TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE 5
1.1 Le PET et ses généralités 5
1.1.1 Les applications du PET 5
1.1.2 Propriétés électriques du PET 6
1.1.3 Propriétés thermiques du PET 8
1.1.4 Le recyclage du PET 9
1.2 Le matériau composite 11
1.3 Principes de décharges partielles et de rupture diélectrique, tests diélectriques sur les plastiques 13
1.3.1 Les décharges partielles 13
1.3.2 La rupture diélectrique 15
1.3.3 Les tests diélectriques sur les plastiques 17
1.4 Génération de la haute tension 19
1.4.1 Généralités sur le transformateur 19
1.4.2 Le transformateur monophasé 20
1.5 Synthèse de la revue de la littérature 22
1.6 Énoncé de la problématique de recherche 23

CHAPITRE 2 GÉNÉRATION DES IMPULSIONS À HAUTE TENSION 25
2.1 Méthodologie adoptée 25
2.1.1 Contexte général 25
2.1.2 Choix du transformateur à haute tension 28
2.2 Création des impulsions à haute tension 29
2.3 Synthèse sur la génération des hautes tensions 31

CHAPITRE 3 CONCEPTION ET PROGRAMMATION ÉLECTRONIQUE 33
3.1 Algorithme de la démarche suivie 33
3.2 Programmation de la Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI) 34
3.2.1 Généralité sur les MLI 34
3.2.2 Microcontrôleur Atmel ATmega644P et programme MLI 35
3.3 Conception électronique 37
3.3.1 Transistor IGBT 37
3.3.2 Protection des composants électroniques par optocouplage 39
3.3.3 Protection matériel du circuit primaire de la bobine d'allumage 42
3.3.4 Câblage de la bobine d'allumage : primaire et secondaire 44
3.4 Synthèse de la conception et de la programmation électronique 45

CHAPITRE 4 MONTAGE À ÉLECTRODES ET INTERFACE UTILISATEUR 47

4.1 La bougie d'allumage 47
4.2 Principe du montage à électrodes 48
4.2.1 Morphologie de la pièce à tester 48
4.2.2 Morphologie des électrodes cylindre-cylindre..... 49
4.2.3 Morphologie des électrodes couteau-cylindre 49
4.2.4 Intégration des électrodes dans le circuit électrique du banc d'essai..... 52
4.3 L'interface utilisateur.....52
4.3.1 Algorithme de programmation de l'interface utilisateur 53
4.3.2 La carte d'acquisition USB 6009 54
4.3.3 Visuel de l'interface utilisateur..... 55
4.4 Détection électronique du claquage diélectrique 56
4.4.1 Le bruit électrique 56
4.4.2 Filtre passe-bas analogique 57
4.5 Synthèse du montage à électrodes et de l'interface utilisateur 63

CHAPITRE 5 RÉSULTATS DES TESTS DE CLAQUAGE DIÉLECTRIQUE 65
5.1 Configurations matérielles préliminaires.....65
5.1.1 Montage avec la structure pointe-plan à réglage millimétrique..... 65
5.1.2 Montage avec la bougie d'allumage et une distance inter-électrodes standard 69
5.2 Configuration matérielle finale 69
5.3 Résultats des tests et analyses 71
5.3.1 Les matériaux candidats..... 71
5.3.2 Observations au microscope optique 72
5.3.3 Observation au microscope laser 76
5.4 Synthèse des résultats des tests de claquage diélectrique 79

CONCLUSION.....81

RECOMMANDATIONS 85

ANNEXE I PROGRAMME DE LA MLI.....87

ANNEXE II SCHÉMA ÉLECTRIQUE DU BANC D'ESSAI 89

ANNEXE III PROGRAMME DE L'INTERFACE UTILISATEUR.....91

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....93

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Propriétés électriques principales des PET.....8

Tableau 1.2 Exigences minimales permettant aux flocons de POSTC-PET de subir un nouveau traitement 10

Tableau 3.1 Caractéristiques de commutation du LDA110 à 25°C 41

Tableau 5.1 Description sommaire des matériaux candidats 71

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Synthèse du polyéthylène téréphtalate par polycondensation 5

Figure 1.2 Boîtier de distributeur utilisé dans l'industrie automobile 6

Figure 1.3 Propriétés diélectriques d'un film en PET.....7

Figure 1.4 Diagramme thermique du polyéthylène téréphtalate.....9

Figure 1.5 Configuration moléculaire schématique d'un thermodurcissable 12

Figure 1.6 Configuration moléculaire schématique d'un thermoplastique.....12

Figure 1.7 Systèmes d'électrodes couramment utilisés pour la production de décharges couronnes.....14

Figure 1.8 Rupture diélectrique dans un échantillon de PET en géométrie plan-plan 15

Figure 1.9 Montage à électrodes à géométrie plan-plan 18

Figure 1.10 Montage à électrodes à géométrie pointe-plan 18

Figure 1.11 L'induction électromagnétique dans le transformateur 19

Figure 1.12 Représentation schématique en coupe du circuit magnétique d'un transformateur monophasé 20

Figure 1.13 Schéma équivalent usuel du transformateur monophasé.....21

Figure 2.1 Positionnement des bougies d'allumage dans une automobile 26

Figure 2.2 Schéma électrique simplifié du circuit d'allumage d'une automobile 27

Figure 2.3 Bobine d'allumage utilisée sur les modèles Dodge Spirit 95.....28

Figure 2.4 Schéma électrique au primaire et au secondaire de la bobine d'allumage ..30

Figure 3.1 Processus de conception et de programmation électronique du banc d'essai 33

Figure 3.2 Allure d'une MLI dont le rapport cyclique est de 60% 34

Figure 3.3 Diagramme bloc du Timer/Counter 8-bit 35

Figure 3.4 Le mode Fast PWM utilisant le Timer/Counter 8-bit sur OC0A 36

Figure 3.5 Schéma de principe pour l'amplification du signal MLI sur la base du transistor IGBT 38

Figure 3.6 Optocoupleur LDA110 40

Figure 3.7 Schéma électrique de principe d'utilisation des optocoupleurs....40

Figure 3.8 Schéma d'utilisation de la résistance r de protection par court-circuitage 43

Figure 3.9 Schéma de principe au primaire 44

Figure 4.1 Bougie d'allumage NGK GR4 47

Figure 4.2 Modélisation de l'échantillon à tester....48

Figure 4.3 Système à électrodes en configuration cylindre-cylindre....49

Figure 4.4 Système à électrodes en configuration couteau-cylindre 50

Figure 4.5 Modélisation des électrodes utilisées sur notre banc d'essai....50

Figure 4.6 Modélisation de l'échantillon et des électrodes désassemblés 51

Figure 4.7 Modélisation de l'échantillon et des électrodes assemblés 51

Figure 4.8 Vue en coupe latérale de l'échantillon et des électrodes 51

Figure 4.9 Vue en coupe verticale de l'échantillon et des électrodes 51

Figure 4.10 Câblage des électrodes couteau-cylindre....52

Figure 4.11 Algorithme de l'interface utilisateur 53

Figure 4.12 Carte d'acquisition USB 6009 de NI....54

Figure 4.13 Interface utilisateur du banc d'essai 55

Figure 4.14 Système à électrodes pointe-plan 57

Figure 4.15 Filtre passe-bas passif analogique d'ordre 1 avec circuit RC.....58

Figure 4.16 Schéma électrique du circuit secondaire de la bobine d'allumage avec mise en évidence du filtre passe-bas analogique du 1er ordre 59

Figure 4.17 Signal de sortie sans filtre passe-bas et sans claquage du plastique.....60

Figure 4.18 Signal de sortie sans filtre passe-bas et avec claquage du plastique 61

Figure 4.19 Signal de sortie avec filtre passe-bas et sans claquage du plastique 61

Figure 4.20 Signal de sortie avec filtre passe-bas et avec claquage du plastique.....62

Figure 5.1 Montage, à électrodes pointe-plan, utilisé pour les premiers essais.....66

Figure 5.2 Mise en évidence des décharges couronnes lors des tests.....67

Figure 5.3 Chemin emprunté par le courant pour la formation d'arcs électriques lors des tests à tension maximale.....68

Figure 5.4 Synopsis du montage du circuit secondaire de la bobine d'allumage de notre banc d'essai 70

Figure 5.5 VNT 340SK observé avec un grossissement x20.....72

Figure 5.6 VNT 340SK observé avec un grossissement x45.....73

Figure 5.7 VNT 340HD observé avec un grossissement x20.....73

Figure 5.8 VNT 340HD observé avec un grossissement x45.....74

Figure 5.9 VNT 840 observé avec un grossissement x20.....74

Figure 5.10 VNT 840 observé avec un grossissement x45.....75

Figure 5.11 Observation en trois dimensions du VNT 340SK 76

Figure 5.12 Observation en trois dimensions du VNT 340HD.....77

Figure 5.13 Observation en trois dimensions du VNT 840 78

Rapport-Gratuit.com

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AC	Courant Alternatif
Ampli-op	Amplificateur opérationnel
C	Collecteur du transistor
CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
E	Émetteur du transistor
ÉTS	École de Technologie Supérieure
G	Grille du transistor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NI	National Instruments
PET	Polyéthylène téréphtalate
POSTC-PET	Post-consumer polyethylene terephthalate
USB	Universal Serial Bus
UTBM	Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

C	Capacité du condensateur [F]
f_c	Fréquence de coupure du filtre passe-bas [Hz]
$f_{clk_I/O}$	Fréquence interne de l'horloge du microcontrôleur [Hz]
$f_{OCnxPWM}$	Fréquence de la MLI [Hz]
i	Courant [A]
I_c	Courant circulant dans le collecteur du transistor [A]
L	Inductance de la bobine [H]
n_1	Nombre de spires de la bobine au circuit primaire [∅]
n_2	Nombre de spires de la bobine au circuit secondaire [∅]
N	Nombre du prescaler [∅]
r	Résistance de protection par court-circuitage [Ω]
R	Résistance [Ω]
t	Temps [s]
t_{off}	Temps de descente de l'optocoupleur [s]
t_{on}	Temps de montée de l'optocoupleur [s]
T	Période du signal [s]
Tf	Température de fusion [K]
Tg	Température de transition vitreuse [K]
τ	Constante de temps liée au circuit RC [s]
U_L	Tension aux bornes de la bobine [V]

U_1	Tension au circuit primaire de la bobine [V]
U_{20}	Tension au circuit secondaire de la bobine [V]
V_{GE}	Tension entre les bornes G/E du transistor [V]
V_{in}	Tension du signal d'entrée du filtre passe-bas [V]
V_{out}	Tension du signal de sortie du filtre passe-bas [V]

INTRODUCTION

Le polyéthylène téréphtalate (PET) est un polymère très largement employé dans la composition de matériaux composites. Ces matériaux sont alors fortement utilisés dans des applications électriques à haute tension puisque leur capacité isolante et leur structure les rendent idéales pour cela.

Dans cette optique, le Groupe Lavergne travaille avec du PET et le commercialise. La particularité du PET que cette société commercialise est qu'il provient de sources recyclées. En effet, soucieux de l'environnement et des problèmes actuels qui l'entourent, le Groupe Lavergne s'est tourné vers cette solution puisque le PET conserve de bonnes propriétés thermique et électrique même après le processus de recyclage. Aussi, le coût du PET neuf restant relativement stable, le recyclage constitue un atout très avantageux face aux dépenses liées à l'achat de ce dernier.

L'application faite avec le PET recyclé dans notre cas est destinée à l'ingénierie électrique. Plus précisément, ce PET est employé dans la fabrication des systèmes des boîtiers de distributeurs destinés à l'industrie automobile. Ces systèmes sont alors soumis à de fortes contraintes, tant au niveau thermique qu'au niveau électrique. Les clients du Groupe Lavergne ont d'ailleurs fait part à la société de certains dysfonctionnements liés aux résistances des matériaux composites à base de PET recyclé quant à ces dites contraintes. En effet, des problèmes de rupture diélectrique des plastiques ont été constatés après un certain temps d'utilisation de ces derniers. Ce phénomène avait pour conséquence d'empêcher la formation normale des arcs électriques aux bornes des électrodes des bougies d'allumage dans les moteurs automobiles, induisant ainsi un dysfonctionnement dans le processus de combustion des carburants utilisés.

En considérant cela, le Groupe Lavergne nous a sollicités afin de mettre en œuvre un banc d'essai permettant la caractérisation des effets diélectriques des matériaux composites à base

de PET recyclé qu'ils utilisent. En effet, afin de pouvoir caractériser les effets des contraintes électriques sur le matériau selon sa composition, nous souhaitons concevoir un banc d'essai capable de reproduire ces contraintes tout en les intensifiant. À partir de cela, nous souhaitons pouvoir comparer la résistance du matériau selon sa composition et ainsi déterminer laquelle serait la plus adéquate afin d'être utilisée dans la fabrication des boîtiers de distributeurs.

Ce mémoire propose donc la démarche ayant mené à la conception du banc d'essai. Il a aussi pour but de présenter les résultats obtenus face aux tests réalisés. Les travaux de recherche ont été réalisés au sein des laboratoires de l'ÉTS et s'inscrivent dans le cadre du projet financé par le CRSNG.

Cet écrit est donc articulé autour de cinq grands chapitres permettant de détailler, étape par étape, la démarche de travail adoptée et les résultats obtenus.

