courant de décharge au niveau d'un condensateur de capacité connue (figure III.38).

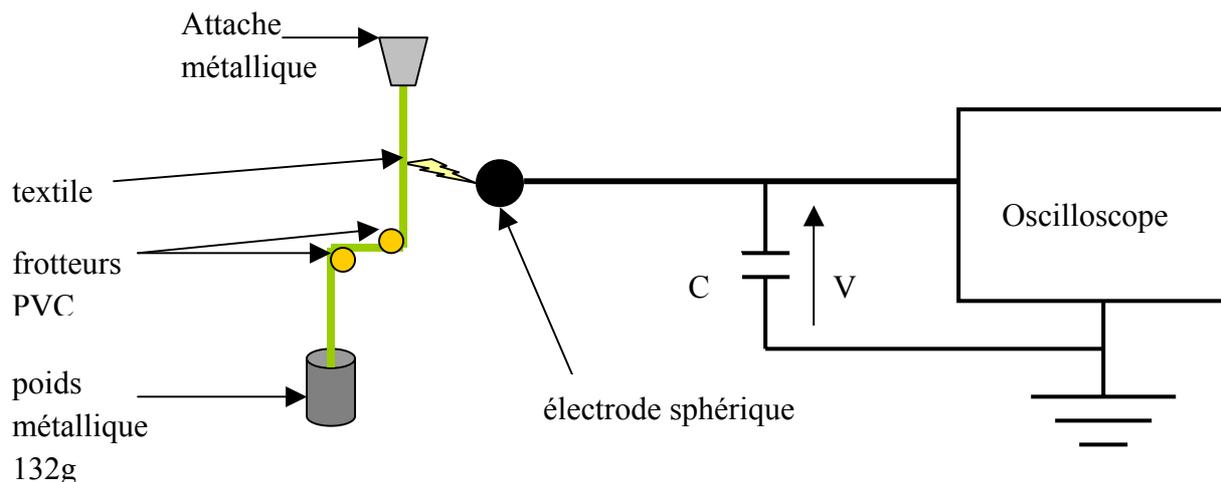


Figure III.38 – Schéma de principe pour déterminer la charge transférée

Le courant de décharge provoqué par l'électrode sphérique va charger la capacité C, une mesure de la tension V aux bornes de cette capacité permet en principe de déterminer la charge Q transférée en appliquant la relation III.10 :

$$Q = CV \quad (\text{III.10})$$

La méthode a été essayée avec une capacité de 100 pF, mais sans réel succès. Il faudrait encore améliorer le système. En effet, beaucoup d'aspects rendent la mesure délicate. Tout d'abord, pour avoir une tension mesurable, il est nécessaire que la capacité soit la plus petite

possible puisque les quantités de charge transférées sont très faibles. Il faut alors porter un grand soin à la réalisation du circuit et tenir compte de tous les paramètres : par exemple, le câble N présente une capacité linéique de 100 pF/m, or nous utilisons un câble de 1m, la capacité résultante totale sera donc de 200pF si nous utilisons un condensateur de capacité 100pF.

Nous pouvons déterminer la charge transférée par intégration du courant mesuré. En effet, la charge électrique et le courant de décharge sont liés par la relation :

$$Q = \int Idt \quad (III.11)$$

Ainsi la surface sous la courbe de courant de décharge représente la quantité de charge transférée. En intégrant numériquement les données enregistrées nous pouvons donc calculer cette charge (figure III.39).

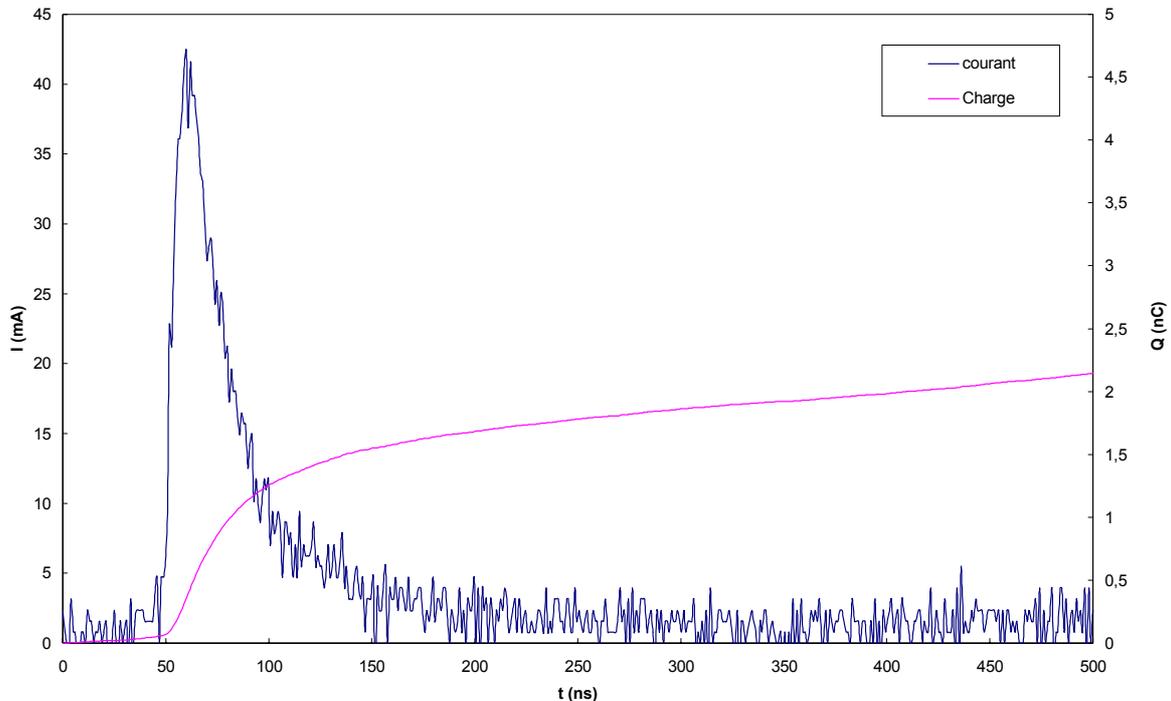


Figure III.39 – Courant de décharge pour un échantillon de laine et calcul de la quantité charge transférée

Par cette méthode on calcule donc que lors de la décharge de la laine une quantité de charge égale à **2 nC** environ a été transférée à l'électrode sphérique. Cette quantité de charge calculée est une donnée très utile pour estimer l'énergie de cette étincelle afin de la comparer aux seuils énergétiques détonants en conditions atmosphériques particulières.

**b. Détermination de l'énergie disruptive générée**

On peut calculer à priori l'énergie d'une étincelle lorsqu'elle se produit entre deux conducteurs par la relation suivante :

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \quad (\text{III.12})$$

Elle correspond à l'énergie électrostatique emmagasinée dans un condensateur qui aurait une capacité égale à la capacité C réalisée par les deux conducteurs, dans l'hypothèse que la décharge soit totale.

La capacité C n'est pas facile à déterminer, en faisant intervenir la charge transférée Q il vient :

$$E = \frac{1}{2}QU \quad (\text{III.13})$$

où U représente le potentiel atteint lors de la décharge.

La détermination de cette énergie, lorsqu'elle est possible, va permettre une comparaison avec les valeurs d'énergie connues dans la littérature, qui sont potentiellement dangereuses et pouvant donc atteindre les seuils détonants de certains mélanges gazeux.

Dans le cas de décharges électrostatiques en aigrettes, c'est-à-dire, produite à la surface d'un matériau non-conducteur, on peut faire des tests d'explosion pour savoir à partir de quel niveau d'énergie la décharge devient dangereuse, on détermine alors l'énergie minimale d'inflammation (EMI). Cette EMI désigne la plus petite énergie permettant l'inflammation du mélange gaz/air, la concentration du gaz est alors celle rendant le mélange le plus sensible [56,57].

Une méthode alternative consisterait à choisir un autre paramètre que l'EMI pour caractériser les échantillons. Selon Von Pidoll [58], il est possible de déterminer si une étincelle peut provoquer un incendie sans faire de test en atmosphère inflammable, uniquement par la détermination de la charge transférée par l'arc. Ainsi le tableau III.1 nous donne les ordres de grandeur des quantités de charges minimales nécessaires pour l'inflammation de mélanges gaz/air pour le méthane, le benzène et l'hydrogène [58]:

Mélange gaz/air	méthane	benzène	hydrogène
Q <sub>min</sub>	70 nC	45 nC	12 nC

*Tableau III.1 – Valeurs minimales des quantités de charge nécessaires à l'inflammation des mélanges gaz/air*

Pour comparaison, nous donnons dans le tableau qui suit les valeurs de charge transférée lors des mesures sur textiles faites précédemment (tableau III.2).

Echantillons	laine	soie	Coton	polyester
Q	2 nC	3 nC	0,5 nC	0,7 nC

*Tableau III.2 – Valeurs de quantité de charge transférée lors des décharges provoquées sur les échantillons de textile*

Ces valeurs semblent trop faibles pour qu'il y ait un risque d'incendie selon le tableau III.1. En fait, l'énergie de la décharge dépend de la taille de l'électrode.

En effet, si le diamètre est trop petit, on obtient plutôt une décharge couronne, alors que s'il est trop grand, la masse métallique de l'électrode refroidit l'étincelle [7]. On peut donc déterminer une taille optimale pour l'électrode.

Il existe également une distance optimale de décharge nécessaire pour atteindre le seuil détonnant. L'EMI sera minimale pour la distance dite de pincement pour laquelle l'énergie produite dans le volume où a lieu la réaction dépasse les pertes thermiques dues aux électrodes (si la distance est inférieure à cette distance minimale, l'énergie thermique de la décharge est en partie libérée dans le mélange gazeux, le reste est absorbé par l'électrode). Cette distance optimale et le potentiel U d'une décharge sont proportionnels si l'électrode utilisée a un diamètre suffisamment grand. Ainsi, on montre expérimentalement qu'une électrode de 25 mm de diamètre est suffisante pour vérifier cette loi pour la plupart des potentiels de décharge que l'on peut rencontrer. Cela veut dire que la charge transférée est alors un paramètre suffisant pour caractériser la décharge des textiles si on utilise une électrode de 25 mm de diamètre et pour des valeurs de potentiel supérieures au kilovolt [59].

Dans notre cas, nous utilisons une électrode de 15,7 mm. Cette dimension est donc trop faible pour pouvoir utiliser la quantité de charge transférée, comme paramètre pour juger du risque détonnant pouvant provenir des décharges issues de nos échantillons textiles.

Pour pouvoir utiliser ce paramètre de caractérisation, il nous faudra augmenter le diamètre de l'électrode utilisée.

Nous avons donc pu voir que la mesure de la décharge des échantillons textiles sous forme d'une étincelle peut apporter d'intéressantes informations concernant le courant de décharge, la quantité de charge transférée et l'énergie de cette décharge.

Un autre aspect que nous n'avons pas encore développé est celui du champ électrique dynamique généré lors des phénomènes de charge et décharge électrostatiques. La partie suivante concerne la mesure de ces champs électriques dynamiques et les applications possibles pour la caractérisation des échantillons.

## III-F Mesure du champ électrique dynamique

Une alternative aux mesures du champ électrique statique obtenu lors d'un dépôt de charge consiste à évaluer le champ dynamique. En effet, conformément à la norme EN1149-3, le dépôt s'effectue au passage de frotteurs déplacés parallèlement à l'échantillon textile.

Dans ce cas, le champ électrique perçu durant le déplacement des frotteurs dépend de la variable temps. Nous pensons que l'exploitation de la signature temporelle de ce phénomène peut apporter des informations complémentaires sur le comportement du textile. En conséquence, nous avons développé un capteur de champ électrique basé sur les propriétés d'un dipôle formant une capacité comportant deux armatures circulaires.

### 1. Description et caractérisation de l'antenne capacitive

#### a. Description de l'antenne capacitive

L'antenne capacitive utilisée est décrite sur le schéma de la figure III.40. Elle se compose de deux disques fins (1mm d'épaisseur) en laiton de 10 cm de diamètre. Ces deux disques sont espacés de 10 cm : le disque supérieur est maintenu par une tige en laiton de 2 mm de diamètre et 10 cm de longueur, reliée à l'âme de l'embase d'un connecteur N, le disque inférieur est fixé à l'embase et fait office de plan de masse.

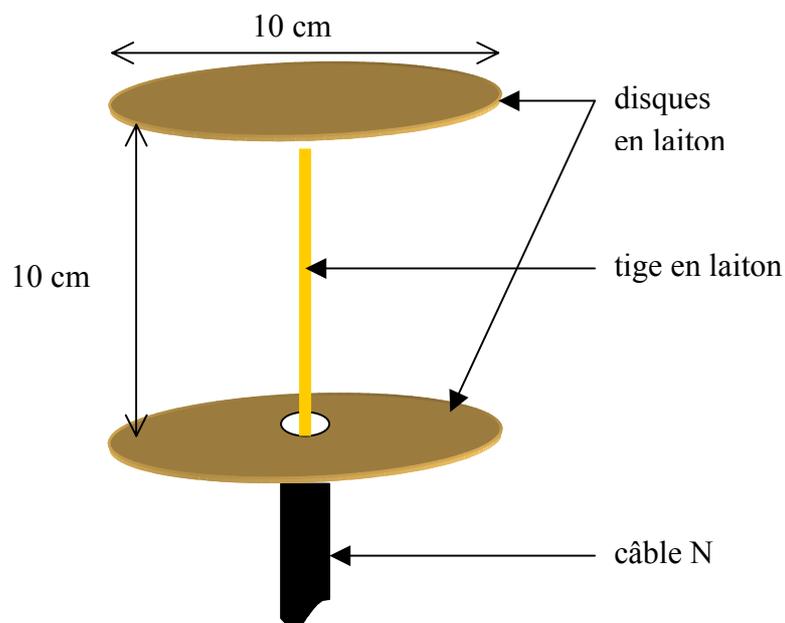


Figure III.40 – Schéma de l'antenne capacitive

**b. Caractérisation de l'antenne au moyen d'une cellule TEM**

Pour connaître l'influence de l'antenne sur la mesure effectuée, il est nécessaire de la caractériser, c'est à dire de connaître son comportement lorsqu'elle est illuminée par un champ électromagnétique. Pour cela nous avons utilisé une cellule TEM (transverse électromagnétique).