Dans un premier chapitre, nous effectuons une revue de la littérature permettant de présenter les caractéristiques du PET. Un rappel sur les matériaux composites est également effectué et le lien entre ces derniers et le PET est alors avancé. Nous y détaillons ensuite les différents phénomènes liés à la haute tension et qui peuvent contraindre ce type de matériau. On présente alors les phénomènes de décharges couronnes et de rupture diélectrique. Ensuite, nous expliquons la façon dont nous pouvons générer de la haute tension et faisons ainsi le lien avec les méthodes déjà connues. Finalement, après avoir abordé ces différents thèmes, nous établissons la problématique articulant nos travaux de recherche.

Le second chapitre est, quant à lui, destiné à présenter la méthode que nous avons choisie afin de générer nos impulsions à haute tension. Nous y expliquons aussi pourquoi il a été décidé de créer un générateur d'impulsions et non un générateur de tension continue. Nous ne rentrons cependant pas dans les détails de la conception de ce dernier, mais présentons le transformateur que nous avons intégré à notre banc d'essai.

Le troisième chapitre détaille tout le travail de conception et de programmation électronique réalisé sur notre banc d'essai. La conception du générateur d'impulsions à haute tension y est complètement décrite et le choix au niveau des composants électroniques utilisés lors de la conception électronique est proposé.

Le quatrième chapitre présente le montage à électrodes mis en place au niveau du circuit secondaire du transformateur permettant de réaliser les tests sur les échantillons en plastique. Il décrit aussi la morphologie des échantillons à tester et, par conséquent, la morphologie des électrodes conçues pour les tester. La description de l'interface utilisateur, que nous avons développée afin de commander notre banc d'essai, fait, aussi, partie de ce chapitre. Enfin, nous discutons des premiers problèmes rencontrés, de façon sommaire, lors de la mise en place du montage à électrodes.

Enfin, le cinquième chapitre nous permet de présenter les résultats obtenus à l'aide de notre banc d'essai. Nous présentons également l'analyse faite de ces résultats. Mais avant cela, nous décrivons les différents montages préliminaires ayant mené notre montage final. Nous expliquons alors les raisons pour lesquelles ces derniers n'ont pas permis de répondre aux exigences requises.

Dans une conclusion générale, nous revenons sur l'ensemble de nos travaux de recherche et constatons les résultats finals obtenus. Aussi, à la suite de cette conclusion, des recommandations sont émises afin d'entrevoir un point de départ à des travaux futurs qui pourraient être menés sur le sujet.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Le PET et ses généralités

Le polyéthylène téréphtalate (PET) est un polymère de type polyester saturé. Il est obtenu par la polycondensation de l'acide téréphtalique avec l'éthylène glycol. Lors de cette réaction chimique, deux molécules d'eau sont libérées. La Figure 1.1 ci-dessous nous permet de visualiser la synthèse du PET par polycondensation.

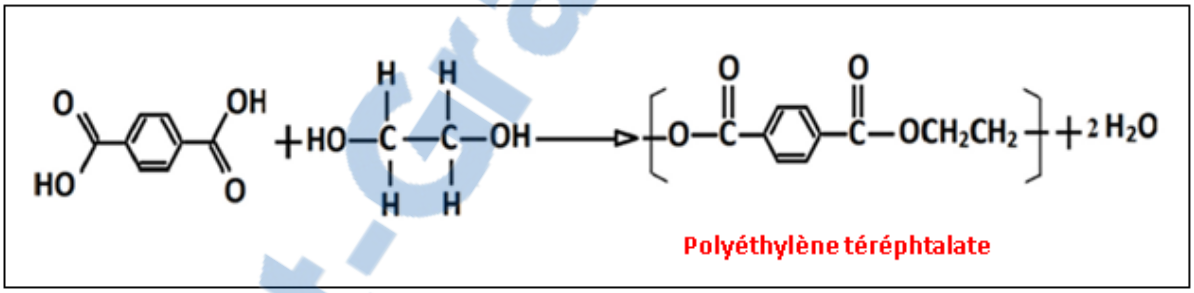

Figure 1.1 Synthèse du polyéthylène téréphtalate par polycondensation

1.1.1 Les applications du PET

Les applications courantes que l'on peut faire du PET sont multiples et très diversifiées. En effet, cela va de la bouteille recyclable aux cartes de crédit communément utilisées par le grand public en passant par les emballages résistants à la chaleur du four. Les applications citées précédemment ne représentent là que des exemples et ne constituent en rien une liste exhaustive des nombreuses possibilités d'utilisation du PET. De façon générale, le PET offre de bonnes opportunités et perspectives d'utilisation puisqu'il est recyclable et qu'il est capable de résister à la chaleur.

Rapport-Gratuit.com

C'est d'ailleurs dans cette perspective que le Groupe Lavergne, compagnie implantée en Amérique du Nord et en Asie, commercialise du plastique constitué de PET recyclé afin de proposer un produit respectueux de l'environnement et résistant à la chaleur. L'application menant à notre intérêt ici est donc le boîtier du distributeur utilisé dans l'industrie automobile et fabriqué à partir du plastique que commercialise le Groupe Lavergne. La Figure 1.2 illustre un boîtier de distributeur utilisé dans le circuit d'allumage d'une automobile; il faut cependant préciser que cette illustration ne représente pas le produit fabriqué à partir des produits qu'offre le Groupe Lavergne, elle permet simplement de donner une représentation générale du produit en question.

Figure 1.2 Boîtier de distributeur utilisé dans l'industrie automobile

1.1.2 Propriétés électriques du PET

Le PET est un matériau très intéressant d'un point de vue électrique puisqu'il possède de très bonnes capacités d'isolation. De plus, à épaisseur constante, leurs performances restent relativement stables d'une fabrication à l'autre. En revanche, certains facteurs externes viennent jouer un rôle important sur ces propriétés. En effet, la permittivité relative diminue avec la fréquence et la rigidité diminue lorsque l'épaisseur du PET diminue aussi; on peut observer ces phénomènes sur la Figure 1.3 illustrée ci-dessous. D'une manière générale, les

propriétés électriques et, en particulier, la résistivité superficielle diminuent lorsque l'humidité relative de l'air augmente (Füzesséry, 1997).

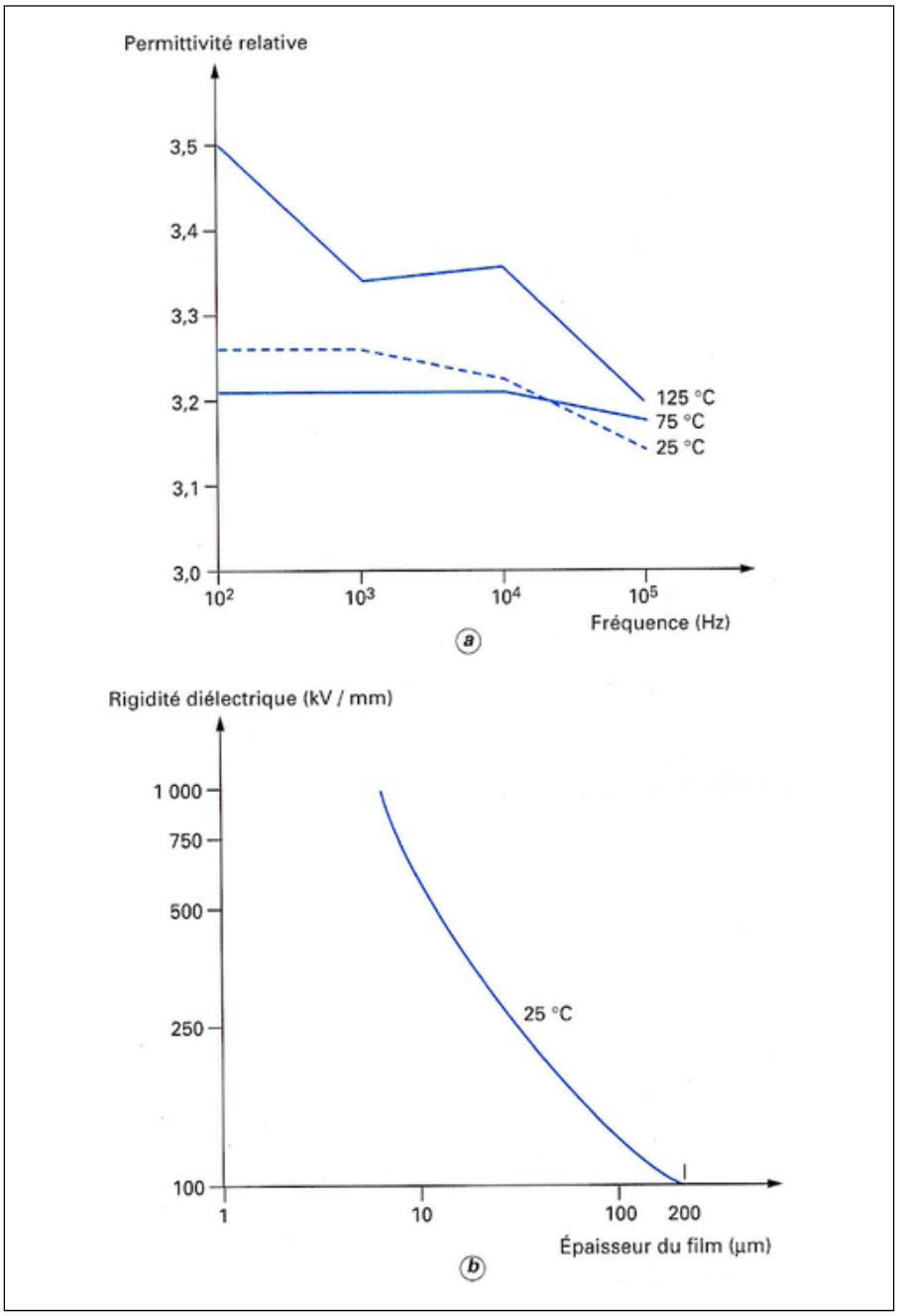

Figure 1.3 Propriétés diélectriques d'un film en PET
Tirée de Füzesséry (1997)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Le Tableau 1.1 ci-dessous nous donne un récapitulatif des propriétés électriques principales du PET. Il sera intéressant de noter que les normes citées dans le Tableau 1.1 sont celles données par Philips (1985).

Tableau 1.1 Propriétés électriques principales des PET
Adapté de Füzesséry (1997)

Propriétés à 23 °C et 50 % d'humidité relative	Norme	Unité	Fréquence (en Hz)			Épaisseur du film (en µm)		
			50	10^3	10^6	10	25	100
Permittivité relative	NF C 26-230		3,3	3,2	2,9			
Facteur de dissipaition diélectrique	NF C 26-230		0,002 0	0,005 2	0,021			
Rigidité diélectrique à 50 Hz	NF C 26-226	$kV \cdot mm^{-1}$				570	300	150
Résistivité transversale	NF C 26-215	$\Omega \cdot cm$	10^{18}					
Résistivité superficielle	NF C 26-215	Ω	10^{14}					

1.1.3 Propriétés thermiques du PET

Précédemment, on expliquait que le PET était capable de résister à la chaleur, ce qui rendait son utilisation intéressante. En effet, comme nous l'explique Bordival (2009, p.7), le PET est un thermoplastique dont la structure peut être amorphe ou bien semi-cristalline. Il possède une température de transition vitreuse Tg d'environ 80°C et une température de fusion Tf d'environ 250°C. Entre ces deux températures, le PET est capable de se cristalliser thermiquement, soit depuis son état fondu par refroidissement, soit depuis son état vitreux par chauffage. La cristallisation est très fortement affectée par ces vitesses de chauffage/refroidissement. Sur la Figure 1.4, on peut observer le diagramme thermique du PET mettant en évidence ces différents états et les températures associées.