**Cellules transverses électromagnétiques (cellules TEM)**

Les cellules TEM sont des enceintes métalliques blindées dont les parois sont constituées d'un matériau très conducteur et homogène. Ces cellules présentent une structure coaxiale dans laquelle une source haute fréquence produit un champ nécessaire aux tests de compatibilité électromagnétique (CEM).

L'enceinte métallique est constituée par un parallélépipède dont deux extrémités sont terminées par des blindages de forme pyramidale, elles-mêmes terminées par deux embases coaxiales. A l'intérieur de cette enceinte, une cloison métallique sépare horizontalement en deux le milieu confiné, cette cloison est appelée : septum. Par ailleurs elle réalise des connexions avec le point central des embases coaxiales. On peut appliquer une tension  $V_c$  entre le septum et le blindage grâce à une source haute fréquence branchée sur l'une des extrémités de la cellule, l'autre extrémité est chargée de telle sorte que l'on crée un courant  $I_c$  dans le septum. La figure III.41 montre les coupes, longitudinale et transversale, d'une cellule TEM usuelle.

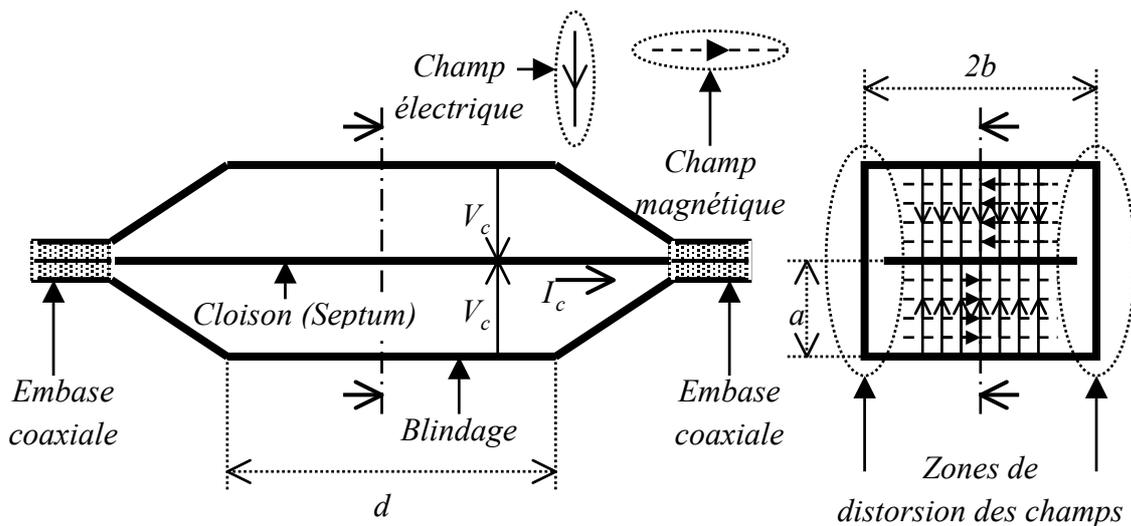


Figure III.41 – Représentation schématique des coupes, longitudinale et transversale, d'une cellule TEM

Dans son fonctionnement usuel, la cellule est assimilable à une ligne de transmission propageant un mode TEM adapté, l'adaptation est réalisée par l'impédance de charge. La largeur de la cloison est calculée pour atteindre une impédance caractéristique de  $50\Omega$ . On montre qu'en fonctionnement TEM la distribution du champ dans la section transversale de la cellule est presque homogène. En fait, un champ électrique, orienté perpendiculairement à la surface du blindage et de la cloison, est engendré par la tension  $V_c$ , le courant  $I_c$  est à l'origine d'un champ magnétique orthogonal au champ électrique. Ainsi, la propagation du mode TEM s'apparente à une onde localement plane, bien entendu, sur les bords latéraux de la cloison signalés par les contours pointillés (figure III.41), les champs deviennent hétérogènes, à ces endroits l'onde n'est plus rigoureusement plane.

La fréquence maximale d'utilisation d'une cellule TEM est déterminée par l'apparition des modes guidés TE (transverse électrique) ou TM (transverse magnétique). Si l'on considère les deux volumes entre le septum et les parois de la cellule comme deux guides d'onde rectangulaires ayant pour hauteur  $a$  et largeur  $2b$ , alors, le premier mode d'ordre supérieur n'apparaît que pour des fréquences supérieures à la fréquence de coupure du mode fondamental, soit exprimé en longueur d'onde :

$$2b > a \rightarrow \lambda > 4b \quad (\text{III.14})$$

On en déduit que la fréquence maximale  $F_{\text{maxi}}$  d'utilisation de la cellule correspond au critère :

$$F_{\text{maxi}} = \frac{c}{4b} \quad \text{avec} \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (\text{III.15})$$

Ainsi, une cellule dont les dimensions transversales ont pour caractéristiques  $a = 60 \text{ cm}$  et  $2b = 1,2 \text{ m}$  possède une fréquence maximale d'utilisation de  $125 \text{ MHz}$ . Au-delà de cette fréquence l'approximation de l'onde plane n'est plus vérifiée et des ondes stationnaires transversales prennent naissance.

### **Utilisation de la cellule TEM du laboratoire TELICE pour la caractérisation de l'antenne**

Nous avons soumis l'antenne à une impulsion de champ électrique obtenue par application d'une impulsion de tension au niveau de la cellule TEM. L'antenne étant immergée dans le volume inférieur de l'enceinte, une source de tension permet d'appliquer cette impulsion de tension par une des extrémités de la cellule, l'autre étant chargée sur  $50 \Omega$ . Le circuit équivalent au montage réalisé est présenté sur la figure III.42. La capacité  $C_a$  représente la capacité de l'antenne.

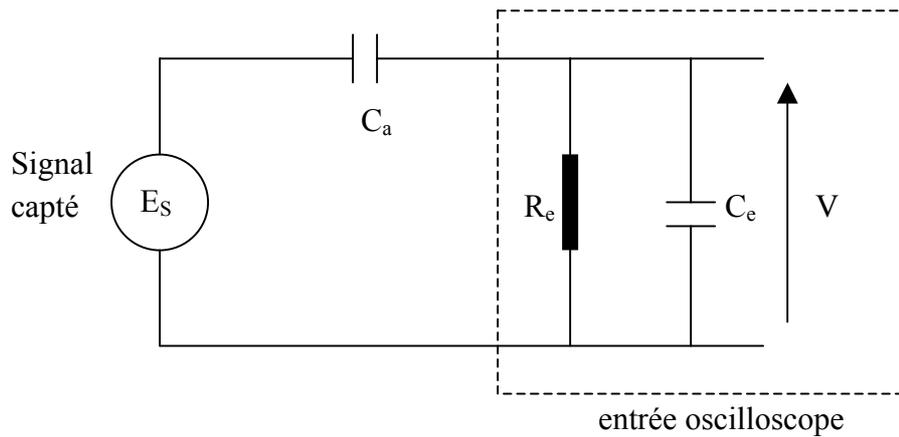


Figure III.42 – Schéma simplifié du circuit équivalent au montage réalisé pour la caractérisation de l'antenne

Le schéma de l'impulsion appliquée est représenté en figure III.43

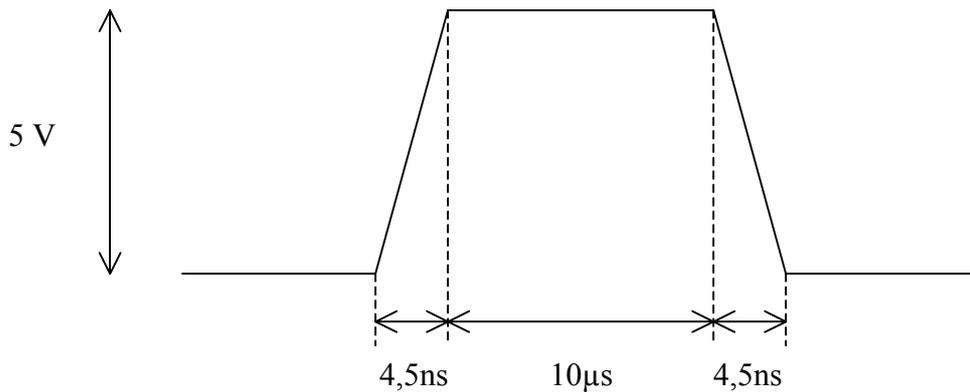


Figure III.43 – Type d'impulsion utilisée pour la caractérisation de l'antenne capacitive

On enregistre ensuite la mesure pour observer la réponse de l'antenne. L'antenne est donc reliée à un oscilloscope numérique et la réponse obtenue a l'allure présentée sur la figure III.44.

On observe que lorsque la durée de l'impulsion de tension est supérieure à  $10 \mu\text{s}$ , le signal mesuré est la dérivée du signal de départ (ce n'est pas le cas pour des durées plus courtes, le signal n'étant pratiquement pas déformé). En fait, seul le début du signal, la partie ascendante, est conforme à l'impulsion de départ. On peut donc supposer que les variations rapides de champ ne seront pas déformées par l'antenne.

La détermination de la capacité  $C_a$  de l'antenne, grâce à un pont RLC, nous donne une valeur d'environ  $6 \text{ pF}$ .

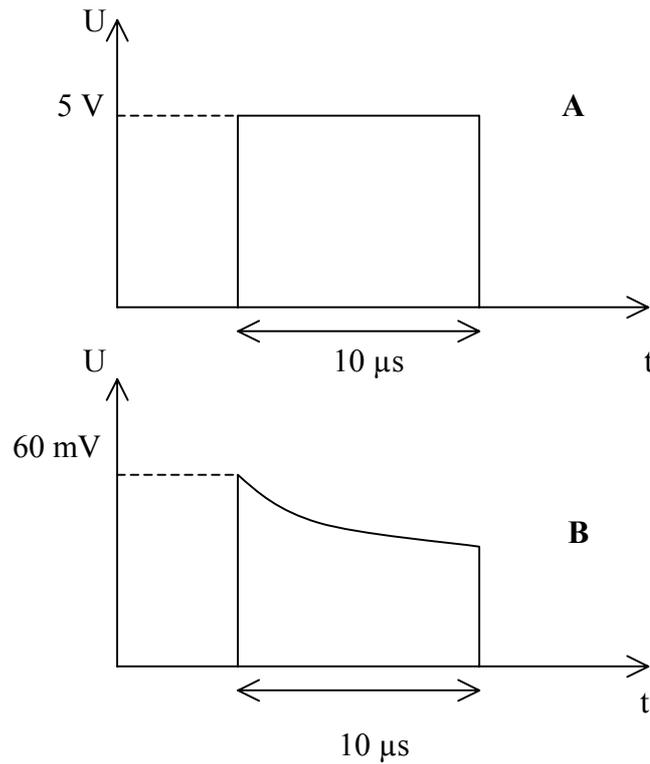


Figure III.44 – Allure de la tension mesurée par l’antenne **B** en réponse à une impulsion de tension **A** appliquée au niveau de la cellule TEM

L’expression complexe de V est donnée par :

$$V = E_s \frac{Z_e}{Z_e + \frac{1}{jC_a\omega}} \quad (\text{III.16})$$

avec  $Z_e$  représentant l’impédance d’entrée de l’oscilloscope.

Ce qui donne également :

$$V = E_s \frac{j\omega C_a Z_e}{j\omega C_a Z_e + 1} \quad (\text{III.17})$$

On remarque donc que si  $j\omega C_a Z_e$  est très petit devant 1, alors la tension V que l’on mesure ne représente pas le signal réel, mais la dérivée de celui-ci. Cela arrive lorsque la fréquence est très petite donc, lors de la caractérisation, pour des impulsions de longue durée.

Il faut également faire attention aux parasites car les capacités mises en jeu ici sont très faibles. Par exemple, dans cette analyse sommaire, nous n’avons pas pris en compte la capacité due au câble utilisé. Nous avons utilisé un câble N d’une longueur de 1m ; il faudrait donc ajouter une capacité de 100 pF en parallèle avec celle de l’étage d’entrée de l’oscilloscope, ce qui n’est pas négligeable ici.

## 2. Utilisation de l'antenne capacitive pour la détection de champs électriques dynamiques dus aux textiles frottés.

### a. Principe des mesures sur échantillons textiles

Le principe des mesures consiste à charger les échantillons textiles par frottement à proximité de l'antenne capacitive et d'en mesurer le champ électrique dynamique émis. La méthode utilisée pour charger les échantillons est celle de la norme EN1149-3. Cette méthode est choisie dans un souci de reproductibilité (figure III.45).