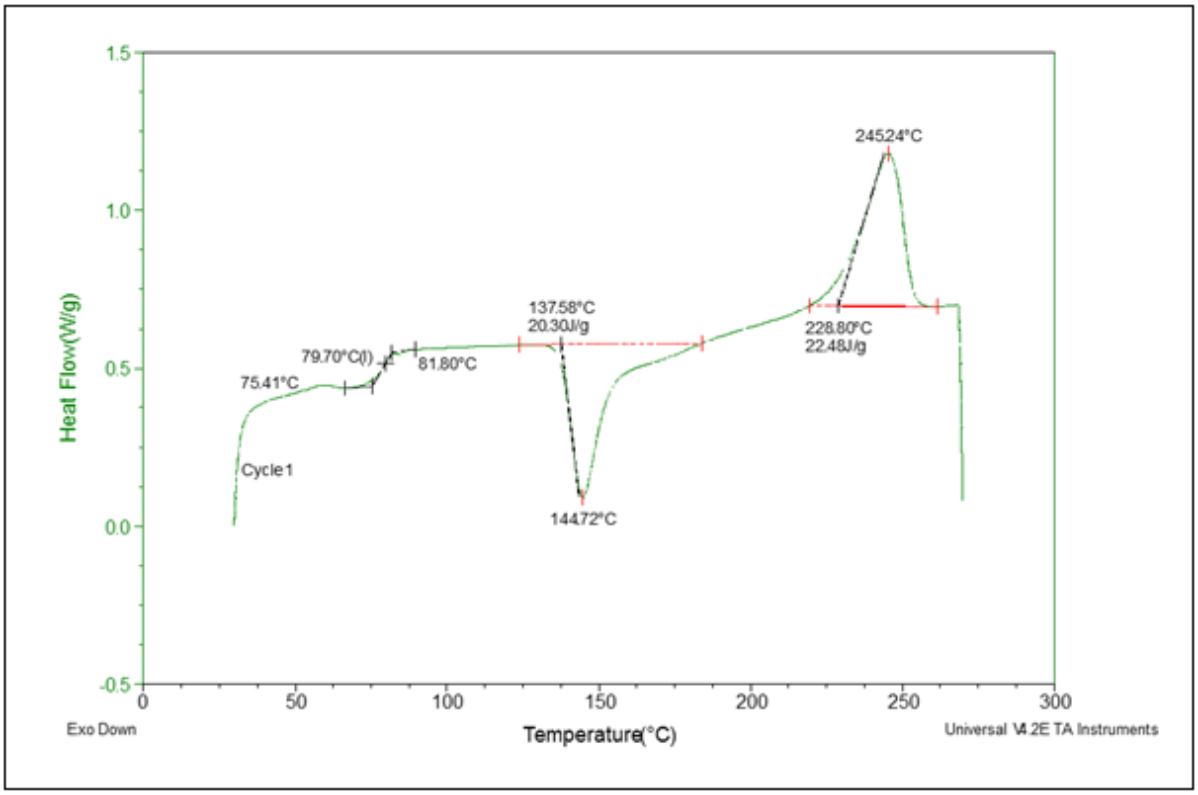

Figure 1.4 Diagramme thermique du polyéthylène téréphtalate
Tirée de Collins (p. 7)

1.1.4 Le recyclage du PET

L'autre point intéressant dans le fait d'utiliser le PET et mis en avant par le Groupe Lavergne est que ce dernier se recycle.

Au départ, le recyclage du PET a été initié par la pression exercée pour la gestion des déchets environnementaux. L'autre aspect intéressant ayant conduit à son recyclage est que les produits en PET ont un faible taux de décomposition naturelle. Aussi, le PET est une matière plastique non dégradable dans des conditions normales du fait qu'il n'y ait pas d'organisme connu à ce jour capable de consommer ses molécules relativement grandes. Ainsi, des procédures compliquées et coûteuses doivent être employées afin de pouvoir dégrader le PET

biologiquement. Le recyclage du PET reste donc le meilleur moyen de réduire la quantité de déchets de ce dernier. De plus, le prix du PET vierge restant stable, l'intérêt se porte vers de nouvelles technologies de recyclage moins chères qui permettent de fournir un PET recyclé moins onéreux (Awaja, 2005).

Dans son article, Awaja (2005, p. 1458) nous explique aussi que pour effectuer le recyclage du PET avec succès, il faut que les flocons de PET respectent certaines exigences minimales. Des exemples de ces exigences minimales sont donnés pour les flocons de POSTC-PET et sont résumés dans le Tableau 1.2 présenté ci-dessous. Le principal facteur affectant l'aptitude des flocons de POSTC-PET pour le recyclage est le niveau et la nature des contaminants présents dans ces flocons.

Tableau 1.2 Exigences minimales permettant aux flocons
de POSTC-PET de subir un nouveau traitement
Tiré d'Awaja (2005, p. 1458)

Property	Value
$[\eta]$	>0.7 dl g^{-1}
T_m	>240 °C
Water content	<0.02 wt.%
Flake size	0.4 mm < D < 8 mm
Dye content	<10 ppm
Yellowing index	<20
Metal content	<3 ppm
PVC content	<50 ppm
Polyolefin content	<10 ppm

Dans une autre recherche menée par Torres *et al.* (2000), une étude sur les propriétés thermiques et mécaniques du PET vierge et recyclé a été effectuée. Ainsi, les résultats de cette recherche nous dévoilent que le processus de recyclage du PET n'a aucun effet sur la température de transition vitreuse ni sur la température de fusion du polymère. En revanche, au niveau des propriétés mécaniques, cette fois, l'étude montre que l'allongement à la rupture

et la résistance aux chocs ont tous deux décru. Mebarki (2012, p. 13), dans son mémoire, nous explique alors que pour renforcer la matrice polymérique du PET, des matériaux inorganiques constitués de minéraux comme les céramiques et les métaux peuvent être employés. Dans le cas de l'ingénierie électrique, il est alors usuel d'employer la fibre de verre et le mica comme moyen de renfort.

1.2 Le matériau composite

Le boîtier de distributeur sur lequel nous souhaitons travailler est fabriqué à l'aide d'un matériau composite à base de PET. Précédemment, nous expliquions ce qu'était le PET et les différentes généralités, les différentes applications, l'entourant.

Le matériau composite est donc un assemblage d'au moins deux composants non miscibles, c'est-à-dire deux composants qui ne vont pas se mélanger de façon homogène. Cependant, si ces deux composants ne se mélangent pas de façon homogène, ils auront quand même une forte capacité d'adhésion et, ainsi formé, le matériau composite possède des propriétés que les composants seuls ne possèdent pas. C'est donc là où se trouve tout l'intérêt de créer un tel matériau puisqu'on va alors venir améliorer la qualité de la matière face à une certaine utilisation (rigidité, isolation électrique, etc.).

Le matériau composite se compose d'une matrice, de renforts et d'additifs. La matrice est le liant servant à transférer les efforts au renfort étant plus rigide et résistant; elle doit aussi être capable de protéger les renforts et permet, en outre, de donner la forme voulue au produit réalisé. Dans le cas du matériau composite à base de PET, on s'intéresse à la matrice polymérique. Cette matrice, qui est une matrice organique, peut être thermodurcissable ou bien thermoplastique. Dans le cas d'une résine thermodurcissable, la transformation du matériau est irréversible et conduit au produit fini solide et généralement rigide. À l'inverse de ce type de transformation, une transformation thermoplastique va permettre à la matière de se ramollir lorsqu'elle est chauffée au-dessus d'une certaine température, mais

redeviendra dure ensuite par refroidissement. Leurs propriétés mécaniques sont donc bien plus faibles que celles des résines thermodurcissables puisque leur déformation plastique est réversible (Mebarki, 2012).

Sur les figures ci-dessous, on peut observer les configurations moléculaires schématiques d'un thermodurcissable (Figure 1.5) et d'un thermoplastique (Figure 1.6). On observe en noir sur la Figure 1.5 les liaisons dites « solides » conférant le caractère définitif au thermodurcissable de sa transformation.

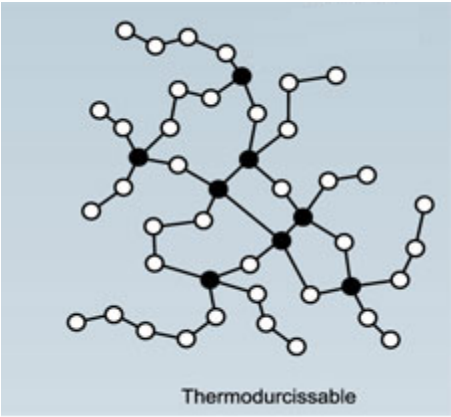

Figure 1.5 Configuration moléculaire schématique d'un thermodurcissable
Adaptée de Paroli *et al.* (1999)

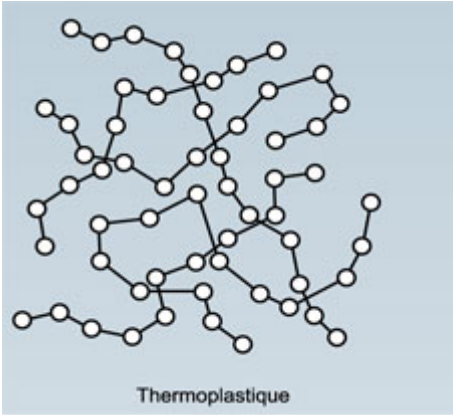

Figure 1.6 Configuration moléculaire schématique d'un thermoplastique
Adaptée de Paroli *et al.* (1999)

Les renforts, quant à eux, sont présents afin de permettre la résistance mécanique aux efforts. Comme nous l'avons précisé précédemment, ils sont plus rigides et plus solides que la matrice. Cela peut être de la fibre de verre, du carbone ou de la fibre d'aramide (Mebarki, 2012).

Enfin, les additifs vont être une substance chimique souvent liquide ou encore en poudre qui sera introduite dans la résine afin d'en améliorer une propriété spécifique. Quelques fois, ils seront simplement introduits afin de modifier l'aspect physique du matériau composite (Mebarki, 2012).

1.3 Principes de décharges partielles et de rupture diélectrique, tests diélectriques sur les plastiques

Lorsqu'un matériau isolant est utilisé dans des applications électriques à haute tension, ce dernier est soumis à de fortes contraintes électriques et environnementales. Parmi ces contraintes donc, nous retrouvons les phénomènes dits de décharges partielles et de rupture diélectrique. Dans le premier cas, les décharges partielles mènent à une dégradation progressive et pouvant être lente du matériau isolant. En revanche, la rupture diélectrique est un phénomène menant à une dégradation pouvant être très rapide de l'isolant.

1.3.1 Les décharges partielles

Les décharges partielles sont des phénomènes de faibles amplitudes, mais peuvent cependant mener à la détérioration progressive du matériau isolant comme nous le précise Mekarbi dans son mémoire (2012, p. 15).

On distingue quatre types différents de décharges partielles :

- les décharges internes;
- les décharges de surface;
- l'arborescence;
- les décharges couronnes.

Dans notre étude, nous nous intéressons uniquement aux décharges couronnes. Comme nous l'explique Vincent (2002, p. 40) dans sa thèse, les décharges couronnes sont des décharges électriques pré-disruptives[1]. Elles se développent dans l'intervalle gazeux entre deux électrodes fortement asymétriques lorsque cet intervalle inter-électrodes n'est pas

---

[1] La décharge électrique est dite disruptive lorsqu'elle éclate avec une étincelle; les décharges couronnes sont donc des décharges électriques se produisant avant celles éclatant avec étincelles.

complètement court-circuité par l'arc électrique[2]. Il existe plusieurs configurations de systèmes d'électrodes utilisés afin d'observer des décharges couronnes, mais les plus communément utilisés sont les systèmes pointe-plan, multipointe-plan, couteau-cylindre, fil-cylindre et cylindre-cylindre comme l'illustre la Figure 1.7 ci-dessous. La distance inter-électrodes est habituellement inférieure à un centimètre.

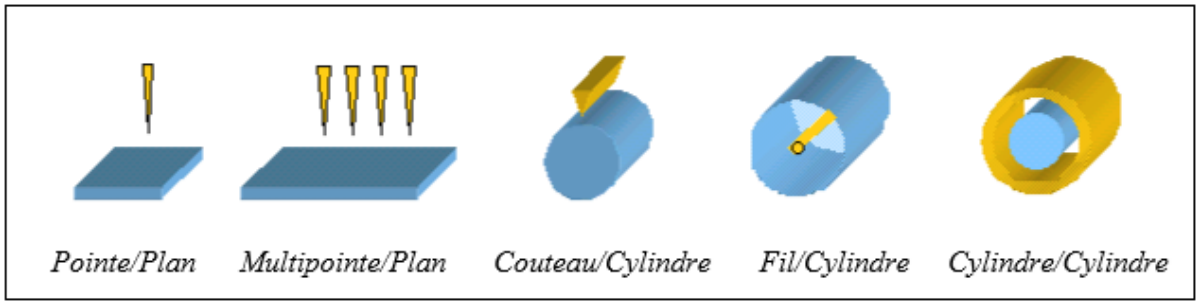

Figure 1.7 Systèmes d'électrodes couramment utilisés
pour la production de décharges couronnes
Tirée de Vincent (2002, p. 40)

La dissymétrie entre les deux électrodes va produire un champ électrique hétérogène entre ces dernières. Les charges électriques s'accumulent au voisinage de la pointe dans le cas d'électrodes de ce type ou bien en surface pour les électrodes cylindriques. C'est ici que prennent naissance les décharges couronnes puisque c'est là que le champ électrique y est le plus intense. Ce phénomène donne alors lieu à une ionisation du gaz et l'on observe un effet bleuté autour des électrodes. Lorsque le test se passe à l'air libre c'est les gaz présents dans l'air qui sont ionisés.

---

[2] Il existe bon nombre de définitions données à l'arc électrique par les scientifiques au cours du XXe siècle. Nous avons choisi celle proposée par K.T. Compton qui nous dit qu'un « arc est une décharge électrique entre électrodes, dans un gaz ou une vapeur, qui a une chute de tension cathodique de l'ordre du potentiel d'ionisation minimal, ou du potentiel d'excitation minimal du gaz ou de la vapeur » (Vacquié, 2002).

1.3.2 La rupture diélectrique

On parle de rupture diélectrique ou bien encore de claquage lorsque le champ électrique présent dans un isolant est plus important que ce que ne peut tolérer ce dernier. Il se forme alors un arc électrique qui, cette fois-ci, court-circuite les électrodes menant, généralement, à un déclenchement de la protection de la source. La tension à laquelle se produit ce phénomène est appelée tension de claquage. La Figure 1.8 ci-dessous nous présente une illustration d'une rupture diélectrique dans un échantillon de PET en géométrie plan-plan. Une géométrie plan-plan signifie que les deux électrodes métalliques, entre lesquelles la haute tension ayant permis la formation de l'arc électrique, sont toutes deux de surface plane.