L'antenne est placée à une distance de 8,5 cm de l'échantillon de textile et est reliée à un oscilloscope numérique. Les premières mesures ont été menées avec les frotteurs en aluminium, cependant les champs mesurés étaient trop faibles. Ainsi les mesures suivantes ont été réalisées à l'aide des frotteurs en PVC.

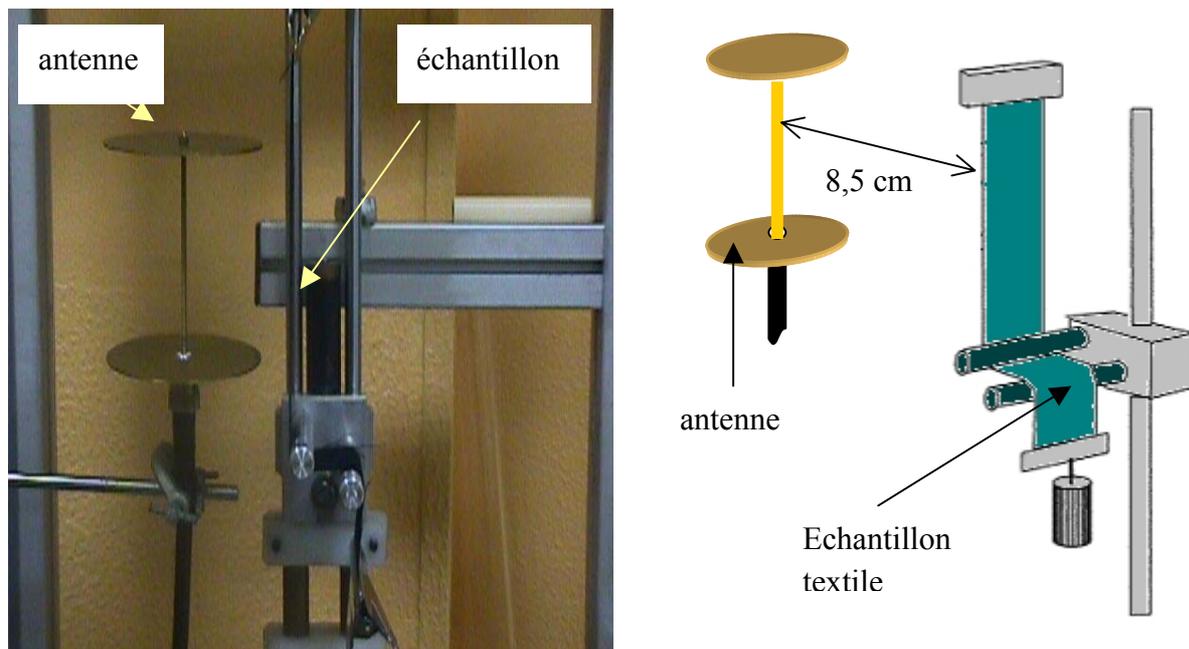


Figure III.45 – Photo du dispositif de mesure avec antenne capacitive et système de frottement selon la méthode normalisée EN1149-3

### b. Premières mesures de champ électromagnétique

Les premières mesures ont été menées sur des échantillons de laine, de soie, de beltron et de chlorofibre. Seules la laine et la soie ont donné des résultats, aucun champ électrique dynamique n'était mesurable pour les autres.

L'exemple de la soie est présenté sur la figure III.46, les courbes correspondent aux tensions mesurées aux bornes de l'antenne après un frottement et plusieurs frottements de l'échantillon de soie.

Les résultats observés montrent que l'on mesure bien un phénomène physique lié au matériau textile. L'amplitude du champ varie en fonction de la quantité de charge générée sur la surface de l'échantillon. Pour le premier essai, l'amplitude crête relevée est d'environ **30 mV**. Après plusieurs essais (plus d'une dizaine), la tension maximale relevée est de **110 mV**, cette augmentation étant probablement due à l'accumulation de charges à la surface de l'échantillon, conséquence directe de la « chargeabilité » de la soie.

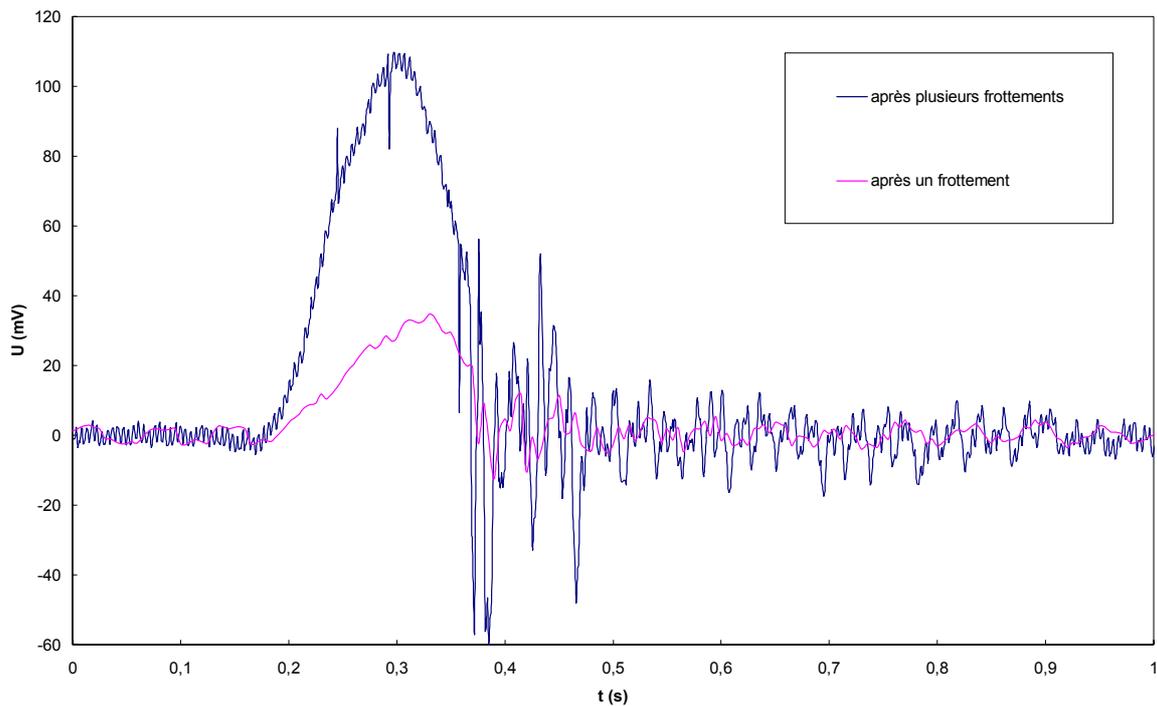
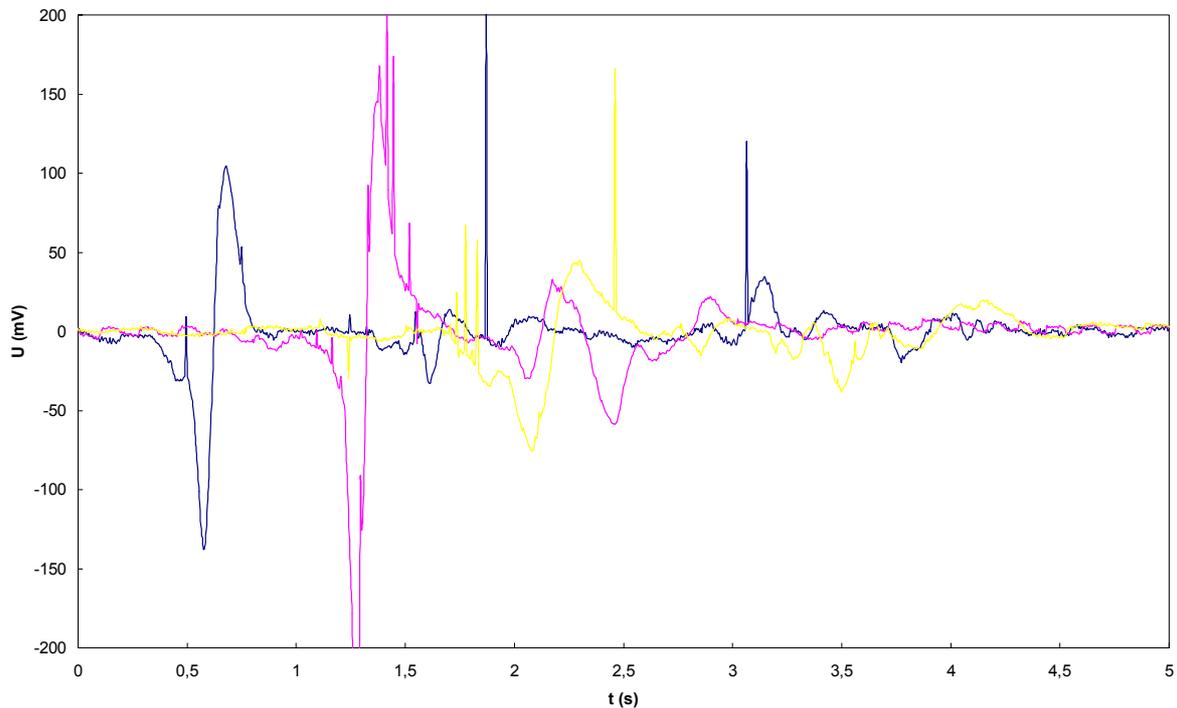


Figure III.46 – Tensions aux bornes de l'antenne soumise aux champs électriques dynamiques provenant de l'échantillon de soie frotté

On observe également une phase d'oscillations du signal sur la partie finale de la courbe. Ces oscillations sont une conséquence des vibrations de l'antenne dues au choc du mobile en fin de course. En effet, la manipulation consiste à lâcher le mobile portant les frotteurs en PVC à partir d'une position haute sur le dispositif. Le mobile tombe alors sous l'action de son propre poids et le frottement sur l'échantillon a lieu. En fin de course, le mobile arrive sur une butée et est arrêté assez brutalement causant des vibrations au niveau de tout le dispositif. Or, l'antenne est fixée sur un pied posé sur le socle de base du dispositif ; lorsque les vibrations ont lieu, l'antenne se met alors à osciller en face de l'échantillon. Ces mouvements périodiques de rapprochement puis d'éloignement en face du textile se traduisent alors par des variations périodiques du signal mesuré.

Quelques autres mesures sont présentées sur la figure III.47, elles concernent le champ dû aux frottements d'un pull en polyester.



*Figure III.47 – Tensions aux bornes de l'antenne soumise aux champs provenant des décharges dues à l'opérateur enlevant son pull en polyester à proximité*

Les trois courbes de la figure III.47 représentent trois mesures du champ généré lorsque l'opérateur enlève son pull 100% polyester à proximité de l'antenne (à environ 50 cm). Les valeurs de tension observées montrent des phénomènes dont les temps caractéristiques sont très diversifiés. Les pics les plus courts en durée correspondent aux champs émis par les décharges disruptives que l'on pouvait entendre lors de la manipulation. On s'aperçoit donc qu'aux mesures de champ électrique dynamique se superpose des phénomènes de décharge avec un spectre radioélectrique beaucoup plus large, que l'on peut détecter avec cette antenne.

Toutes ces mesures montrent donc qu'il est possible d'acquérir des données concernant les champs électriques dynamiques provenant de matériaux textiles lorsqu'ils sont chargés par frottement. Nous allons donc, dans la suite de cette partie, tâcher d'exploiter ces mesures en vue d'obtenir des applications concernant la caractérisation des matériaux textiles.

### c. Etude statistique sur un échantillon de laine

Nous avons effectué une série d'essais récurrents (50 expériences) avec un échantillon de laine afin d'évaluer la reproductibilité de cette mesure. Les résultats de cette campagne de mesure sont présentés sur la figure III.48. Les relevés correspondent aux valeurs crêtes des tensions mesurées avec l'antenne lorsque l'échantillon est frotté suivant le principe précisé plus haut (paragraphe III-F.2.a).

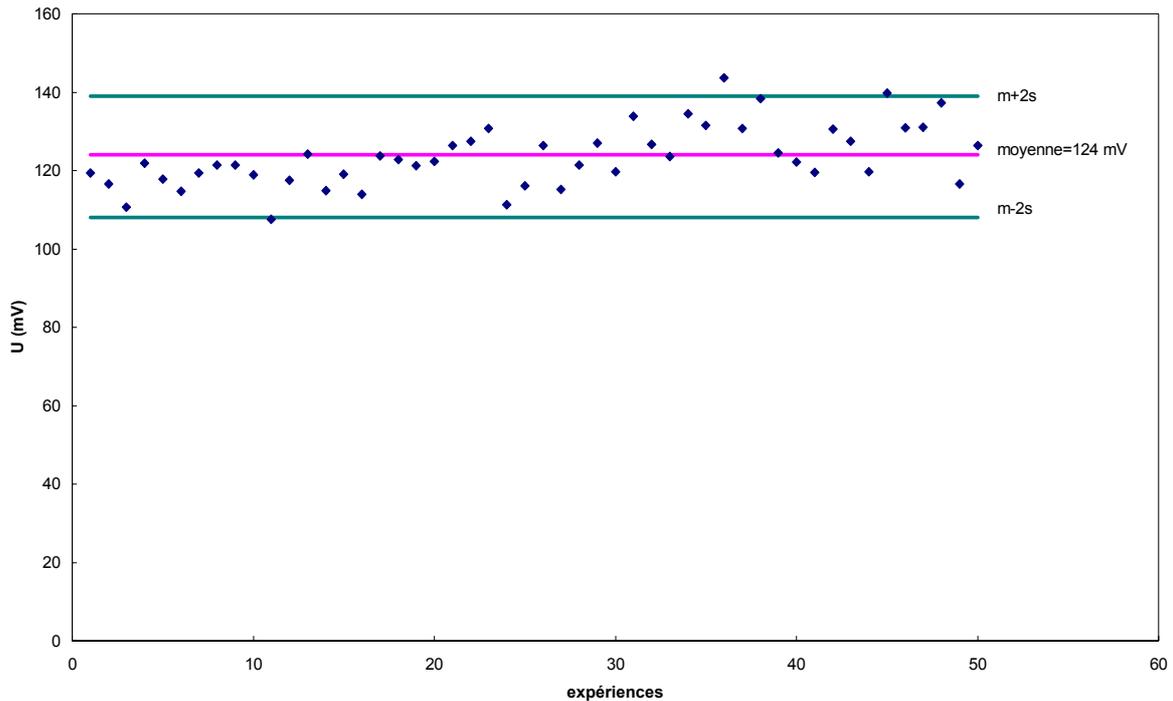


Figure III.48 – Valeurs de tensions crêtes obtenues sur un échantillon de laine

Les frotteurs utilisés étaient en PVC sous une atmosphère ambiante de 22°C et de 50% d'humidité relative. L'antenne était placée à une distance de 8,5 cm de l'échantillon de laine.

Le graphique de la figure III.48 montre que les valeurs de tensions crêtes ne sont pas trop dispersées. En fait, les premiers essais ont été réalisés après quelques essais préliminaires. La tendance générale montre que pour la première moitié du graphique correspondant aux premiers essais, les valeurs se trouvent principalement en dessous de la moyenne, alors que pour la deuxième moitié les valeurs sont plutôt placées au-dessus de la moyenne ; la moyenne se situant à **124 mV**. Cette tendance traduit l'accumulation de charges due à la « chargeabilité » de la soie déjà évoquée plus haut et probablement une certaine modification de la surface de l'échantillon après plusieurs passages des frotteurs. Malgré cette tendance générale, la dispersion reste limitée à un écart type de **10mV** environ.

La reproductibilité de cette méthode semble correcte même si elle dépend fortement de celle du mode de charge par frottement comme pour les tests précédents. Cependant, l'avantage de cette méthode est que, contrairement à la méthode normalisée (EN1149-3) où le

champ électrostatique mesuré après frottement devait retrouver une valeur nulle après chaque essai, soit en attendant la décharge complète de l'échantillon, soit en provoquant cette décharge en utilisant un jet d'air ionisé, cette méthode donc, ne nécessite pas de retrouver l'équilibre des charges à la surface de l'échantillon. En effet nous mesurons les variations dynamiques de charges dues à la création de celles-ci par le frottement. Ces variations de charges se traduisent par l'émission d'un champ électrique dynamique que l'on mesure. Ainsi le temps entre deux mesures est très réduit.

### 3. Etude des propriétés des champs émis par divers échantillons textiles

#### a. Caractérisation des champs en fonction de la nature des matériaux

Les champs mesurés varient beaucoup en fonction de la nature des matériaux soumis aux tests. Les deux graphiques suivants (figures III.49 et III.50) montrent les résultats obtenus pour des échantillons de :

- soie
- viscose
- laine
- chlorofibre
- polyester
- polyamide
- coton

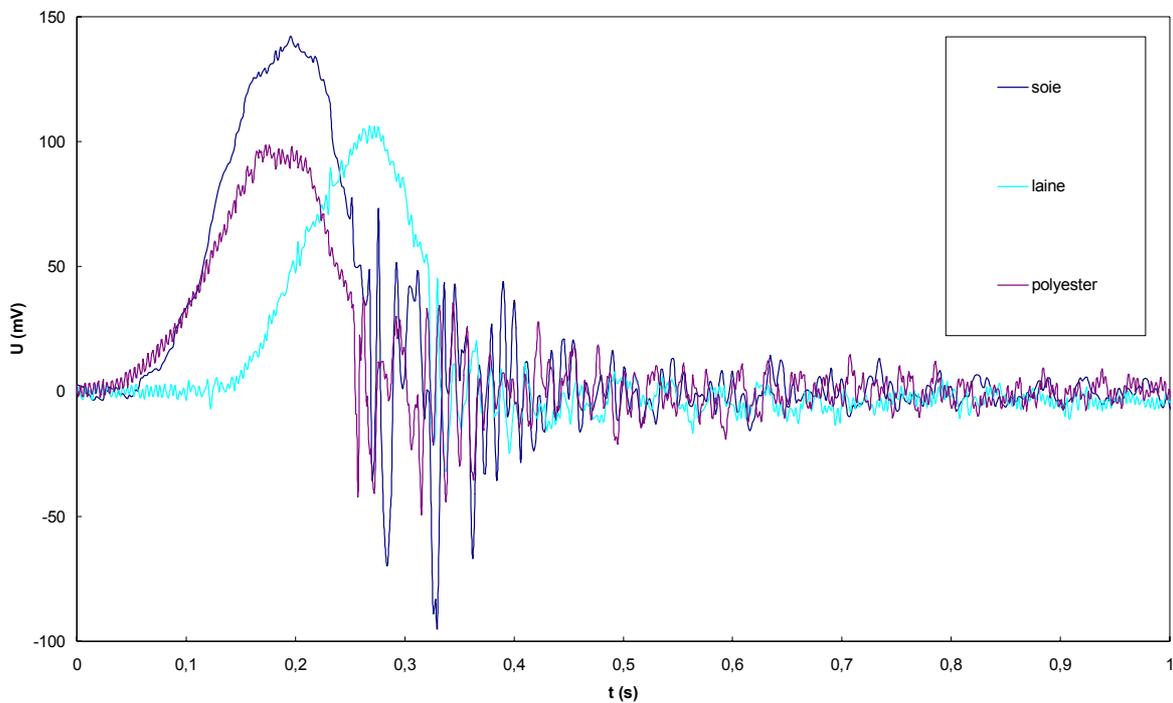


Figure III.49 – Valeurs des tensions obtenues sur les échantillons de laine, de soie et de polyester en fonction du temps

Les conditions expérimentales sont les mêmes que précédemment : l'antenne se situe à 8,5 cm de l'échantillon, les frotteurs utilisés sont en PVC, la température est de 21°C et l'humidité de 50%.

Pour plus de clarté nous avons choisi de séparer sur deux graphiques distincts les valeurs obtenues.

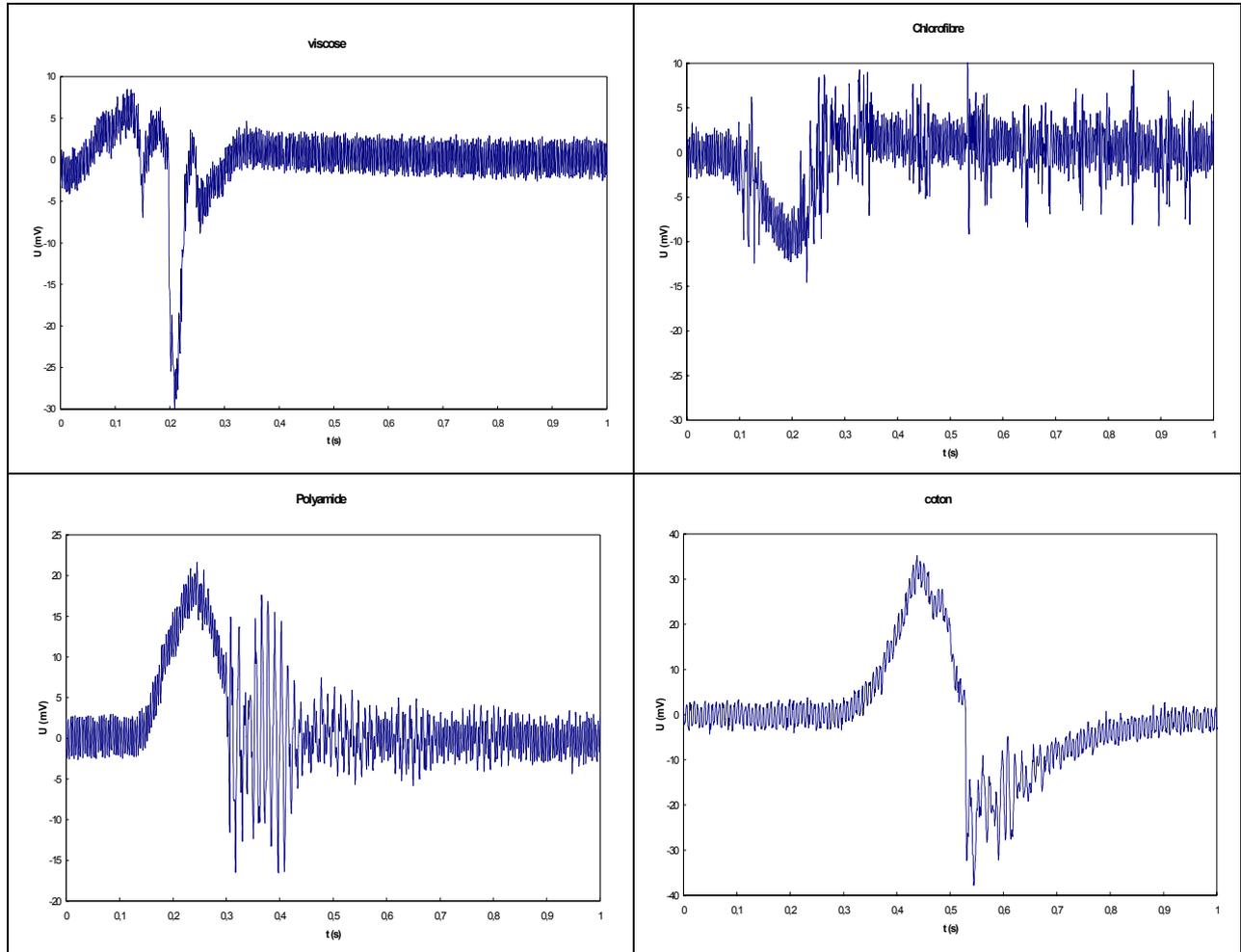


Figure III.50 – Valeurs des tensions obtenues sur les échantillons de viscose, de chlorofibre, de polyamide et de coton en fonction du temps

On obtient donc des niveaux de tensions variés selon la nature du textile testé. La soie présente une valeur maximale aux alentours de **150 mV**, la laine et le polyester se situent plutôt à **100 mV** environ. Pour les trois autres échantillons, les valeurs relevées sont beaucoup plus faibles ; le polyamide par exemple ne dépasse pas **20 mV**.

On remarque également que certains textiles génèrent un champ dont la polarisation est négative : la chlorofibre atteint une valeur de tension de **-10 mV** et la viscose une valeur de **-30 mV**. Par ailleurs, on retrouve les oscillations dues aux vibrations de l'antenne, comme expliqué plus haut.

On s'aperçoit donc d'une large diversité d'amplitudes de tension, celles-ci allant de **-30 mV** à **+150 mV**, les polarités pouvant être positives ou négatives. Les durées de ces impulsions sont identiques pour tous les échantillons : de l'ordre de **200 ms**. L'allure des impulsions est également identique pour la quasi-totalité des échantillons, seuls la viscose et le coton présentent un profil différent dont l'origine physique n'a pas pu être expliquée. D'autres échantillons ont été testés, à savoir, le beltron et l'échantillon de lin/coton, mais aucune tension n'était mesurable. Par ailleurs, il ne semble pas y avoir de corrélations entre les amplitudes crêtes mesurées avec cette méthode et celles du champ électrostatique déterminées avec le moulin à champ. En effet, on remarque que les valeurs obtenues pour la laine, la soie et le polyester présentent de faibles écarts dans le cas du champ électrique dynamique, alors que les écarts étaient plus marqués pour le champ électrostatique. Les comportements de certains matériaux, comme la viscose par exemple, ne sont pas les mêmes vis-à-vis du champ électrostatique et du champ électrique dynamique.

### b. Etude en fonction de la polarisation de l'antenne

Tous les résultats présentés jusqu'ici ont été obtenus par mesure avec l'antenne disposée toujours de la même façon, à savoir la tige en laiton en position verticale en face de la bande de textile. Cette position est nommée polarisation verticale de l'antenne. Dans cette partie nous avons voulu vérifier l'influence de cette polarisation de l'antenne sur la mesure du champ électrique. Une étude comparative entre polarisation verticale et polarisation horizontale de l'antenne a donc été menée.