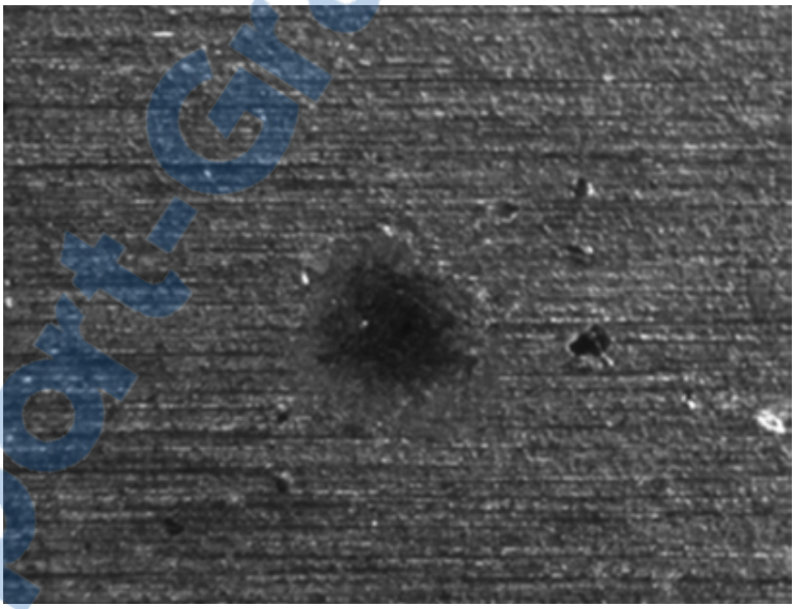

Figure 1.8 Rupture diélectrique dans un échantillon
de PET en géométrie plan-plan
Tirée de Mekarbi (2012, p. 21)

Les études, ayant été effectuées par Dissado *et al.* (1992, p. 62) sur le claquage et la détérioration électrique des polymères, nous disent que le mécanisme de claquage électrique peut être classé en trois catégories :

Rapport-Gratuit.com

- les modèles à détérioration de bas niveau dans lesquels les caractéristiques de l'isolant sont affectées par le champ électrique avec une possibilité de contribution d'autres facteurs;
- les modèles déterministes dans lesquels le phénomène de rupture diélectrique ultime est directement lié à une cause antérieure ou une condition produite par un dépassement d'un champ électrique critique;
- les modèles stochastiques dans lesquels des variations du champ électrique causées par des inhomogénéités sont telles, qu'il y a une forte probabilité qu'à tout moment, la rupture diélectrique se produise.

Toujours d'après Dissado *et al.* (1992, p. 63-65), on apprend que les modèles déterministes détaillés précédemment sont alors classés en quatre catégories selon le procédé menant à la rupture :

- la rupture électrique qui constitue le cas le plus simple puisqu'elle est uniquement liée à l'effet du champ électrique qui fait entrer en collision les électrons de la bande de conduction avec les particules de l'isolant; ce qui produit ainsi la rupture électrique;
- la rupture thermique se produit lorsque la chaleur créée par l'effet joule lors du passage du courant dans le matériau isolant est supérieure à sa capacité à évacuer cette dite chaleur; la température du matériau augmente alors et vient modifier les propriétés liées à sa conductivité en augmentant cette dernière jusqu'à donner lieu à la rupture thermique par emballement électrique (Mekarbi, 2012);
- la rupture électromécanique est l'œuvre conjointe de phénomènes électriques et mécaniques; ainsi, sous l'effet d'un champ électrique intense, l'épaisseur de l'isolant va tendre à diminuer sous l'effet de l'attraction électrostatique des électrodes jusqu'à mener à la rupture électromécanique de l'isolant sous le renforcement du champ électrique;
- la rupture par décharge partielle consiste à ce que des décharges partielles apparaissent dans les isolants solides lorsque le champ électrique dépasse la valeur d'amorçage de la décharge; ce phénomène va créer des cavités dans l'isolant et mener progressivement à sa détérioration totale.

1.3.3 Les tests diélectriques sur les plastiques

Après avoir mis en évidence les différents phénomènes diélectriques pouvant survenir lors de l'utilisation de matériaux plastiques dans des applications à haute tension, il est maintenant intéressant de présenter quelques tests les mettant en évidence. Les tests les plus courants effectués dans le domaine sont bien entendu les tests avec électrodes. Ces tests sont mis en place à partir de montages peu complexes se décrivant comme suit :

- deux électrodes métalliques sont reliées chacune à un potentiel d'un générateur de tension;
- entre les électrodes se trouve la pièce qu'on souhaite venir tester; cela peut aussi être un gaz selon l'application qu'on désire réaliser;
- on applique une tension aux bornes des électrodes, cette tension étant une haute tension dans ce genre d'application puisque la rupture diélectrique est recherchée.

La géométrie et le type de métal utilisés pour les électrodes peuvent différer d'une application à l'autre. Aussi, dans une même application, la géométrie des électrodes peut être différente selon la géométrie de la pièce sur laquelle on effectue le test de claquage. De plus, la haute tension appliquée aux bornes des électrodes peut être continue ou alternative, cela va dépendre de la façon dont on souhaite tester notre pièce.

Sur les figures ci-dessous, nous pouvons observer deux montages à électrodes dans lesquels une géométrie différente de ces dernières est à chaque fois proposée.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

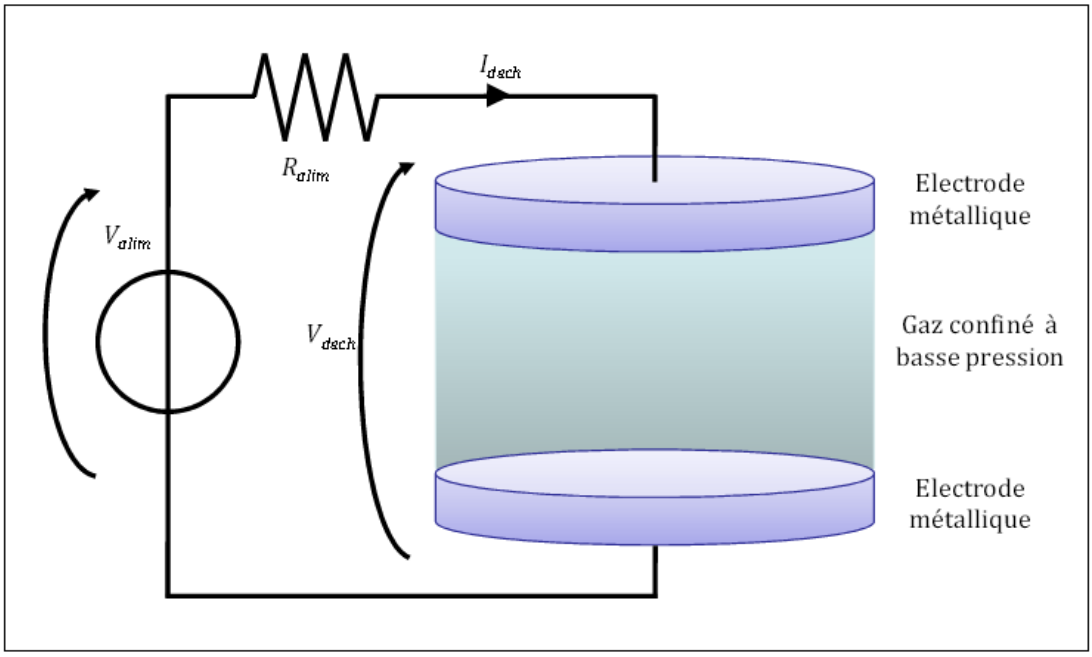

Figure 1.9 Montage à électrodes à géométrie plan-plan
Tirée de Diez Medina (2008, p. 7)

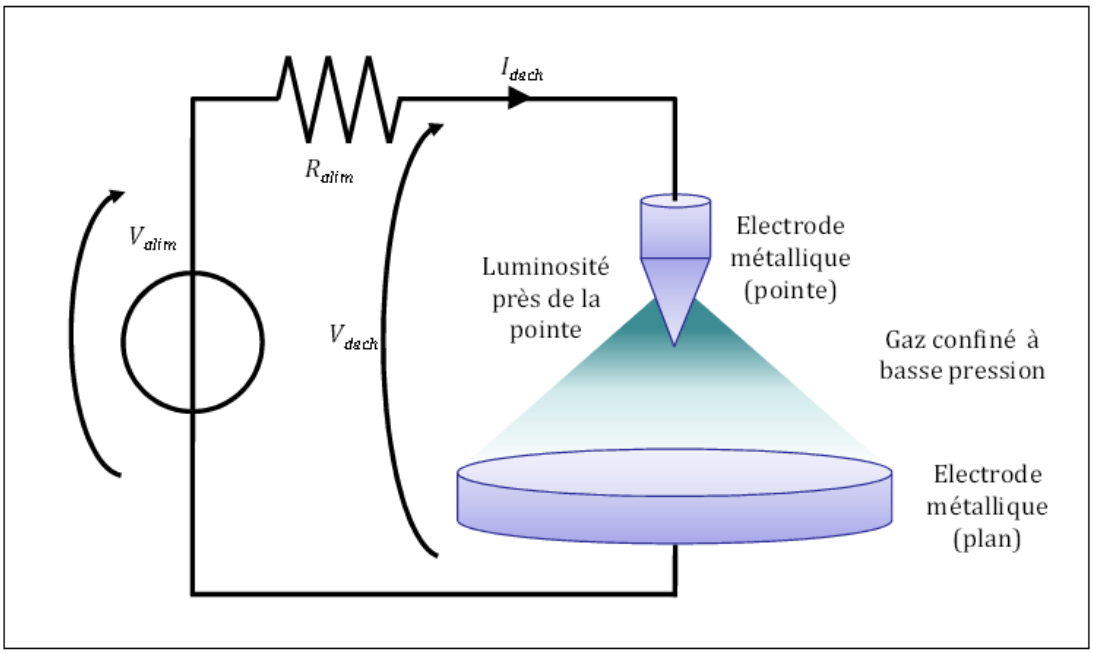

Figure 1.10 Montage à électrodes à géométrie pointe-plan
Tirée de Diez Medina (2008, p. 9)

Diez Medina (2008), dans sa thèse, s'intéressait plus au gaz présent entre les électrodes et pouvait ainsi avoir une marge de manœuvre plus importante quant à la géométrie employée pour ses électrodes selon l'effet recherché pour ses tests. Dans notre cas, nous verrons dans les chapitres suivants que ce choix est restreint puisque nous souhaitons effectuer les tests sur pièce possédant une géométrie particulière.

1.4 Génération de la haute tension

En électricité, le moyen commun permettant de générer de la haute tension est de débuter à partir d'une tension facilement accessible telle que celle fournie par un générateur de tensions usuelles puis de la transformer pour obtenir au final la haute tension souhaitée. Et l'un des moyens connus depuis longtemps maintenant pour aboutir à cela est l'utilisation d'un transformateur.

1.4.1 Généralités sur le transformateur

Le transformateur permet donc de convertir de l'électricité avec un fort courant et une faible tension en de l'électricité avec un faible courant et une haute tension et vice versa avec presque aucune perte d'énergie (Coltman, 2002). La Figure 1.11 ci-dessous nous permet d'observer ce qui se passe à l'intérieur du transformateur:

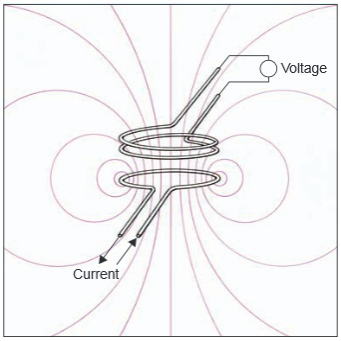

Figure 1.11 L'induction électromagnétique dans le transformateur
Tirée de Coltman (2002, p. 10)

Cette illustration nous permet de visualiser le phénomène se déroulant dans un transformateur. Les lignes de force décrivent le champ magnétique émanant d'une bobine de fil (circuit primaire) parcouru par un courant. Un second bobinage (circuit secondaire) placé dans le champ intercepte les lignes (représentées sur la Figure 1.11 ci-dessus). Si le champ magnétique est fluctuant, comme il est alimenté en courant alternatif (AC), il va induire une tension dans la bobine secondaire. Ce phénomène, connu comme l'induction électromagnétique, est le fondement de l'action d'un transformateur (Coltman, 2002).

Il existe ainsi différents types de transformateurs : les transformateurs monophasés, les transformateurs triphasés, etc. Dans notre cas, nous restreindrons notre étude au transformateur monophasé.

1.4.2 Le transformateur monophasé

Le transformateur monophasé est constitué de deux bobines montées sur un circuit magnétique cuirassé tel que présenté sur la Figure 1.12 (Séguier *et al.*, 2006) :

- l'une, de n_1 spires, est reliée à la source et constitue le primaire;
- l'autre, de n_2 spires, est reliée au récepteur et constitue le secondaire.