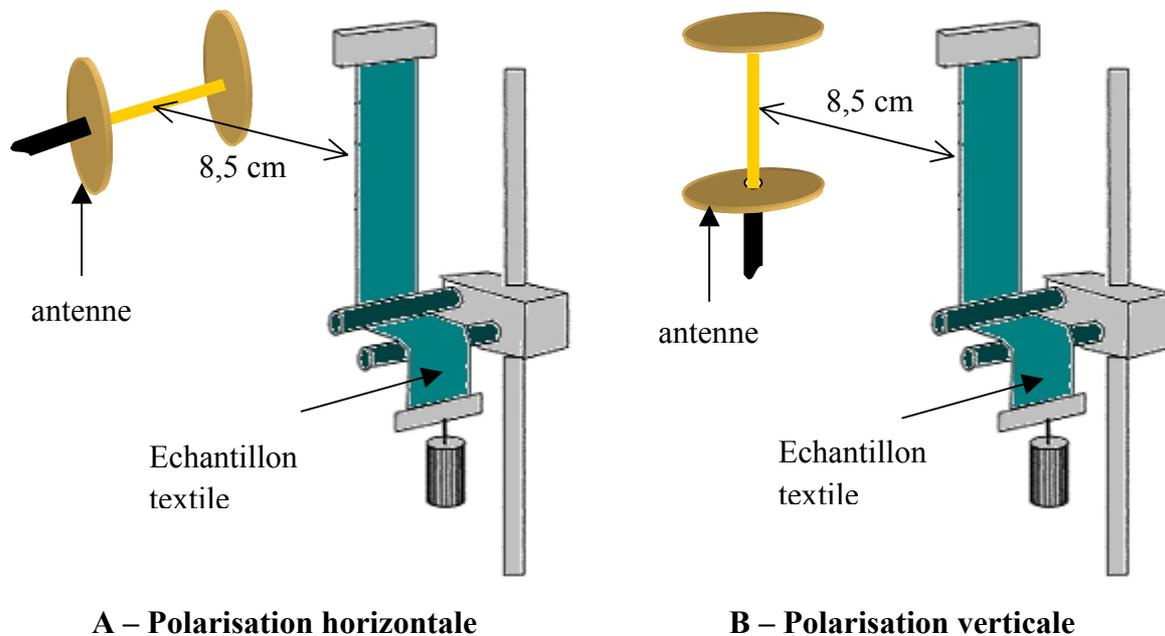


Figure III.51 – Représentations schématiques des configurations dites de polarisation horizontale (A) et verticale (B) de l'antenne

Pour cela nous avons effectué des essais dans les mêmes conditions que dans la partie précédente en changeant uniquement l'orientation de l'antenne (figure III.51), pour les échantillons de laine, de soie et de polyester. Les figures III.52, III.53 et III.54 présentent la comparaison entre ces deux types de polarisation pour les trois échantillons.

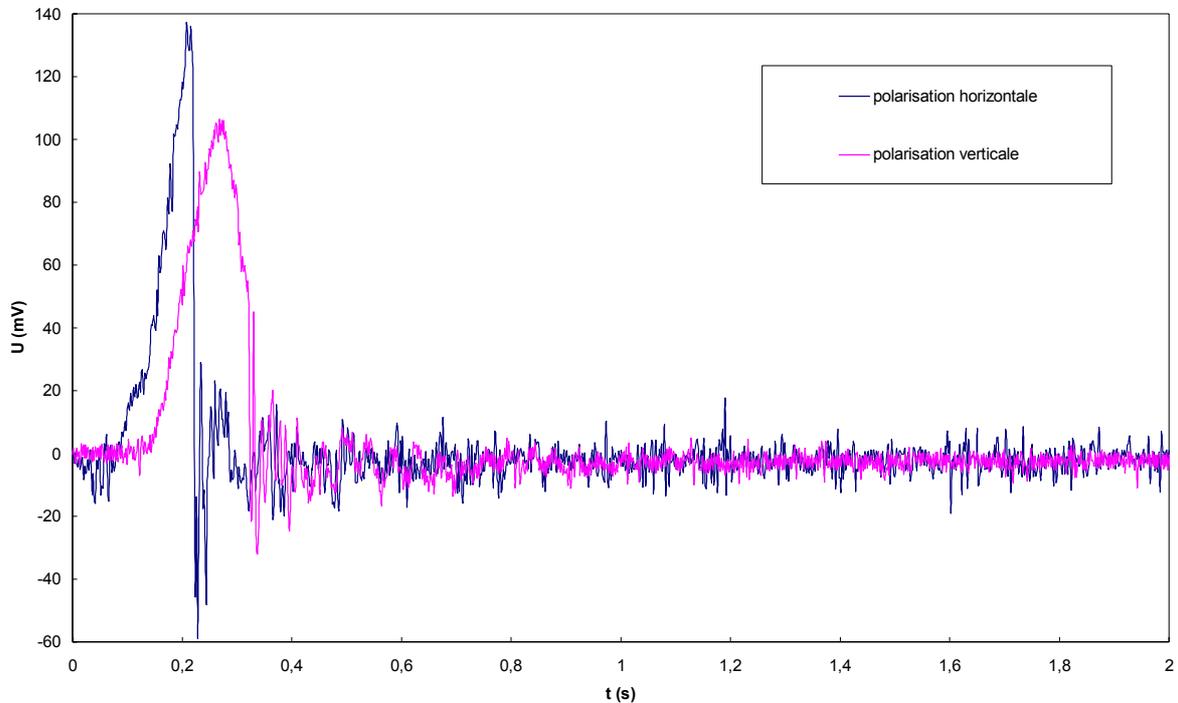


Figure III.52 – Comparaison entre les valeurs de tensions obtenues pour des polarisations horizontale et verticale de l'antenne dans le cas de la laine

Dans les trois cas les ordres de grandeur en ce qui concerne les amplitudes maximales des tensions mesurées sont les mêmes quelle que soit la polarisation de l'antenne. On note bien entendu des écarts, d'environ **30 mV** pour la laine et pour la soie, et de **20 mV** pour le polyester. Toutefois ces écarts ne se font pas en faveur de l'une ou l'autre polarisation de l'antenne, en effet, les champs maximums sont obtenus en polarisation verticale dans le cas de la laine contrairement aux autres échantillons.

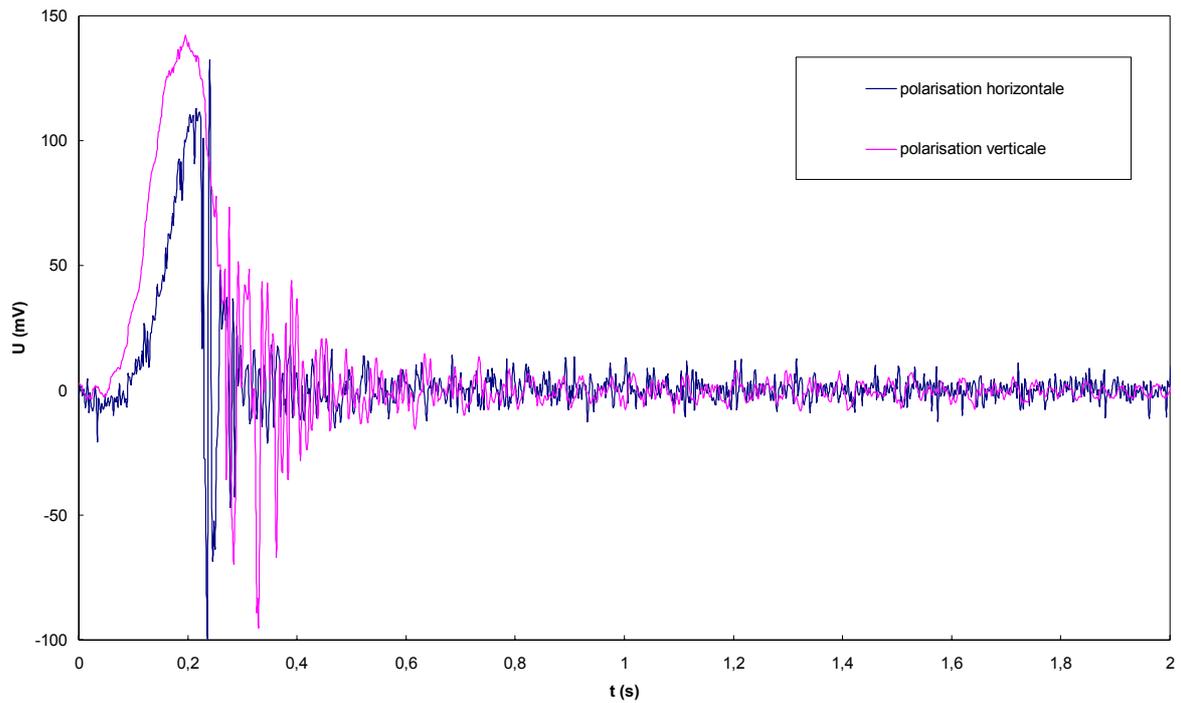


Figure III.53 – Comparaison entre les valeurs de tensions obtenues pour des polarisations horizontale et verticale de l'antenne dans le cas de la soie

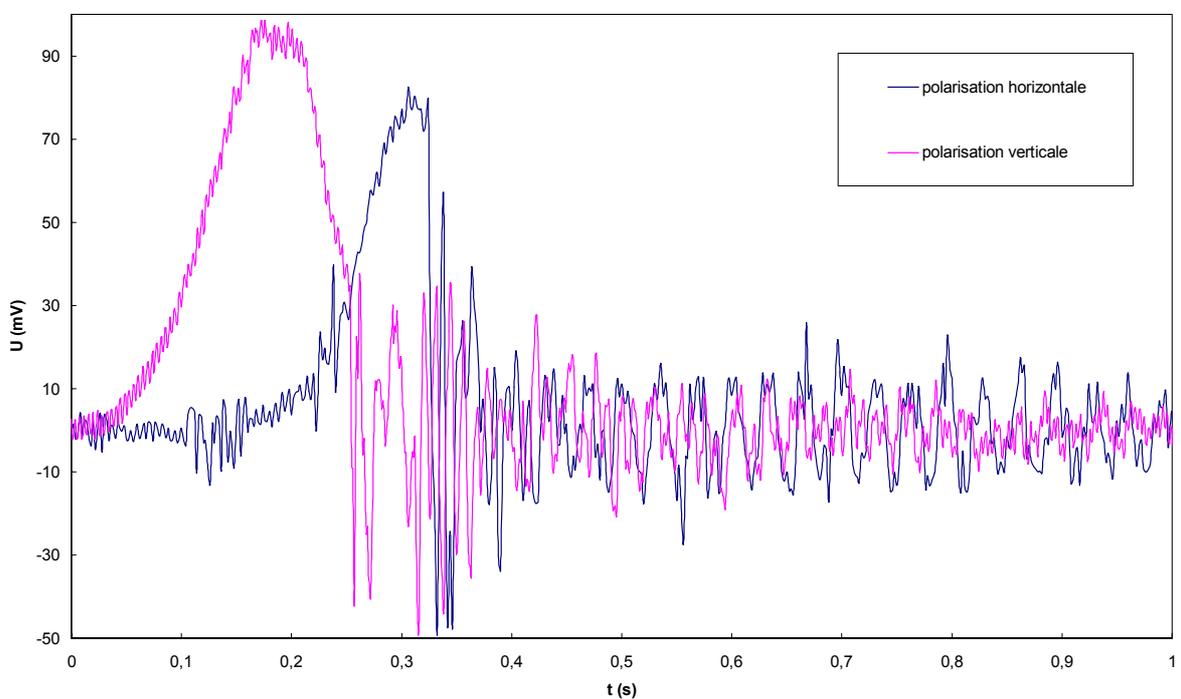


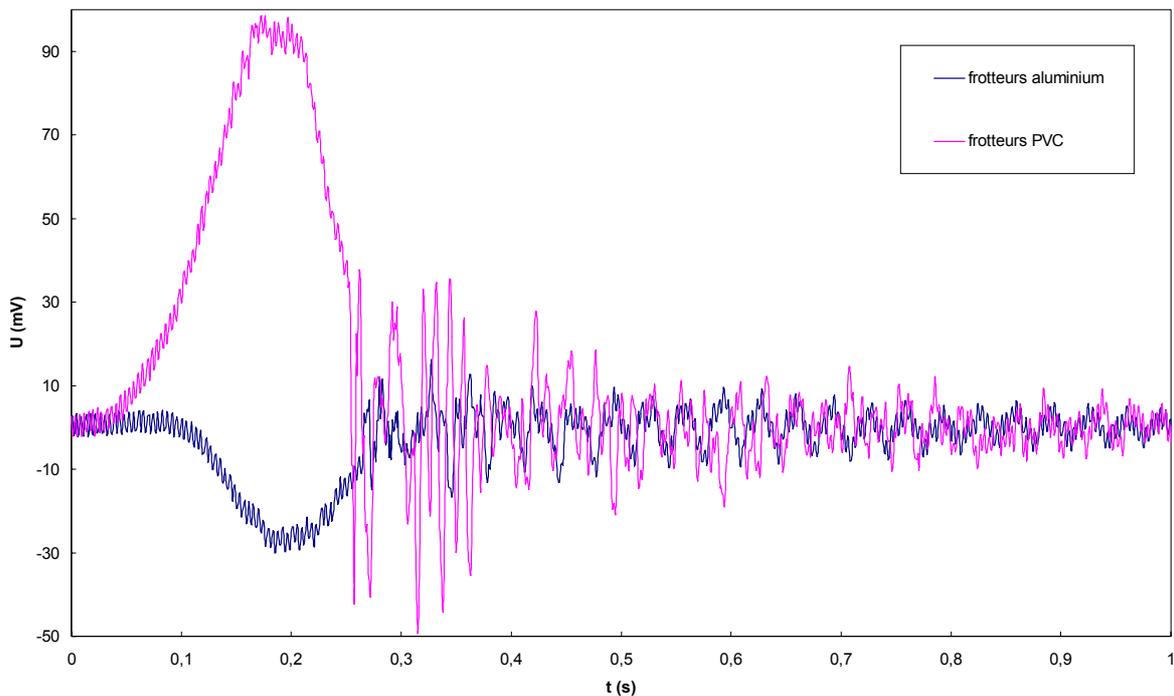
Figure III.54 – Comparaison entre les valeurs de tensions obtenues pour des polarisations horizontale et verticale de l'antenne dans le cas du polyester

En fait, ces écarts peuvent très bien être attribués aux différences dans le mode de frottement et donc aux problèmes de reproductibilité des frottements. La polarisation verticale ne serait donc pas, à priori, une orientation privilégiée des champs émis.

**c. Etude des champs émis en fonction des frotteurs utilisés et du sens de frottement**

Comme nous avons pu le voir précédemment, l'orientation choisie pour l'antenne ne semble pas affecter la mesure du signal. Par contre, nous avons pu constater lors de nos différentes manipulations que le sens de frottement et les frotteurs utilisés n'étaient pas sans effet sur les mesures.

Dans la plupart des essais réalisés, seuls les frotteurs en PVC permettaient d'obtenir un signal mesurable. Nous avons toutefois pu obtenir des valeurs en utilisant les frotteurs en aluminium dans le cas de l'échantillon de polyester. Les résultats obtenus sont présentés sur le graphique de la figure III.55.



*Figure III.55 – Comparaison entre les valeurs de tensions obtenues pour l'échantillon de polyester en fonction du type de frotteur*

Deux faits remarquables sont à noter. Premièrement, les niveaux de tension sont plus élevés pour un frottement avec le PVC qu'avec l'aluminium. Ceci est en accord avec les mesures faites au début de ce chapitre, les potentiels de surface atteints dans le cas de

frottements avec le PVC étaient plus élevés que dans le cas de l'aluminium. On mesure une tension maximale d'environ **100 mV** avec le PVC et de **-30 mV** avec l'aluminium. Deuxièmement, on s'aperçoit que la polarité est inversée lorsque l'on utilise les frotteurs en aluminium par rapport à la polarité obtenue avec les frotteurs en PVC. Nous avons également obtenu des résultats similaires avec les mesures de champ électrique statique, où la polarité était positive pour les frotteurs en PVC et négative pour les frotteurs en aluminium. Comme pour les mesures avec le moulin à champ, cette méthode permet donc de déterminer la polarité de la charge et l'amplitude de celle-ci.

Contrairement aux mesures avec le moulin à champ, où le sens de frottement n'avait pas d'influence sur le champ mesuré, nos mesures de champ électrique dynamique nous ont montré un comportement différent. La figure III.56 présente les résultats obtenus sur des échantillons de laine, de coton, de polyester et de polyamide.

Les conditions des essais n'ont pas changé :

- frotteurs en PVC
- température : 22°C
- hygrométrie : 50%
- distance de 8,5 cm entre l'antenne et l'échantillon

Les essais ont été réalisés dans le but de comparer les champs mesurés lorsque l'échantillon est frotté de haut en bas (phase descendante) avec ceux mesurés lorsque l'échantillon est frotté de bas en haut (phase ascendante).

On observe que lorsque l'échantillon est frotté dans un sens, le fait de changer le sens de frottement inverse la polarité du champ mesuré. Tous les échantillons testés ont présenté ce comportement. L'exemple du coton montre un champ passant d'une polarité positive à une polarité négative, l'amplitude de la tension étant comprise entre **-30 mV** et **30 mV** environ, cette variation est alors inversée lorsqu'on inverse le sens de frottement, mais l'amplitude de la tension reste la même. Le signal est presque symétrique.

Il semble donc que l'on obtienne un champ de même amplitude, mais de polarité inverse. Les faibles écarts que l'on observe sont dus à la difficulté de reproduire le même frottement dans les deux sens, la manipulation étant réalisée par un opérateur.

Ces résultats ne sont pas encore bien expliqués, d'autres études sont encore nécessaires pour déterminer l'origine de ce changement de polarité en fonction du frottement. Il semblerait que la variation dynamique de charges à la surface de l'échantillon soit assimilable à un courant électrique, le changement de sens du frottement entraîne une modification du sens du courant qui se traduit par une inversion de signe au niveau du champ mesuré. Cette méthode de mesure alternative semble donc pouvoir être utile dans la caractérisation des comportements électrostatiques des textiles et dans la compréhension de ces phénomènes.

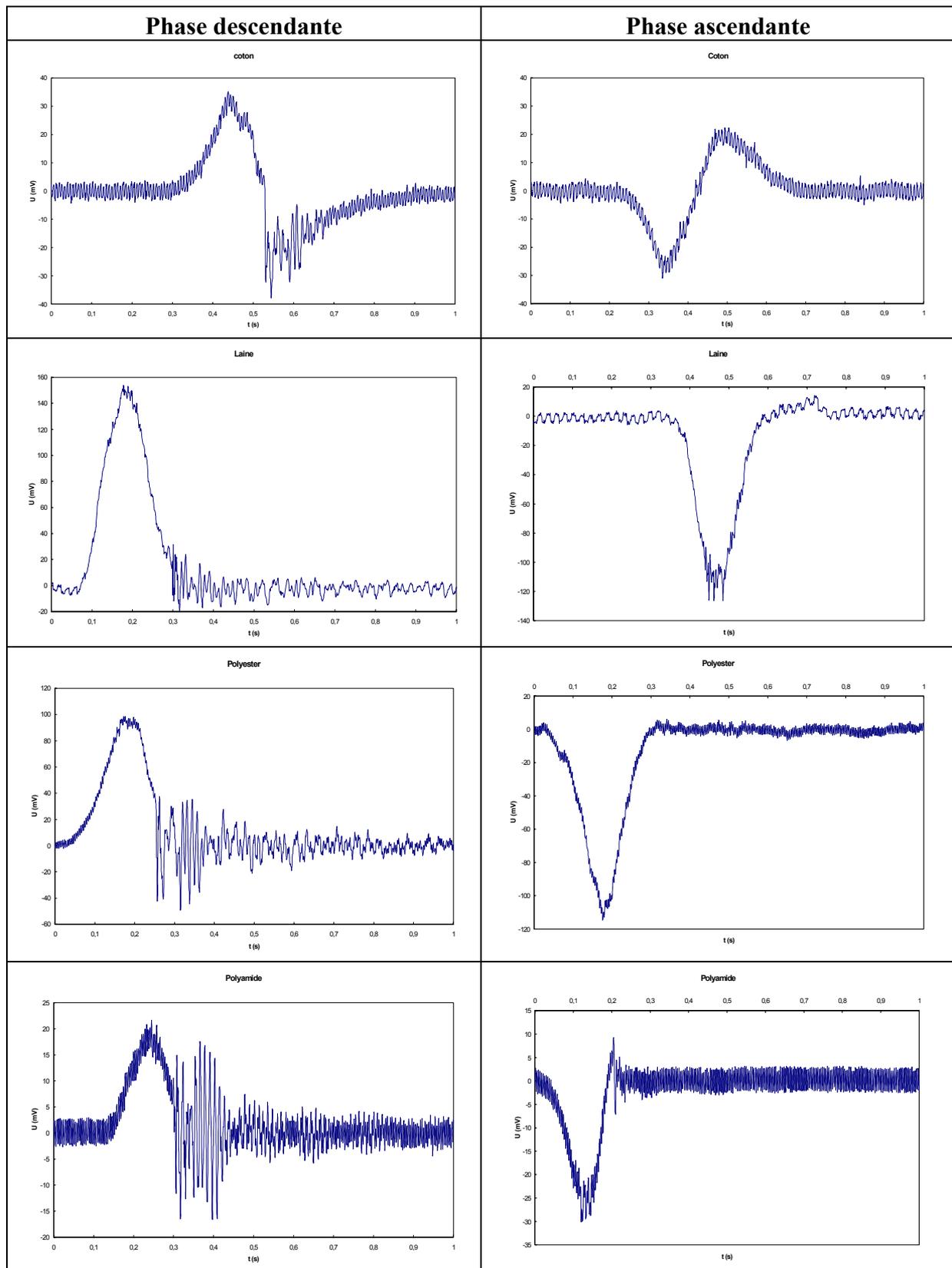


Figure III.56 – Comparaison entre les valeurs de tensions obtenues pour les phases de frottement ascendante et descendante dans le cas du polyester, du polyamide, de la laine et du coton

### III-G Conclusion

Ce chapitre présente donc un aperçu des comportements électrostatiques des textiles après frottement. La compréhension des mécanismes physiques mis en jeu dans l'effet triboélectrique est encore incomplète à ce jour. La complexité des phénomènes et le grand nombre de paramètres participant à ce mode de charge électrostatique rendent la tâche particulièrement difficile. C'est pourquoi une approche expérimentale reste souvent la solution la plus adaptée pour appréhender ces phénomènes.

Nous avons donc tâché de mettre au point divers dispositifs de mesure pour évaluer les comportements des matériaux textiles face à l'effet triboélectrique : le premier d'entre eux étant le dispositif normalisé (EN1149-3). L'étude de ce dispositif a permis d'en examiner les avantages et les inconvénients surtout en ce qui concerne le facteur de reproductibilité.

La limite principale de ce dispositif reste l'impossibilité d'évaluer la « chargeabilité » maximale des échantillons, ainsi nous avons développé un système permettant un frottement continu des échantillons et l'étude à la fois de la charge et de la décharge en fonction du temps. Ces essais ont permis de mettre en évidence divers aspects des comportements électrostatiques dont notamment la diversité des niveaux de charge atteints en fonction des matériaux utilisés, mais aussi de mettre en évidence la cohabitation simultanée de plusieurs mécanismes de décharge, principalement la décharge en surface, la relaxation diélectrique et l'injection de charges.

Les potentiels de surface élevés atteints lors des frottements deviennent une source de danger lorsqu'un arc est susceptible d'apparaître, l'évaluation de ce risque est un facteur déterminant pour la caractérisation des matériaux textiles. Dans cette optique, nous avons mis au point un capteur sphérique permettant de provoquer cet arc et d'en mesurer le courant de décharge. Ce courant de décharge, ainsi que la charge totale transférée et l'énergie de l'arc sont autant de critères pour la caractérisation des textiles.

Enfin, une approche différente a été suivie en réalisant des mesures de champs électriques dynamiques au moyen d'une antenne capacitive. Cette méthode reste néanmoins en état de développement, des études plus approfondies pour la compréhension des phénomènes mis en jeu doivent se poursuivre.

---

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

Nous venons de présenter l'ensemble des travaux réalisés durant cette thèse portant sur l'étude des phénomènes électrostatiques et la réalisation d'un banc de test pour les matériaux textiles. Cette thèse constituait une première expérience du laboratoire d'accueil dans le domaine de l'électrostatique. La gestion des problèmes liés à l'électricité statique représente en effet un enjeu très important, d'autant plus que le nombre de secteurs industriels concernés est très grand.

Dans une première partie, il a fallu présenter un état de l'art des phénomènes électrostatiques et pour éclairer cette présentation rappeler quelques éléments théoriques généraux. Il en ressort que la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu reste encore très lacunaire surtout en ce qui concerne les transferts de charges par frottement. Dès lors, la lutte contre l'électricité statique nuisible passe par une caractérisation précise et une quantification des problèmes. C'est pourquoi depuis quelques années un effort particulier pour la mesure des phénomènes électrostatiques n'a cessé de croître.

Parallèlement au développement des moyens de mesure, un certain nombre de normes internationales sont également développées afin d'établir un cadre pour l'évaluation des comportements électrostatiques, notamment dans l'industrie textile. Cependant la grande difficulté liée à la caractérisation des phénomènes électrostatiques reste la reproductibilité des mesures. Pour pouvoir évaluer l'efficacité d'un matériau textile en terme d'électricité statique deux paramètres importants sont à prendre en considération : tout d'abord, il faut déterminer son aptitude à acquérir et à accumuler des charges électriques, ensuite, évaluer sa capacité à les évacuer. Pour éviter de perturber la distribution des charges et d'ajouter une source supplémentaire d'erreurs dans les mesures, il est indispensable de faire une mesure sans contact par le biais du champ électrique. On se rend compte, par ailleurs, que pour reproduire des expériences en laboratoire il est également indispensable de maîtriser le mode de charge du matériau.

Dans cette optique, la seconde partie de notre manuscrit est consacrée à l'élaboration d'un système basé sur la charge par polarisation et à la compréhension des comportements des matériaux textiles face à ce mode de charge. Cette méthode propose un moyen de charger les textiles avec une bonne reproductibilité et de suivre ensuite le processus de décharge à travers une mesure du champ électrique généré. Nous avons pu voir que les notions « classiques » de résistance de fuite déduites du modèle de décharge d'un condensateur ne pouvaient pas s'appliquer à notre système. La compréhension de la décharge obtenue expérimentalement nécessite une interprétation liée aux comportements microscopiques des porteurs de charge au sein du matériau. Ainsi, les expériences montrent que les matériaux textiles comme un grand

## Conclusion générale

nombre de matériaux isolants présentent un courant de dépolarisation qui évolue selon une loi polynomiale en  $t^n$ . Cependant, cette évolution peut s'écarter de cette loi dans certains cas, à cause de l'hétérogénéité des matériaux textiles et de leur complexité structurale. Le but de cette étude était donc de mettre en œuvre un moyen de mesure reproductible permettant de proposer des paramètres avec lesquels nous pourrions caractériser le comportement électrostatique du matériau. Même si cette méthode semble présenter beaucoup d'avantages (reproductibilité, usage de haute tension non nécessaire...) il reste encore à établir la pertinence de ces résultats ; il faut rechercher des critères tirés des mesures, pour affirmer si un matériau est conforme du point de vue électrostatique.