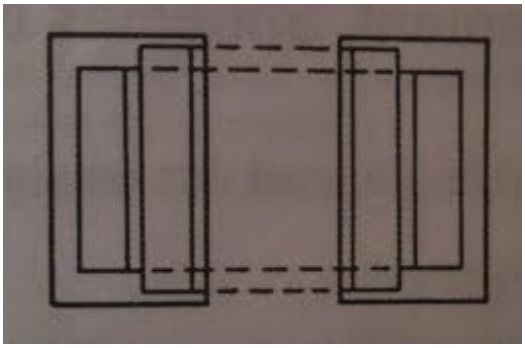

Figure 1.12 Représentation schématique en coupe du circuit magnétique d'un transformateur monophasé
Tirée de Séguier *et al.* (2006, p. 219)

Aussi, lorsqu'on travaille avec des transformateurs, il est intéressant de pouvoir rapporter leur schéma électrique à un schéma équivalent. Dans le cas du transformateur monophasé, la Figure 1.13 ci-dessous nous présente le schéma équivalent usuel du transformateur monophasé avec ses caractéristiques :

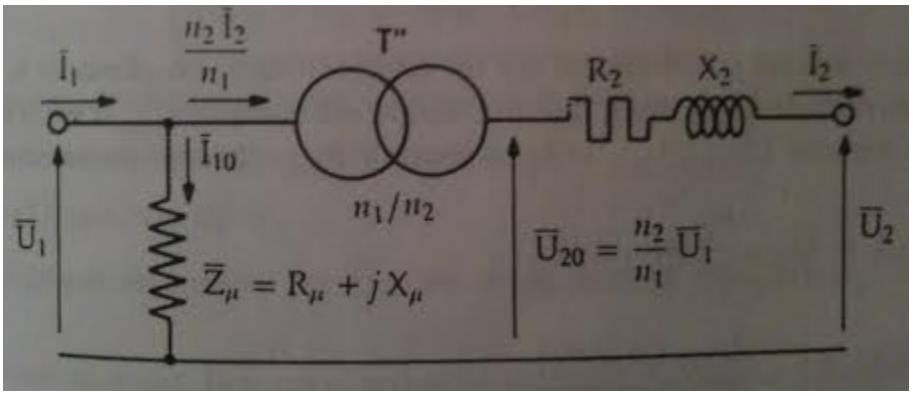

Figure 1.13 Schéma équivalent usuel du transformateur monophasé
Tirée de Séguier *et al.* (2006, p. 225)

Le dimensionnement du transformateur n'étant pas un prérequis dans nos travaux de recherche puisque nous n'avons pas à réaliser cette tâche, nous ne détaillerons pas plus les calculs permettant d'obtenir les différentes caractéristiques liées à ce dernier. Une relation attire cependant notre intérêt dans ce modèle équivalent; il s'agit de la formule nous donnant $\bar{U}_{20}$ (tension complexe au secondaire à vide) en fonction de $\bar{U}_1$ (tension complexe au primaire) et de n_1 et n_2 (respectivement le nombre de spires de la bobine au primaire et le nombre de spires de la bobine au secondaire) et définit par Séguier *et al.* (2006, p. 226) :

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\bar{U}_{20}}{\bar{U}_1} \tag{1.1}$$

Cette formule nous permet donc d'obtenir la tension à vide au niveau du circuit secondaire connaissant la tension appliquée au primaire et les nombres des spires des bobines au primaire et au secondaire.

1.5 Synthèse de la revue de la littérature

À travers cette revue de la littérature, le matériau utilisé dans notre étude qui est un matériau composite à base de PET recyclé a été présenté et ses caractéristiques ont été détaillées. Il est donc intéressant de rappeler que ce matériau possède de bonnes propriétés électriques et thermiques et qu'il les conserve après avoir été recyclé.

Le Groupe Lavergne travaille donc avec ce type de matériau afin de permettre la commercialisation d'un plastique utilisé dans la fabrication des boîtiers de distributeurs destinés à l'industrie automobile. Cependant, ils utilisent plus précisément du PET recyclé en tant que matrice à laquelle sont ajoutées certaines charges[3].

La charge principale présente dans la composition du matériau est de la fibre de verre type E. L'ajout de cette charge a un but purement structurel puisque ces fibres permettent d'améliorer significativement ses propriétés mécaniques comme nous l'indique Mebarki dans son mémoire (2012, p. 31-33).

Une seconde charge est ajoutée. Il s'agit du mica, puisqu'il permet d'améliorer significativement la durée de vie en fatigue du matériau face à des contraintes électriques. En effet, d'après Ul Haq *et al.* (2011), l'ajout de flocons de mica améliore l'endurance électrique du composite.

Par ailleurs, des études menées sur les décharges partielles et sur la rupture électrique du PET en général nous ont permis de comprendre les différents phénomènes menant à cela ainsi que les conséquences qui s'en suivent. C'est d'ailleurs ce phénomène de claquage diélectrique

---

[3] La charge est une substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le coût de revient du matériau transformé (Naudin *et al.*, 1987).

qui attire notre intérêt puisque c'est pour cette raison que le Groupe Lavergne a sollicité cette recherche. En effet, le but étant de mettre en évidence certaines propriétés diélectriques du matériau composite à base de PET recyclé qu'ils commercialisent et qui est ensuite employé dans des applications automobiles à haute tension.

La suite de cette synthèse nous conduit donc à notre problématique de recherche qui va clairement indiquer la raison d'une telle étude. Par la suite, le chapitre suivant nous présentera l'étude théorique préliminaire ayant été menée afin de mettre en œuvre la solution capable de répondre à notre problématique.

1.6 Énoncé de la problématique de recherche

La vision écologique et environnementale est omniprésente dans notre société actuelle, et cela est encore plus vrai lorsqu'il s'agit de sociétés et d'industries. Et le Groupe Lavergne ne déroge pas à cette règle puisqu'il en a fait sa marque de commercialisation en lançant sur le marché un matériau composite à base de PET recyclé.

La revue de la littérature nous a permis de comprendre les travaux qui ont déjà été réalisés quant aux applications liées au PET en générale et aux matériaux composites. Aussi, l'application de ce boîtier de distributeur fabriqué à partir du plastique commercialisé par le Groupe Lavergne est une application soumise à de fortes contraintes électriques puisque les tensions avoisinant le boîtier sont des hautes tenions. Ainsi, nous avons élargi notre revue de la littérature aux études qui ont été réalisées sur les décharges partielles et sur la rupture diélectrique du PET, mais aussi sur la possibilité de générer de hautes tensions à fin de réaliser, par la suite, nos propres tests sur les produits en PET fournis par la société.

En effet, le Groupe Lavergne rencontre actuellement des problèmes quant à la résistance liée à la rupture diélectrique de son matériau composite à base de PET recyclé. Il serait alors question de concevoir un banc d'essai permettant de caractériser les propriétés diélectriques

de ces matériaux composites à base de PET recyclé. Le but de ce banc serait de tester différents matériaux composites dans les conditions quasi identiques à celles auxquelles ils sont soumis dans les automobiles lors de leur utilisation traditionnelle. Cela impliquerait alors pour ces produits des tests de résistance à de hautes tensions. Ensuite, il serait intéressant de les caractériser afin de déterminer quelle « formule » du matériau composite à base de PET recyclé donne les meilleurs résultats.

CHAPITRE 2

GÉNÉRATION DES IMPULSIONS À HAUTE TENSION

Dans ce chapitre, nous proposons de présenter la méthode retenue pour obtenir la haute tension souhaitée en expliquant préalablement le contexte réel. Nous présentons le transformateur utilisé dans notre montage. Cependant, nous ne détaillons pas encore la conception du générateur à haute tension. Enfin, nous expliquons pourquoi il s'agit de créer pour cette étude un générateur d'impulsions à haute tension et non un générateur à haute tension continue.

2.1 Méthodologie adoptée

Afin de concevoir le générateur de haute tension que nous utilisons dans notre banc d'essai, nous avons analysé ce qui se passe réellement dans le moteur d'une voiture. Puis, nous nous sommes servis de cela dans une optique visant à obtenir des résultats à nos tests qui soient pertinents et utilisables afin de pouvoir déterminer par la suite quelles pièces présentent les meilleures performances.

2.1.1 Contexte général

En contexte réel, la pièce sur laquelle nous voulons effectuer nos tests est placée dans les moteurs automobiles. En effet, le boîtier de distributeur utilisé dans les moteurs automobiles contient, comme son nom l'indique, le système de distribution et d'allumage des bougies d'allumage. Ces dernières, comme l'illustre la Figure 2.1 ci-dessous, sont placées au-dessus du bloc moteur.

Rapport-Gratuit.com

Figure 2.1 Positionnement des bougies d'allumage dans une automobile

Les boîtiers de distributeurs servent uniquement à des fins de mise en positionnement des éléments électriques qu'ils contiennent. Cependant, il arrive fréquemment que ce type de pièce, constituée de PET dans notre cas, se retrouve en contact à des endroits non souhaités et non propices avec le châssis du véhicule. Le châssis des véhicules constitue la masse du circuit électrique de ces derniers. Dans le cas général, même si un tel phénomène se produit, cela ne devrait pas créer de réels problèmes puisque le plastique est un isolant et ainsi, aucun court-circuit ne peut se produire.

Cependant, en pratique, le fait que la pièce en plastique soit en contact avec le châssis du véhicule, c'est-à-dire avec la masse du circuit électrique, peut causer des problèmes du fait des hautes tensions mises en jeu lors de la formation des arcs électriques au niveau des bougies. En effet, la tension de claquage d'une bougie peut varier de 1000 V lorsqu'elle se trouve à l'air libre jusqu'à 10 kV et plus dans un moteur d'automobile ayant un taux de compression[4] de 10 et selon le modèle du véhicule. Ce qui se passe alors est le phénomène dont nous discutions dans notre chapitre précédent sur la rupture diélectrique. Ainsi, le boîtier en plastique perfore sous l'effet de la haute tension, et le courant permettant à la

[4] Le taux de compression d'un moteur à pistons, aussi appelé rapport volumique, est le rapport théorique entre le volume interne lorsque le piston est au point mort bas et le volume interne lorsqu'il est au point mort haut.

bougie de produire une décharge ne circule plus correctement ou plus du tout lors d'une rupture complète de l'élément en PET; les bougies d'allumage ne sont alors plus capables d'assurer leur rôle.

Afin de générer ces hautes tensions dans les moteurs de véhicules, l'industrie automobile utilise ce qui est communément appelé une bobine d'allumage. Une bobine d'allumage est en réalité un transformateur monophasé permettant d'augmenter des tensions avec de faibles courants. Ainsi, à partir des batteries de 12 V utilisées dans les voitures, la bobine de démarrage permet d'obtenir au secondaire une tension de l'ordre de 10 kV. Ci-après, nous pouvons observer le schéma électrique simplifié du circuit d'allumage d'une voiture; il faut cependant remarquer que ce dernier était celui utilisé pour d'anciennes automobiles, car de nos jours, le principe a bien évolué et est bien plus complexe.

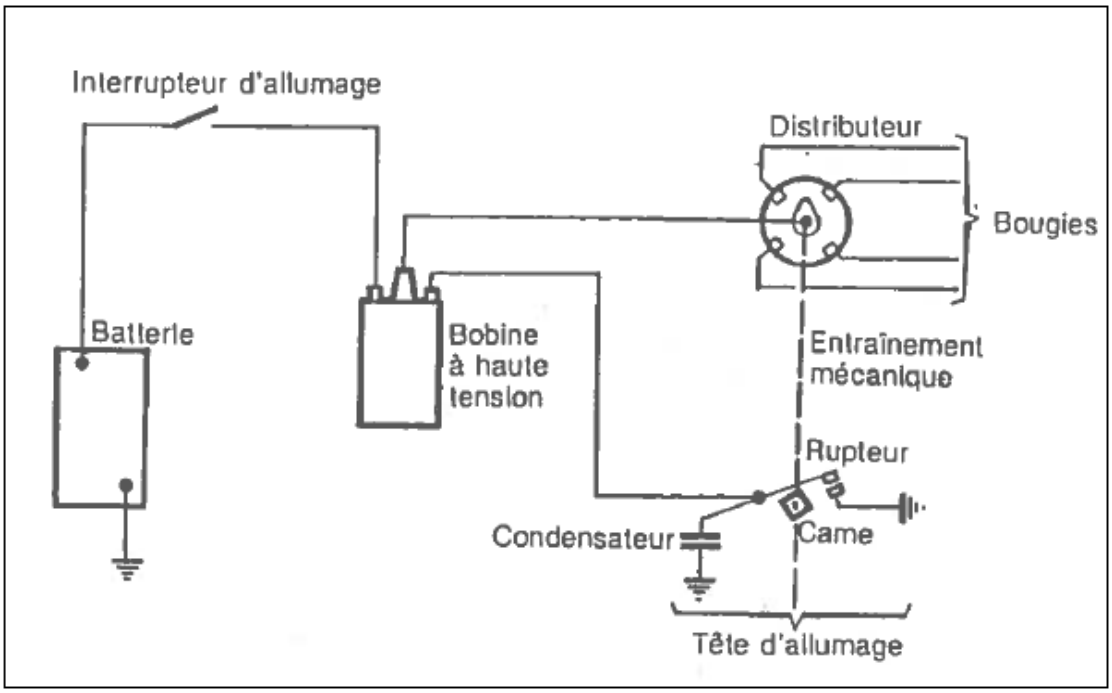

Figure 2.2 Schéma électrique simplifié du circuit d'allumage d'une automobile
Tirée de Champeau (1989, p. 86)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Ce schéma électrique est celui ayant servi de base de travail puisqu'il nous permet de créer un montage permettant la génération de haute tension tout en restant fidèle à la réalité nous permettant ainsi de tester nos échantillons de plastiques en conditions quasi réelles.