Par ailleurs la méthode de polarisation n'est pas forcément représentative du mode de charge le plus répandu dans le domaine du textile qui est l'effet triboélectrique. C'est pourquoi la dernière partie de notre travail s'est intéressée à cet aspect du problème. Du point de vue théorique, l'effet triboélectrique reste encore mal connu. Il semblerait que le phénomène soit principalement dû à un transfert d'électrons par effet tunnel et que les états de surface jouent un grand rôle. Du point de vue expérimental, il est très difficile à réaliser de manière reproductible. Bien que les méthodes par dépôt triboélectrique fasse l'objet de quelques normes, des progrès restent à accomplir pour atteindre des niveaux de charge reproductible. Notre étude s'est donc orientée en particulier vers la mise au point d'un dispositif améliorant ces conditions de reproductibilité. La méthode développée utilise un plateau en rotation afin de permettre un frottement continu du textile et d'analyser ensuite les propriétés de décharge des matériaux. Ainsi une interprétation plus fine de la décharge a pu être apportée et la mise en évidence de plusieurs mécanismes simultanés de décharge a pu être faite. Ce moyen d'essai ayant donné satisfaction, nous avons engagé la construction d'un banc prototype à commande automatisée.

La dernière phase de notre travail, après s'être intéressé à la variation des potentiels électriques à la surface des matériaux, est axée sur les conséquences de ces montées en potentiel. En effet, la principale nuisance due à l'électricité statique est sans aucun doute la décharge disruptive, c'est-à-dire sous la forme d'un arc électrique. Dans le but d'étudier ces décharges, l'usage d'un capteur à électrode sphérique a permis de provoquer ces décharges et d'en recueillir le courant afin d'en tirer les informations nécessaires à l'évaluation de la dangerosité du matériau ; le but final est de pouvoir estimer le seuil détonnant d'une explosion amorcée par décharge sans pour autant nécessiter un test systématique sous atmosphère inflammable.

Enfin, la méthode de mesure du champ électrique dynamique constitue une orientation alternative pour la caractérisation des matériaux textiles. Il ressort de cette étude qu'il est possible de faire des mesures reproductibles, il reste néanmoins à déterminer les paramètres intéressants permettant l'évaluation des échantillons. Le développement de cette méthode devra donc être poursuivi.

Finalement à ce jour, il existe des moyens plus ou moins efficaces pour caractériser les matériaux textiles, seulement, la plupart d'entre eux sont dédiés à l'évaluation d'échantillons,

## Conclusion générale

alors qu'il s'avère être de plus en plus indispensable de pouvoir caractériser des systèmes plus complexes tels que des vêtements complets ou des sièges pour automobile par exemple. En effet, dans le cas des vêtements complets par exemple, l'influence des coutures sur les comportements électrostatiques reste un élément indéterminé. Il semble donc que l'on s'oriente à l'avenir vers des moyens de test pour systèmes complets pour s'approcher le plus possible des conditions finales d'utilisation des produits.

Enfin, tout au long de ce travail de thèse, nous nous sommes attachés à une approche macroscopique pour l'étude des propriétés électrostatiques des matériaux textiles. Or, il est sans doute très probable qu'une approche orientée sur l'étude de ces propriétés à l'échelle de la fibre, voire à l'échelle microscopique et nanoscopique, apporterait un grand nombre d'informations précieuses pour la compréhension de ces phénomènes.

---

# Annexes

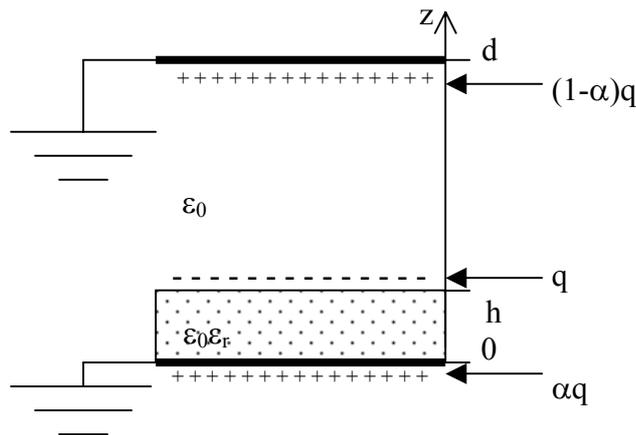
---

## Annexe A

### Influence du moulin à champ sur la mesure

Dans cette annexe nous proposons une approche théorique pour déterminer l'influence d'un moulin à champ sur la mesure du potentiel de surface d'un échantillon chargé. En effet, la présence du moulin à champ, lors de la mesure, a une influence sur la distribution des charges en surface, même si cette mesure se fait sans contact [60].

En fait, on peut considérer l'entrée du moulin à champ, à la distance  $z=d$ , comme une seconde électrode à la masse, l'échantillon d'épaisseur  $h$  étant posé sur un plan de masse et portant une charge surfacique  $q$  comme le montre le schéma suivant :



*Principe de l'influence du moulin à champ*

Ainsi un champ règne entre l'échantillon et le moulin, et c'est ce champ qui est mesuré. Dans ce cas, les charges d'influence se répartissent sur les deux électrodes à la masse (avec une large majorité sur l'électrode du bas) ; une charge  $\alpha q$  sur l'électrode inférieure et une charge  $(1-\alpha)q$  sur l'électrode supérieure (moulin à champ).

Dans l'hypothèse où la charge est située uniquement en surface de l'échantillon, nous pouvons déterminer le potentiel électrique à la surface de l'échantillon calculé depuis l'électrode du bas, en supposant que le champ électrique dans l'échantillon est uniforme, par :

$$V(h) = -\alpha h \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

Si on suppose qu'il règne également un champ uniforme devant le moulin à champ, alors :

$$V(h) = -\frac{(1-\alpha)qd}{\varepsilon_0}$$

Le coefficient de partage  $\alpha$  est obtenu en identifiant les deux expressions précédentes de  $V$ , soit :

$$\alpha = \frac{\varepsilon_r d}{\varepsilon_r d + h}$$

Ainsi on peut déterminer le champ mesuré par le moulin à champ qui correspond au champ électrique régnant au-dessus de la surface de l'échantillon par :

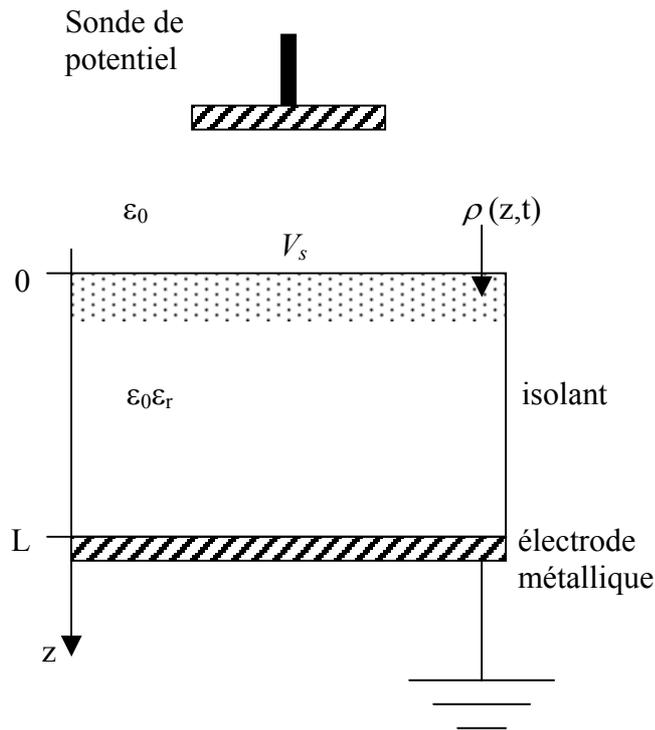
$$E = \frac{h}{\varepsilon_r d + h} \frac{q}{\varepsilon_0}$$

La charge, lorsqu'elle est déposée sur la surface, aura tendance à pénétrer à l'intérieur de l'échantillon sous l'action du champ électrique. Dans le cas d'une sonde de potentiel asservie, la totalité de la charge est attirée vers l'électrode inférieure car le champ, au-dessus de la surface, est nul. Au contraire, dans le cas du moulin à champ, le champ électrique au-dessus de la surface n'est pas nul comme nous venons de le voir, l'évolution de cette charge de surface peut donc être différente dans cette configuration.

## Annexe B

### Mesure du déclin de potentiel à la surface d'un diélectrique chargé

Dans cette annexe, nous proposons de donner quelques éléments théoriques pour la détermination du potentiel de surface d'un diélectrique chargé. Ce calcul peut s'appliquer directement aux expériences de mesure de déclin de potentiel et à la détermination de la migration des charges de surface à l'intérieur du diélectrique (injection de charges) [61,62].



Considérons donc un échantillon isolant d'épaisseur  $L$  et déposé sur une surface métallique à la masse. Sur la surface libre on dépose une charge électrique d'épaisseur  $z_0$  telle que  $z_0/L \ll 1$  et de densité  $\rho(z,t)$ . En l'absence d'autres masses au voisinage, il apparaît à l'interface métal/isolant une charge d'influence de signe opposé et de même grandeur

(phénomène de polarisation), car la charge est alors en influence totale par rapport à la charge d'influence.

Cette charge déposée génère un potentiel de surface  $V_s$  qui est mesuré par une sonde de potentiel placée devant l'échantillon. Le potentiel de la sonde s'ajuste par asservissement à celui de la surface mesurée, de sorte qu'aucun champ ne règne devant cette surface.  $V_s$  décroît alors pendant que la charge traverse l'échantillon sous l'action de son propre champ électrique jusqu'à l'électrode à la masse.

L'échantillon étant suffisamment large comparé à l'épaisseur  $L$ , on peut adopter une description unidimensionnelle du problème et négliger les effets de bord. La charge  $\rho(z,t)$  crée un champ électrique  $E(z,t)$ , selon l'équation de Poisson, on a :

$$\operatorname{div}E(z,t) = \frac{\rho(z,t)}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}$$

Puisque la sonde de potentiel est au même potentiel que la surface de l'isolant, le champ à l'extérieur disparaît, et la condition de passage  $E(0,t)$  est satisfaite. L'électrode arrière est alors sous l'influence complète de la charge d'espace implantée, telle que :

$$E(L,t) = \frac{Q_s(t)}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}$$

où

$$Q_s(t) = \int_0^L \rho(z,t) dz$$

est la charge totale par unité de surface.

La pénétration de la charge peut être définie par le mouvement de son centroïde (ou barycentre de charges)  $\bar{z}(t)$  dont la profondeur est donnée par :

$$\bar{z}(t) = \frac{1}{Q_s} \int_0^L z \rho(z,t) dz$$

L'équation de Poisson donne alors :

$$\operatorname{div}E(z,t) = \frac{\rho(z,t)}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} = \frac{dE(z,t)}{dz}$$

donc

$$\bar{z}(t) = \frac{1}{Q_s} \int_0^L z \rho(z, t) dz = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{Q_s} \int_{E(0)}^{E(L)} z dE$$

Par intégration par parties il vient :

$$\bar{z}(t) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{Q_s} \left( [zE(z, t)]_0^L - \int_0^L E(z, t) dz \right)$$

avec  $[zE(z, t)]_0^L = E(L, t)L$  et  $\int_0^L E(z, t) dz = V_s(t)$

d'où

$$V_s(t) = \frac{Q_s(t)L}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \left( 1 - \frac{\bar{z}(t)}{L} \right)$$

On obtient ainsi la relation reliant de façon simple l'évolution du potentiel au mouvement du barycentre de charges. Tant que la charge n'a pas atteint l'électrode arrière, la quantité totale de charge  $Q_s$  reste constante et  $Q_s(t) = Q_s(0) = Q_0$ . Dans ces conditions la dérivée de  $V_s$  est directement proportionnelle à la vitesse de dérive  $v_c$  du centroïde :

$$\frac{dV_s(t)}{dt} = -\frac{Q_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \frac{d\bar{z}(t)}{dt} = -\frac{Q_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} v_c$$

Ce taux de déclin de potentiel est souvent considéré comme un meilleur paramètre de caractérisation que le potentiel de surface seul.

Nous avons donc vu dans cette annexe un peu d'électrostatique théorique élémentaire unidimensionnelle mais néanmoins suffisante pour décrire le comportement expérimental observé lors des expériences de mesure de déclin de potentiel : expériences mettant en évidence la migration des charges dans le volume de l'échantillon diélectrique par le phénomène d'injection de charges.

---

# Références bibliographiques

---

## Références bibliographiques

- [1] R. CHALLANDE  
*Mesure et élimination de l'électricité statique nuisible*  
Eyrolles, Gauthier-Villars, 1973.
- [2] I. HOLME, J.E. MCINTYRE, and Z.J. SHEN  
*Electrostatic charging of textiles*  
The Textile Institute, 1998, 28, 1.
- [3] E. DURAND  
*Electrostatique – I. les distributions*  
Masson, 1964.
- [4] E. DURAND  
*Electrostatique – II. Problèmes généraux, conducteurs*  
Masson, 1966.
- [5] D.M. TAYLOR  
*Measuring techniques for electrostatics*  
Journal of Electrostatics, 2001, 51-52, 502-508
- [6] J.CHUBB  
*Electrostatic measurements: opportunities and applications*  
VTT Automation, Electrostatic Measurements Lectures, Helsinki, may 2000
- [7] C. MENGUY  
*Electricité statique. Principes. Problèmes. Applications.*  
D 1 035, traité Génie électrique, Techniques de l'Ingénieur, 1993
- [8] J. PAASI, T. KALLIOHAKA, T. LUOMA, M.SOININEN, H. SALMELA, S. NURMI, G. COLETTI, F. GUASTAVINO, L. FAST, A. NILSSON, P. LEMAIRE, J. LAPERRÉ, C. VOGEL, J. HAASE, T. PELTONIEMI, T. VILHERIAKOSKI, G. REINA, J. SMALLWOOD AND A. BORJESSON  
*Evaluation of existing test methods for ESD garments*  
ESTAT-Garments project, research report n° BTUO45-041224, February 2004

## Références bibliographiques

- [9] C. MENGUY  
*Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides*  
D 2 310, traité Génie électrique, Techniques de l'Ingénieur, 1997
- [10] STANDARD IEC 61340-5-1  
*Protection of electronic devices from electrostatic phenomena – General requirements*  
1998
- [11] STANDARD EN 1149-1  
*Protective clothing – Electrostatic properties – Part 1: Test methods for measurement of surface resistivity*  
1996
- [12] STANDARD EN 1149-2  
*Protective clothing – Electrostatic properties – Part 2: Test method for measurement of the electrical resistance through a material (vertical resistance)*  
1998
- [13] S.KIRKPATRICK  
*Percolation and conduction*  
Reviews of modern physics, October 1973, 45, 574-588
- [14] A. PRIOU  
*Matériaux en électromagnétisme : modélisation des matériaux composites*  
AF 3 371, traité Sciences fondamentales, Techniques de l'Ingénieur, janvier 1999
- [15] STANDARD EN 1149-3  
*Protective clothing – Electrostatic properties – Part 3: Test methods for measurement of charge decay*  
2003
- [16] J.CHUBB  
*New approaches for electrostatic testing of materials*  
Journal of Electrostatics, march 2002, 54, p233
- [17] J. LAPERRE, J. HAASE, P. HOLDSTOCK, P. KATHIRGAMANATHAN, G. SCHMEER-LIOE, M.J. TOOHEY  
*Electrostatic safety of personal protective clothing for use in flammable atmospheres*  
Techtextil Symposium'99 – Block 3: "new protective textiles" – paper 308

## Références bibliographiques

- [18] J.CHUBB, P. MALINVERNI  
*Comparative studies on methods of charge decay measurement*  
Journal of Electrostatics, may 1993, 30, p273-283
- [19] NORME NF EN 1815  
*Revêtements de sols résilients et textiles – Evaluation de la propension à l’accumulation de charges électrostatiques*  
Mars 1998
- [20] STANDARD ISO 6356  
*Textile floor coverings – Assessment of static electrical propensity – Walking test*  
2000
- [21] E. GOVART, T. LEBLAN, P. MESNAGE, F. BOUSSU, X. FLAMBARD, N. HENROT, L. HOUILLON  
*Le textile de A à Z*  
Formation continue, IFTH, octobre 2001
- [22] H.J. KOSLOWSKI  
*Dictionary of man-made fibers*  
International Business Press Publishers, 1<sup>st</sup> edition 1998
- [23] P. KATHIRGRAMANATHAN, M.J. TOOHEY, J. HAASE, P. HOLDSTOCK, J. LAPERRE, G. SCHMEER-LIOE  
*Measurements of incendivity of electrostatic discharges from textiles used in personal protective clothing*  
Journal of Electrostatics, 2000, 49, 51-70
- [24] J. BOUTIGNY, A. GEORGES  
*Le champ électrique dans les milieux matériels*  
Vuibert Supérieur, 1995
- [25] R. FEYNMAN, R. LEIGHTON, M. STANDS  
*Le cours de physique de Feynman : électromagnétisme 1*  
Dunond, 1999
- [26] A.K. JONSCHER  
*Dielectric relaxation in solids*  
Chelsea Dielectric Press, London 1983.
- [27] R. COELHO, B. ALADENIZE  
*Les diélectriques*  
Editions Hermès, Paris, 1993

- [28] J. CURIE  
*Recherches sur la conductibilité des corps cristallisés*  
Ann. Chim. Phys. 18, 203 (1889)
- [29] E. VON SCHWEIDLER  
Ann. Phys. 24, 711 (1907)
- [30] R. LOVELL  
*Decaying and steady currents in an epoxy polymer at high electric fields*  
J.Phys.D.(Appl. Phys.), 1974, 7, 1518-1530.
- [31] E.A. BAUM, T.J. LEWIS, R. TOOMER  
*The decay of surface charge on n-octadecane crystals*  
J.Phys.D.(Appl. Phys.), 1978, 11, 703-716
- [32] D.M. TAYLOR, T.J. LEWIS  
*Electrical conduction in polyethylene terephthalate and polyethylene films*  
J.Phys.D.(Appl. Phys.), 1971, 4, 1346-1357
- [33] D.K. DAS GUPTA, K. JOYNER  
*On the nature of absorption currents in polyethylene terephthalate (PET)*  
J.Phys.D.(Appl. Phys.), 1976, 9, 829-840
- [34] D.K. DAS GUPTA, K. JOYNER  
*A study of absorption currents in polypropylene*  
J.Phys.D. (Appl. Phys.), 1976, 9, 2041-2048
- [35] N.F. MOTT, E.A. DAVIS  
*Electronic processes in non-crystalline materials*  
Oxford, London, 1971.
- [36] T.J. LEWIS  
*Dielectric and Related Molecular Processes*  
vol. 3 (London: The Chemical Society), ch. 7, 1977
- [37] A.K. JONSCHER  
*Physical basis of dielectric loss*  
Nature, 1975, 253, 717-719
- [38] J. LOWELL  
*Contact electrification of metals*  
J.Phys.D. (Appl. Phys.), 1975, 8, 53-63.

- [39] W.D. GREASON  
*Investigation of a test methodology for triboelectrification*  
Journal of Electrostatics, 2000, 49, 245-256
- [40] W.J. BRENNAN, J. LOWELL, M.C. O'NEILL, P.W. WILSON  
*Contact electrification: the charge penetration depth*  
J.Phys.D. (Appl. Phys.), 1969, 2, 1533-1537
- [41] D.K. DAVIES  
*Charge generation on dielectric surfaces*  
J.Phys.D. (Appl. Phys.), 1969, 2, 1533-1537
- [42] A.G. BAILEY  
*The charging of insulator surfaces*  
Journal of Electrostatics, 2001, 51-52, 82-90
- [43] B. BOITTIAUX  
*« Cours d'électronique – les composants semiconducteurs »*  
Lavoisier, 2<sup>e</sup> édition, 1995
- [44] J. LOWELL  
*Tunneling between metals and insulators and its role in contact electrification*  
J.Phys.D. (Appl. Phys.), 1979, 12, 1541-1554
- [45] J. LOWELL and W.S. TRUSCOTT  
*Triboelectrification of Identical Insulators: I. An Experimental Investigation*  
J.Phys.D. (Appl. Phys.), 1986, 19, 1273-1280.
- [46] J. LOWELL and W.S. TRUSCOTT  
*Triboelectrification of Identical Insulators: II. Theory and Further Experiments*  
J.Phys.D. (Appl. Phys.), 1986, 19, 1281-1298.
- [47] G.S.P. CASTLE  
*Contact Charging between Insulators*  
Journal of Electrostatics, 1997, 40-41, 13-20.
- [48] L.B. SCHEIN  
*Electrophotography and Development Physics*  
2<sup>nd</sup> Edition, Springer/Laplacian Press, Berlin, 1992/1996 (chapter 4)
- [49] N. WILSON  
*Charges on textile surfaces*  
Chapter 7 in *Polymer Surfaces* John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1978, 121-153.

- [50] P. MOLINIE, M. GOLDMAN, J. GATELLET  
*Surface potential decay on corona-charged epoxy samples due to polarization processes*  
J.Phys.D. (Appl. Phys.), 1995, 28, 1601-1610.
- [51] P. MOLINIE  
*Charge injection in corona-charged polymeric films: potential decay and current measurements*  
Journal of Electrostatics, 1999, 45, 265-273.
- [52] R. COELHO, L. LEVY, D. SARRAIL  
*Charge decay measurements and injection in insulators*  
J.Phys.D.(Appl. Phys.), 1989, 22, 1406-1409.
- [53] J.CHUBB  
*Measurement of tribo and corona charging features of materials for assessment of risks from static electricity*  
IEEE Transactions on Industry Applications, 36, 2000, 1515-1522
- [54] U. VON PIDOLL  
*Avoidance of the ignition of textile fiber/air mixtures during the electrostatic flocking process*  
IEEE Transactions on Industry Applications, 38, 2002, 401-405
- [55] P. HOLDSTOCK  
*The damaging effects of electrostatic discharges from textile surfaces*  
Journal of Electrostatics, 1997, 40-41, 529-534
- [56] J.L. GUSTIN  
*Risques d'explosion de gaz*  
SE 5 020, traité L'entreprise industrielle, Techniques de l'Ingénieur, 2002
- [57] J.L. GUSTIN  
*Risques d'explosion de poussières : caractérisation*  
SE 5 030, traité Informatique industrielle, Techniques de l'Ingénieur, 2004
- [58] U. VON PIDOLL, E. BRZOSTEK, H.R. FROECHTENIGT  
*Determining the incendivity of electrostatic discharges without explosive gas mixtures*  
Conference record of the 2002 IEEE Industry Application Conference 13<sup>th</sup> – 18<sup>th</sup>  
October 2002 (Pittsburgh, IEEE)

- [59] U. VON PIDOLL  
*Rapid determination of incendivity of discharges from FIBC surfaces without explosive atmosphere*  
Conference record of the 3<sup>rd</sup> World Flexible Intermediate Bulk Container 6<sup>th</sup> – 7<sup>th</sup> November 2002 (Antwerp, Millennium Conferences)
- [60] R. COELHO  
*Simple E.S. measurements on charged plates*  
SFE2002, 3<sup>ème</sup> congrès de la Société Française d'Electrostatique, Toulouse, juillet 2002.
- [61] F.MADY, R. RENOUD and J-P. GANACHAUD  
*Modeling of potential decay experiments. Influence of the microscopic charge transport processes on the macroscopic observable*  
SFE2002, 3<sup>ème</sup> congrès de la Société Française d'Electrostatique, Toulouse, juillet 2002.
- [62] F. MADY  
*Modélisation des phénomènes de transport et des effets de charge dans les matériaux isolants.*  
Thèse soutenue à l'université de Nantes, mai 2002

---

## ETUDE DE METHODES DE MESURE ET REALISATION D'UN BANC DE TEST POUR L'EVALUATION DES PROPRIETES ELECTROSTATIQUES DES TEXTILES

Les matériaux textiles ont une place importante dans un grand nombre de secteurs industriels. Ces industries sont souvent confrontées aux problèmes introduits par les phénomènes de charge et de décharge électrostatique des textiles. Leur caractérisation est dès lors indispensable et fortement tributaire des exigences normatives.

On propose ici une étude expérimentale des comportements électrostatiques de matériaux textiles dans le but de réaliser un banc de test pour évaluer ces phénomènes.

Une partie importante de ce travail est consacrée aux mécanismes de polarisation qui jouent un grand rôle dans les phénomènes de charge et de décharge. Cette approche expérimentale est étayée par une étude bibliographique conséquente mettant en évidence les mécanismes microscopiques mis en jeu.

Néanmoins, le moyen le plus répandu pour charger les textiles reste le frottement. La caractérisation de ce mécanisme de manière reproductible est donc nécessaire et constitue le second axe majeur de ce travail.

---

## STUDY OF MEASUREMENT METHODS AND ACHIEVEMENT OF A TESTING TOOL TO CHARACTERIZE ELECTROSTATIC FEATURES OF TEXTILE MATERIALS

Textile materials are strongly involved in many different industrial areas. Many troubles due to charging and discharging phenomena of textiles often appear in industrial contexts. Then, characterization of textile materials is essential and is strongly governed by international standards.

One proposes an experimental study of electrostatic behaviour of textile materials in order to realise testing tools to assess these phenomena.

Main part of this work deals with polarisation mechanisms, which play a great role in charging and discharging phenomena. This experimental approach is supported by amount of references where microscopic mechanisms involved are pointed out.

However, the most widespread way of charging textiles is still triboelectric charging. So the characterization of this mechanism in a reproducible way is essential and it represents the second main part of this work.

---

DISCIPLINE : Microondes et Microtechnologies

---

MOTS-CLES : électrostatique, polarisation, effet triboélectrique, charge électrique, décharge, normes, matériaux textiles, frottement, méthode de mesure, champ électrique dynamique.