2.1.2 Choix du transformateur à haute tension

Comme nous l'avons expliqué précédemment, le transformateur utilisé dans les voitures afin de générer les hautes tensions permettant le fonctionnement des bougies d'allumage est une bobine d'allumage. Nous avons ainsi choisi d'utiliser la même technologie et utilisons donc comme transformateur dans notre montage électrique une bobine d'allumage utilisée pour les véhicules de concession Dodge de modèle Spirit 95. Ce choix ayant été basé sur le fait qu'il était plus facile de manipuler et procéder au câblage de ce type de bobine d'allumage en comparaison des bobines d'allumage plus modernes. La Figure 2.3 ci-dessous nous présente une illustration de la bobine d'allumage que nous utilisions sur notre banc d'essai.

Figure 2.3 Bobine d'allumage utilisée sur les modèles Dodge Spirit 95

Nous ne possédons que très peu de caractéristiques liées à cette bobine puisque ce genre de matériel étant destiné au grand public, les commerçants ne fournissent pas leurs caractéristiques électriques, mais simplement le modèle de véhicule pour lequel la bobine est adaptée. Nous savons cependant que les bobines d'allumage fonctionnent sous une tension

nominale de 12 V continus. Aussi, ces bobines fonctionnement sous une gamme de fréquences appartenant au domaine des fréquences de rotation des moteurs automobiles à combustion. Cela signifie que ces bobines fonctionnent usuellement à basse fréquence puisque la fréquence de rotation d'un moteur de voiture à combustion reste toujours très largement inférieure à 1 kHz.

2.2 Création des impulsions à haute tension

Dans un premier temps, il convient d'expliquer pourquoi nous souhaitions générer des impulsions à haute tension et non une haute tension continue. La raison se trouve simplement dans le fait que nous souhaitions effectuer les tests sur les pièces en plastique tout en restant fidèle à ce qui se passe en réalité, c'est-à-dire à la façon dont ces pièces en plastique sont contraintes lors de leur usage dans les moteurs automobiles. Or, dans les voitures, ce sont bien de hautes tensions par impulsions qui sont générées puisqu'elles sont synchronisées sur la fréquence de rotation du moteur à combustion. Cette raison est suffisante en elle-même pour nous avoir obligés à réaliser un générateur d'impulsions à haute tension. Cependant, il est aussi intéressant de préciser que le fait d'utiliser une tension alternative pour venir tester le plastique est plus dommageable pour ce dernier que s'il s'agissait d'une tension continue; les tests ont donc ainsi été plus exigeants pour ces derniers.

La manière dont nous avons généré des impulsions à haute tension est simple. Ci-dessous, nous avons une partie du schéma électrique de notre banc d'essai; cette partie représente le circuit au primaire et au secondaire de notre transformateur.

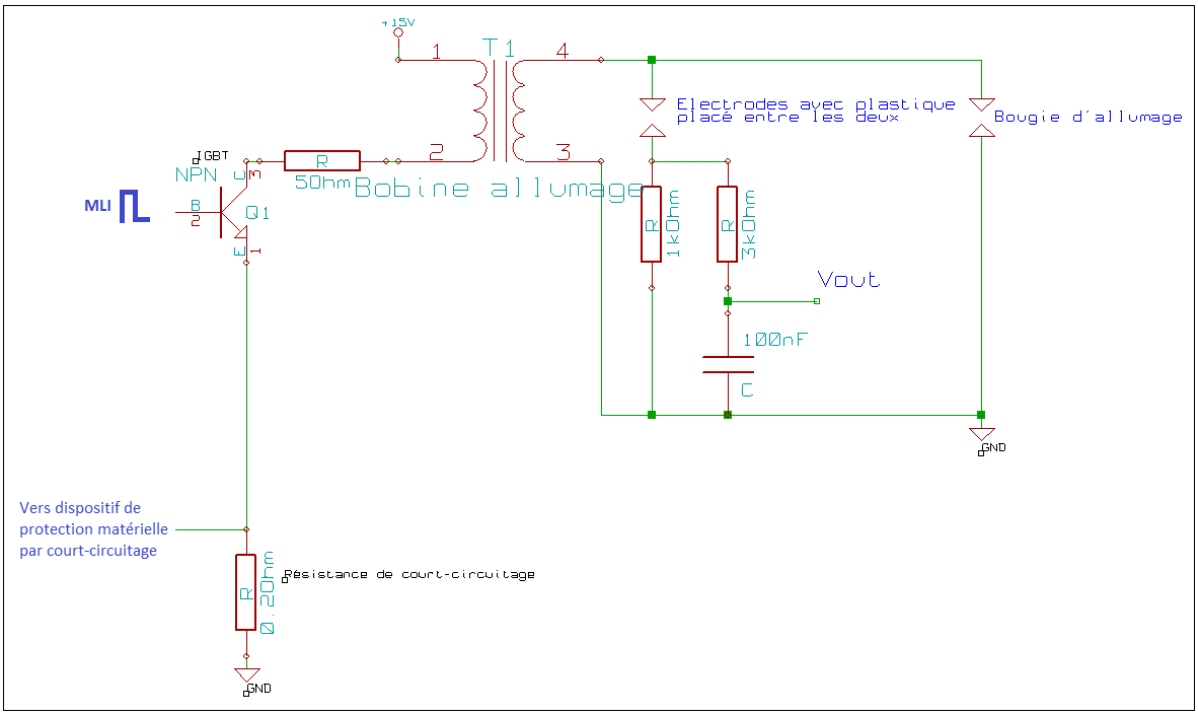

Figure 2.4 Schéma électrique au primaire et au secondaire de la bobine d'allumage

Au primaire, nous avons donc connecté notre bobine d'allumage T en séries avec une résistance R ainsi qu'avec un transistor Q_1 et une résistance R. En amont du transistor Q, un montage constitué de composants électroniques ainsi que d'électronique programmable permet de gérer une MLI qui est ainsi amplifiée entre les bornes C/E (collecteur/émetteur) de Q_1.

L'intérêt d'un tel montage nous permet tout d'abord de protéger les composants électroniques à faible courant permettant de générer et de gérer la MLI. En effet, cette dernière est générée à l'aide d'un microcontrôleur Atmel ATmega644P qui fonctionne sous une tension nominale de 5 V avec de très faibles intensités de l'ordre du milliampère. Aussi, cela permet d'alimenter la bobine avec une tension continue de 15 V et avec des courants de l'ordre de l'ampère tout en préservant le microcontrôleur et les composants en amont du transistor IGBT.

2.3 Synthèse sur la génération des hautes tensions

Nous avons vu dans ce chapitre l'intérêt de générer de hautes tensions par impulsions. En effet, ceci est la façon dont sont obtenus les arcs électriques au niveau des bougies d'allumage d'une automobile. Aussi, puisque le but de cette recherche est de permettre la caractérisation des phénomènes diélectriques liés à l'utilisation du boîtier du distributeur dans ce type de conditions, il convient de réaliser les tests dans des conditions similaires à la réalité. Aussi, nous avons expliqué quel type de transformateur convenait à ce genre de situation, c'est-à-dire une bobine d'allumage d'automobile. Plus précisément dans notre cas, nous avons choisi de travailler avec la bobine d'allumage du modèle de voiture Dodge Spirit 95.

Ainsi, nous savons à présent comment nous allons générer la haute tension grâce à la bobine d'allumage; et nous savons aussi que la tension doit être générée sous forme d'impulsions. À présent, il s'agit de concevoir le montage électrique capable de gérer cela, c'est ce que nous allons détailler dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3

CONCEPTION ET PROGRAMMATION ÉLECTRONIQUE

Ce chapitre nous présente la conception et la programmation électronique complète de notre banc d'essai. Nous y détaillons ainsi la manière dont nous avons conçu notre générateur d'impulsions à haute tension et les composants électroniques qui ont été utilisés pour cela.

3.1 Algorithme de la démarche suivie

Nous avons précédemment expliqué comment nous voulions générer des impulsions à haute tension afin de simuler le même fonctionnement que dans un moteur de véhicule. L'algorithme décrivant la marche suivie afin de réaliser notre banc d'essai au niveau de sa conception et de sa programmation électronique est la suivante :

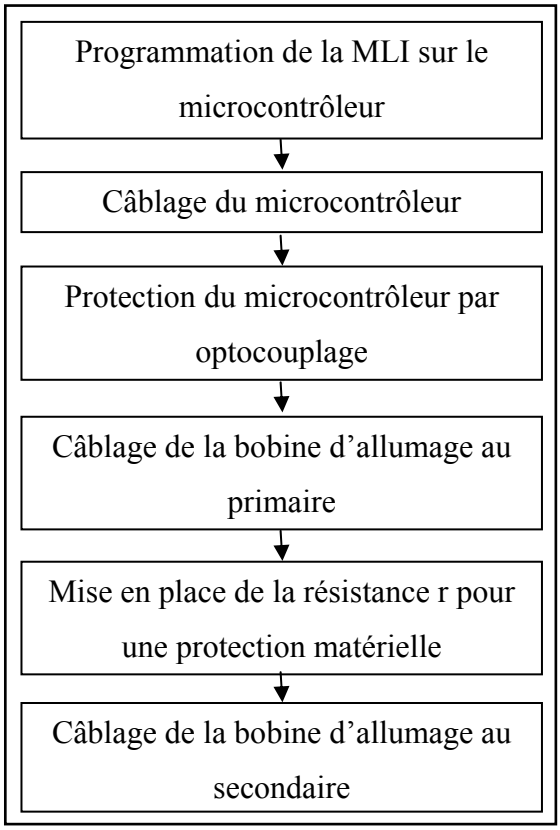

Figure 3.1 Processus de conception et de programmation électronique du banc d'essai

3.2 Programmation de la Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI)

3.2.1 Généralité sur les MLI

Avant de proposer le programme de la MLI utilisée pour créer les impulsions dans notre montage, il convient d'expliquer l'intérêt de celle-ci. Nous avons choisi d'utiliser une MLI pour créer les impulsions dont nous avions besoin, car nous voulions créer un signal carré qui soit propre, avec un rapport cyclique et une fréquence stables et constants. De plus, le signal obtenu lorsqu'on génère une MLI est de ce type :

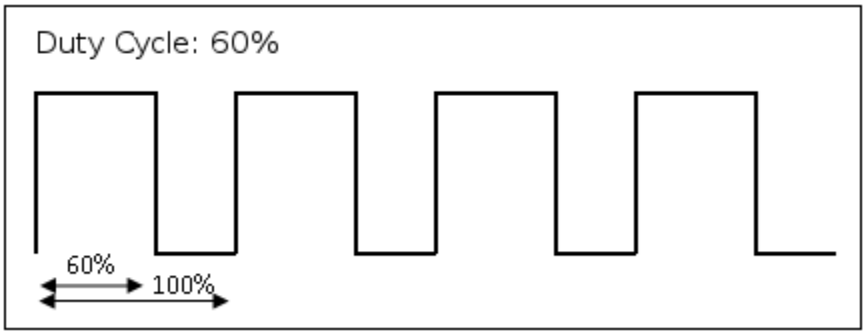

Figure 3.2 Allure d'une MLI dont le rapport cyclique est de 60%

En théorie, on constate que ce sont des variations instantanées du signal que nous obtenons à fréquence constante; l'amplitude du signal étant directement liée au matériel utilisé pour générer la MLI et dans notre cas, c'est un signal variant entre 0 et 5 V que nous obtenons. Aussi, cette variation très rapide du courant nous permet de venir chercher la haute tension au niveau de la bobine d'allumage au primaire. En effet, la tension U_L aux bornes de la bobine obéit à la loi suivante :

$$U_L = L\frac{di}{dt} \tag{3.1}$$

La variable L représente l'inductance de la bobine, t représente le temps et i définit le courant variable qui traverse la bobine. En effet, la MLI nous fournit un signal carré en sortie avec des variations rapides du courant. Ainsi, à partir de cette loi, on constate rapidement l'intérêt de faire varier le plus rapidement possible le courant dans la bobine afin qu'elle génère une tension infinie, en théorie, puisqu'en pratique, celle-ci est limitée par sa propre saturation.

3.2.2 Microcontrôleur Atmel ATmega644P et programme MLI

Maintenant que nous connaissons l'intérêt de générer une MLI, nous pouvons programmer notre microcontrôleur pour qu'il soit capable de produire un tel signal. Le microcontrôleur utilisé dans notre montage est un ATmega644P et provient du fournisseur Atmel. Nous nous sommes appuyés sur la fiche technique de ce dernier afin d'écrire le programme de la MLI de façon adéquate, il est visible en Annexe I, Figure-A I-1. Le diagramme bloc ci-dessous nous a permis de comprendre quels registres du microcontrôleur devaient être utilisés afin d'obtenir la MLI désirée :

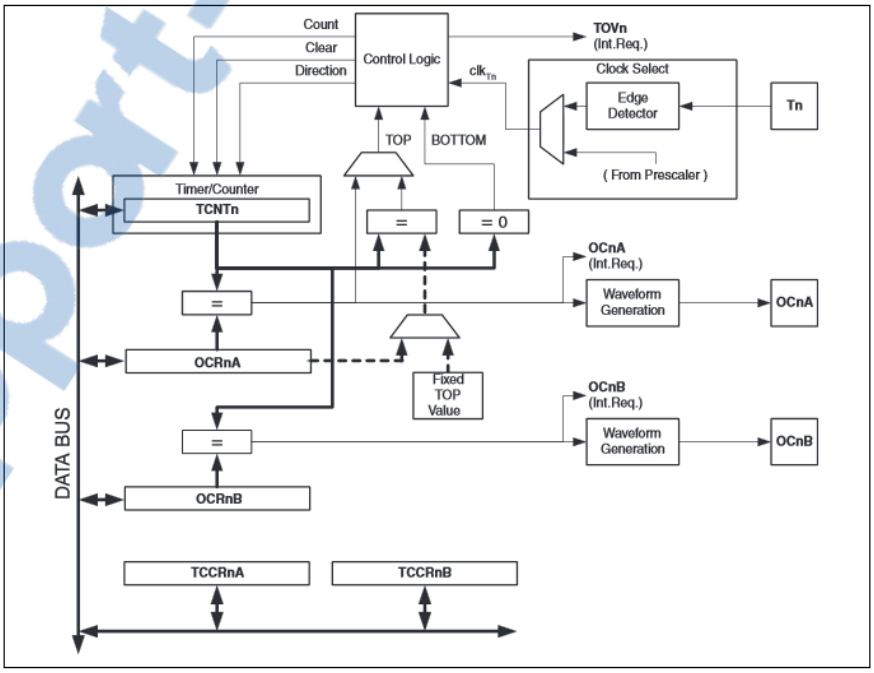

Figure 3.3 Diagramme bloc du Timer/Counter 8-bit
Tirée de la fiche technique ATmega164P-324P-644P (2013, p. 93)

Rapport-Gratuit.com

De ce diagramme bloc, nous en avons construit un digramme bloc simplifié et adapté à notre besoin de création de la MLI que nous visualisons ci-dessous :

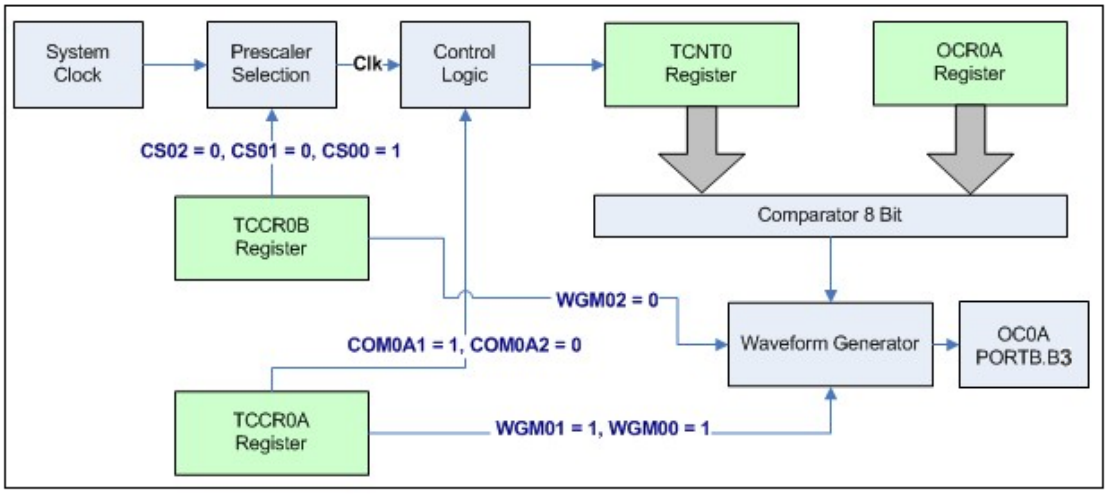

Figure 3.4 Le mode Fast PWM utilisant le Timer/Counter 8-bit sur OC0A
Adaptée de la fiche technique ATmega164P-324P-644P (2013, p. 93)

Nous avons donc configuré les différents registres nécessaires comme expliqués sur la Figure 3.4 ci-dessus afin de se placer dans le mode « Fast PWM », de configurer un rapport cyclique à 50% (voir Annexe I, Figure-A I-1) et une fréquence $f_{OCnxPWM}$ pour la MLI égale à 488 Hz. Nous avons utilisé la formule suivante inspirée de la fiche technique ATmega164P-324P-644P (2013, p. 100) :

$$f_{OCnxPWM} = \frac{f_{clk_I/O}}{N.256} \tag{3.2}$$

On sait que la fréquence de l'horloge interne $f_{clk_I/O}$ du microcontrôleur vaut 1 MHz et N est la variable représentant le facteur du prescale pouvant prendre les valeurs 1, 8, 64, 256 ou 1024. Dans notre programme, nous avons choisi N égal à 8. Nous avons délibérément choisi de donner une fréquence de 488 Hz à notre MLI en choisissant N égal à 8, car nous voulions effectuer les tests sur nos pièces en plastiques à une fréquence supérieure à laquelle ils sont soumis en utilisation normale afin d'obtenir un effet d'usure, un effet de fatigue plus

important et plus rapide. En effet, considérant que, dans la réalité, un moteur de voiture tourne majoritairement avec une vitesse de rotation à 2000 tr/min, la fréquence d'allumage des bougies serait de 33 Hz. Nous avons donc un facteur quinze fois plus important entre la fréquence d'allumage de la bougie utilisée pour nos tests et la fréquence d'allumage réelle.

3.3 Conception électronique

Une fois notre MLI programmée et accessible à partir du PORT PB3 de notre microcontrôleur, nous avons effectué le câblage afin d'obtenir l'image de la MLI que nous avons programmée sur la base B de notre transistor IGBT. Le but étant d'utiliser ce dernier dans son mode de commutation[5] afin de venir chercher les états saturé ou bloqué.

3.3.1 Transistor IGBT

Le transistor IGBT utilisé est un modèle IXGP24N120C3. Ce transistor fonctionne sous une tension nominale de saturation V_{GE} de 15 V comme nous l'apprend le fournisseur Digi-Key dans sa fiche technique du IXGP24N120C3 (2008, p. 1). Ainsi, la MLI générée par notre microcontrôleur était insuffisante en tant que telle pour permettre la saturation complète du transistor. De plus, le fonctionnement d'un transistor IGBT est un peu différent d'un transistor MOSFET traditionnel à cause de sa conception différente. En effet, un transistor IGBT est capable de laisser circuler des courants importants entre ses bornes C et E et supporte aussi les hautes tensions; choses que les transistors MOSFET usuels ne sont pas capables puisque leur utilisation est préférée dans de l'électronique basse tension. Ainsi,

---

[5] Ce mode s'apparente au fonctionnement d'un interrupteur :

- lorsque le transistor est bloqué, le courant I_C est nul et la tension V_{CE} est à son maximum, le transistor fonctionne comme un interrupteur ouvert;
- lorsque le transistor est saturé, le courant I_C est à son maximum et la tension V_{CE} est nulle, le transistor fonctionne comme un interrupteur fermé.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

lorsqu'on manipule un transistor IGBT dans son mode de commutation, il faut constamment, ou le saturer, ou le bloquer avec des tensions fixes (dans notre cas : 0 V ou 15 V). Sinon, le transistor IGBT conserve un effet mémoire et reste saturé si une tension de 0 V n'est pas appliquée sur sa base lorsqu'on désire le bloquer. Cela est dû à sa structure qui est différente de celle des transistors MOSFET habituellement employés. Nous nous sommes aperçus de ce phénomène lors de nos essais électriques.

La solution adaptée à cette situation a donc été d'utiliser un ampli-op (amplificateur opérationnel) LM324N. Cette solution ayant eu pour avantage de résoudre nos deux problèmes dans un seul temps puisque la tension nominale pour V_{GE} a ainsi pu être fournie et, comme nous avons réglé notre ampli-op pour qu'il fournisse une tension de sortie ou de 15 V, ou de 0 V, nous avons résolu dans un même temps les effets de magnétisations intempestives causés par le transistor IGBT. Ci-dessous, on peut observer un schéma électrique de principe du montage réalisé :

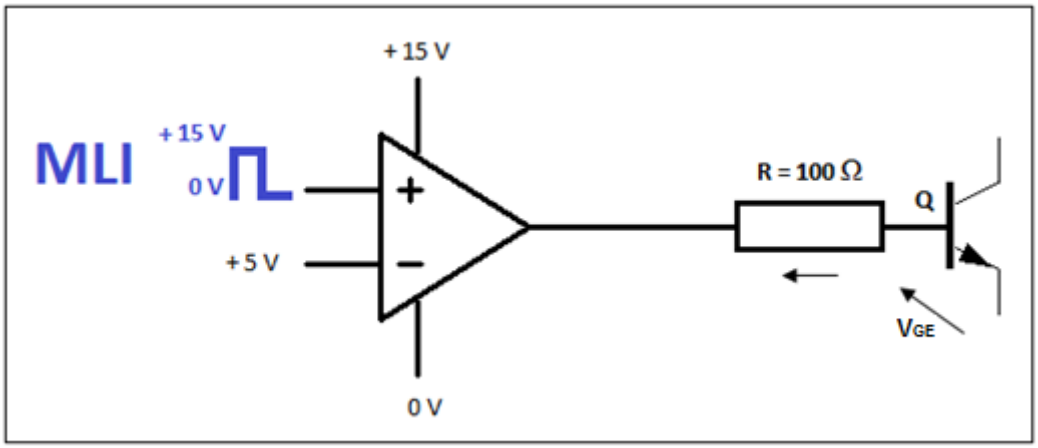

Figure 3.5 Schéma de principe pour l'amplification du signal MLI sur la base du transistor IGBT

Cette figue est simplement un schéma de principe et permet de comprendre la démarche que nous avons adoptée afin de résoudre les deux problèmes cités ci-dessus quant à l'utilisation d'un transistor IGBT. En réalité, comme on peut le visualiser sur le schéma électrique

complet du banc d'essai présent en Annexe II, Figure-A II-1, le fonctionnement est légèrement différent en amont de l'ampli-op puisqu'on ne reçoit pas directement le signal de la MLI sur le port non-inverseur de ce dernier. On place une résistance R de 100 Ω entre l'ampli-op et la grille G du transistor afin de protéger ce dernier; la tension V_{GE} obtenue entre les bornes G et E du transistor est alors soit 15 V, soit 0 V, en fonction de la sortie fournie par l'ampli-op et donc de ce que fournie la MLI.

3.3.2 Protection des composants électroniques par optocouplage

Comme nous l'avons précisé précédemment, nous avons placé des optocoupleurs dans notre montage électrique afin de protéger les différents composants sensibles à d'éventuelles surintensités ou surtensions tels que le microcontrôleur, par exemple, qui cède très facilement face à ce genre de phénomène. Aussi, nous utilisons un générateur de tension continue de 15 V afin dans le circuit primaire de la obine d'allumage. Il fallait donc qu'on puisse utiliser la MLI provenant du microcontrôleur possédant sa propre masse dans notre montage avec le transistor IGBT lié de ce fait à la masse du générateur de tension continue de 15 V. De plus, rendre les masses de ces deux éléments communes aurait pu être dommageable pour le microcontrôleur, car comme nous l'avons précisé précédemment, ce genre de composant électronique est très fragile quant à d'éventuelles fuites de courant.

Nous avons donc utilisé des otpocoupleurs de modèle LDA110 pour effectuer ces protections. Ci-dessous, on peut observer comment ce composant électronique est conçu :

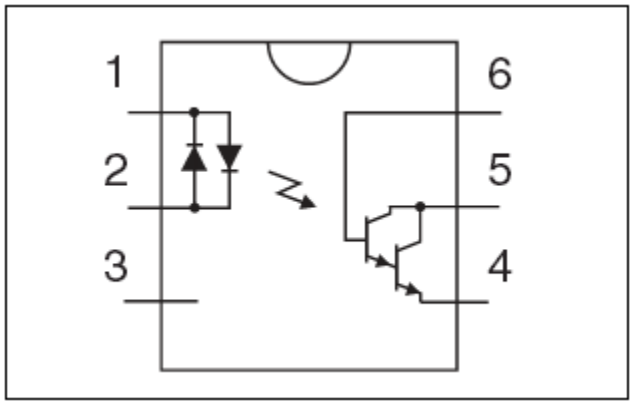

Figure 3.6 Optocoupleur LDA110
Tirée de la fiche technique du LDA110 (2012, p. 1)

Ainsi, afin de procéder à cette séparation du montage alimenté par le microcontrôleur à 5 V et de celui alimenté par le générateur à tension continue de 15 V, nous avons procédé comme indiqué sur le schéma de principe suivant :

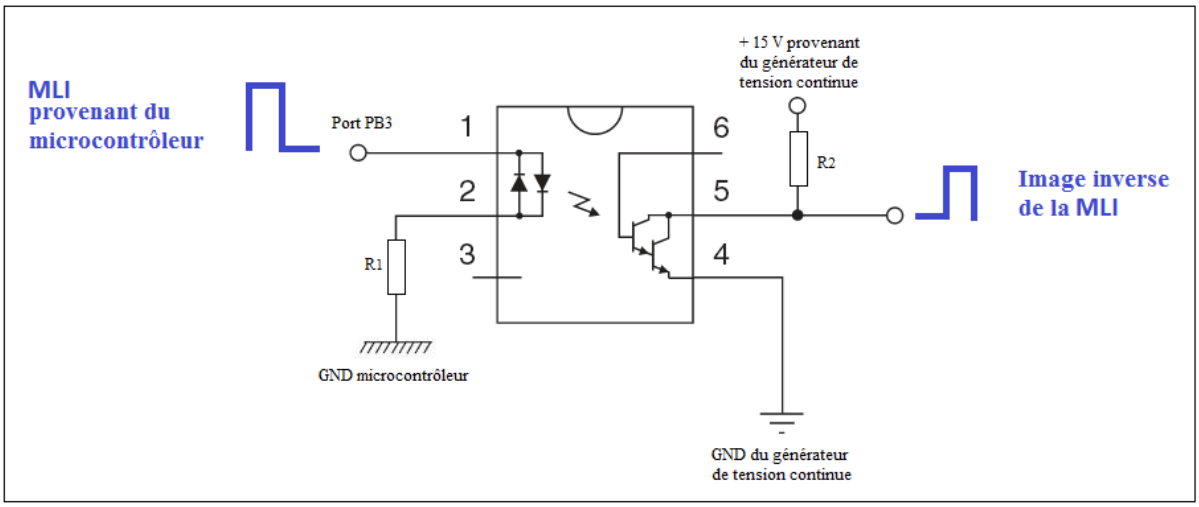

Figure 3.7 Schéma électrique de principe d'utilisation des optocoupleurs

Ainsi, avec ce type de montage, on protège les composants de part et d'autre de l'opotcoupleur en cas de problème éventuel. Le seul inconvénient est que, comme on peut l'observer sur le schéma de la Figure 3.7, nous obtenons à chaque fois l'image inverse du

signal qu'on cherche à exploiter en sortie de l'optocoupleur avec ce type de montage. Cependant, comme on peut le voir dans notre Annexe II, Figure-A II-1, présentant notre schéma électrique complet, cela n'a pas posé de problèmes puisqu'il a été très facile de remédier à cela afin d'avoir en finalité sur la base du transistor IGBT, l'image parfaite de la MLI générée par le microcontrôleur.

On peut alors se poser la question de la rapidité de réponse de l'optocoupleur lorsque le signal de la MLI lui est transmis. Le Tableau 3.1 ci-dessous nous aide à émettre un jugement quant à cela :

Tableau 3.1 Caractéristiques de commutation du LDA110 à 25°C
Tiré de la fiche technique du LDA110 (2012, p. 2)

Characteristic	Symbol	Test Condition	Typ	Units
Turn-On Time	t_{on}	V_{CC}=5V, I_F=1mA, R_L=500Ω	8	µs
Turn-Off Time	t_{off}		345	

De ce tableau, on constate que le temps de montée t_{on} de l'optocoupleur est de 8 µs et que le temps de descente t_{off} est de 345 µs. Ce phénomène a pour conséquence de modifier légèrement la forme du signal en augmentant le rapport cyclique de la MLI puisque t_{on} est inférieur à t_{off}. Cependant, avec une fréquence pour la MLI de 488 Hz, la période T du signal correspondant est d'environ 2 ms. Le fait que les délais t_{on} et t_{off} soient de l'ordre de la microseconde nous permet de conclure en disant que l'augmentation de ce rapport cyclique est négligeable. Aussi, les courts délais causés par les optocoupleurs ne sont pas contraignants puisqu'ils sont très faibles et que nous n'utilisons que deux optocoupleurs pour acheminer le signal de la MLI jusqu'à la base du transistor IGBT.

3.3.3 Protection matériel du circuit primaire de la bobine d'allumage

Nous voulions préserver chacun de nos composants principaux lors de l'élaboration du banc d'essai et de la réalisation des différents tests; cela afin d'éviter tout surcoût excessif lié à d'éventuels remplacements du matériel. Précédemment, nous expliquions comment nous avions protégé le microcontrôleur étant l'une des pièces maitresses de notre montage, et cela à l'aide d'opotcoupleurs. À présent, il s'agit de protéger le circuit primaire de la bobine d'allumage.

Lorsqu'on parle du circuit primaire de la bobine d'allumage, il s'agit du générateur de tension, de la bobine d'allumage et du transistor. Il s'agissait alors de protéger ce circuit contre les surintensités pouvant éventuellement se produire dans le circuit primaire de la bobine d'allumage, lequel était justement commandé par l'alternance blocage/saturation du transistor. Dans un premier temps, lorsqu'on regarde les caractéristiques électriques du transistor dans sa fiche technique (2008, p. 1), on voit que ce dernier possède de très bonnes compétences quant à sa résistance aux fortes intensités (48 A maximum à 25°C). Cependant, cette valeur reste une valeur critique, il convient donc d'éviter de l'atteindre et surtout de ne pas la maintenir sur une durée trop importante. Le générateur de tension que nous possédons sature à 3.5 A, nous ne pouvions donc, quoiqu'il arrive, obtenir une tension plus importante dans le circuit primaire de la bobine. Aussi, étant donné le fait que l'effet recherché dans notre étude était une augmentation de la tension, nous ne voulions pas générer de grandes intensités. Nous avons donc choisi de limiter le courant dans ce circuit à 2 A maximum sachant qu'en utilisation normale, le courant n'atteint pas plus d'un ampère.
Pour cela, nous avons procédé comme indiqué sur le schéma ci-dessous :

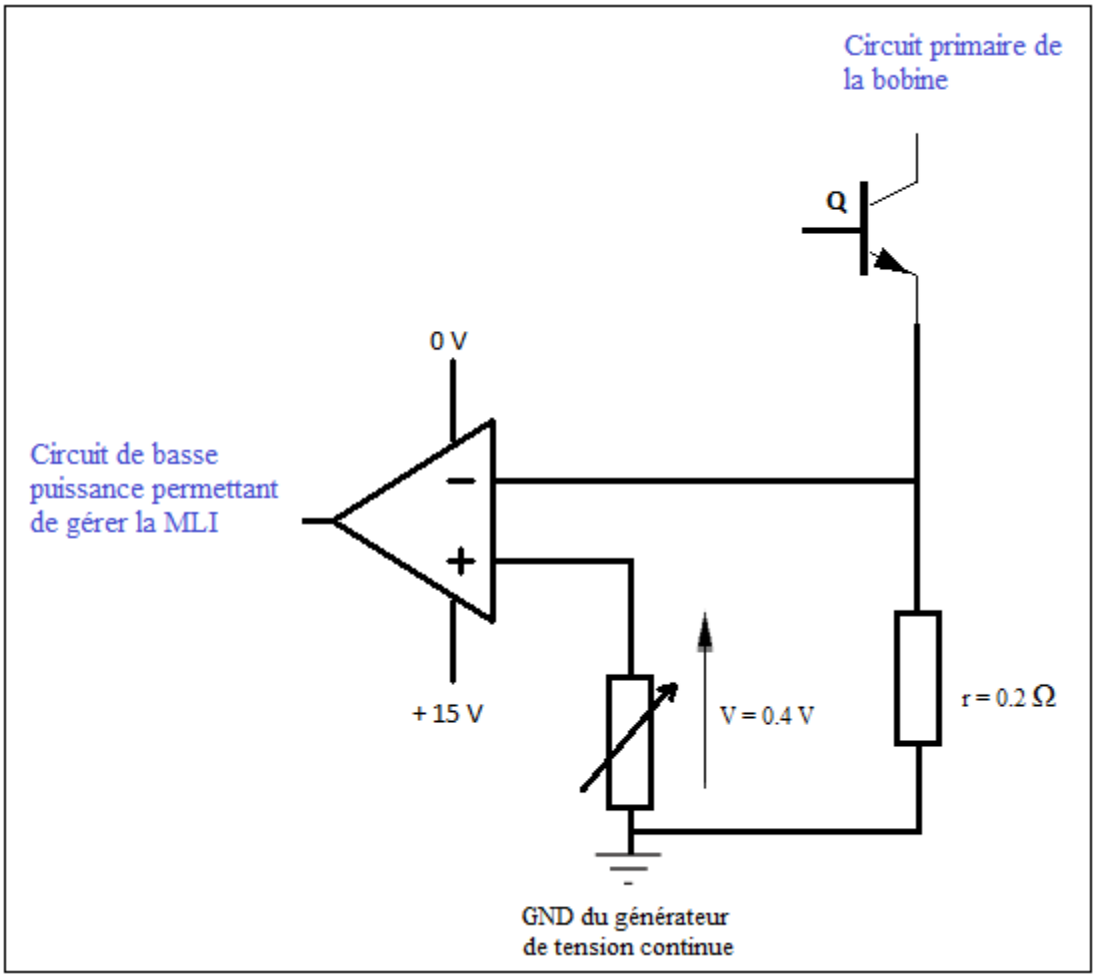

Figure 3.8 Schéma d'utilisation de la résistance r de protection par court-circuitage

Ainsi, lorsque la tension aux bornes de la résistance r de court-circuitage permettant la protection du circuit primaire est supérieure à 0.4 V, ce qui implique une intensité dans le circuit primaire supérieure à 2 A, un ampli-op placé dans le circuit de basse puissance où est gérée la MLI court-circuite cette dernière. L'effet qui s'en résulte est que l'ampli-op va commuter entre 0 et 15 V tant que l'intensité dans le circuit primaire sera trop élevée.

En pratique, excepté lors des tests de fonctionnement lors de l'intégration de la résistance r de protection dans notre circuit électrique, l'effet ne s'est jamais produit. En effet, nous

avons dimensionné le montage électrique pour que, précisément, cela ne se produise pas en fonctionnement normal.

3.3.4 Câblage de la bobine d'allumage : primaire et secondaire

Le câblage de la bobine d'allumage n'est pas très complexe et est présenté au chapitre précédent en Figure 2.4. En effet, au primaire, nous avons simplement câblé la bobine d'allumage en série avec le générateur de tension de 15 V, une résistance R de 5 Ω permettant de dissiper des puissances allant jusqu'à 100 W, le transistor IGBT et la résistance r de protection par court-circuitage. Cela nous donne alors le schéma de principe suivant :

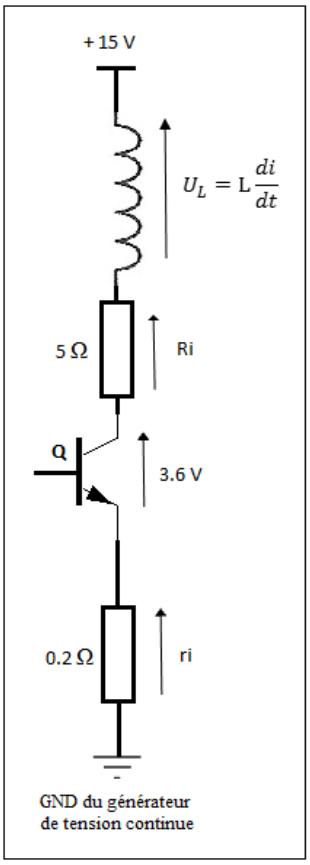

Figure 3.9 Schéma de principe au primaire

La valeur de la tension aux bornes du transistor de 3.6 V est donnée dans sa fiche technique (2008, p. 1) sachant qu'on est ici dans une utilisation en mode saturation. On obtient alors l'équation différentielle du premier ordre avec second membre décrivant le courant i :

$$\mathrm{L}\frac{di}{dt} + (r + R)i - 11{,}4 = 0 \tag{3.3}$$

Au secondaire, nous avons câblé la bobine dans les mêmes conditions qu'elles le sont dans les automobiles, c'est-à-dire avec les câbles adaptés à cela. Nous y avons simplement apporté une modification afin de pouvoir permettre de placer nos électrodes pour tester le plastique. Le chapitre suivant nous fournira plus de détails quant à cette partie de notre étude.

3.4 Synthèse de la conception et de la programmation électronique

À travers ce chapitre, nous avons expliqué comment nous avons conçu la partie électronique programmable ainsi que le montage électrique de notre banc d'essai. Cette étude nous a menés au schéma électrique de notre installation visible en Annexe II, Figure-A II-1.

Avec ce montage, nous sommes à présent capables de générer des impulsions à haute tension (de l'ordre de 10 kV en fonction de la bougie utilisée) à une fréquence d'environ 488 Hz. Dans le chapitre suivant, nous allons détailler le montage à électrodes utilisé afin d'effectuer nos tests ainsi que la bougie d'allumage dont nous nous servons. Nous présenterons aussi l'interface utilisateur développée permettant le contrôle du banc d'essai.

Rapport-Gratuit.com

CHAPITRE 4

MONTAGE À ÉLECTRODES ET INTERFACE UTILISATEUR

Ce chapitre va nous permettre de présenter notre montage à électrodes. Ce montage nous a permis de réaliser les tests de claquage sur les pièces en plastique. Nous allons aussi y décrire l'interface utilisateur conçue ayant permis de commander le banc d'essai.

4.1 La bougie d'allumage

La bougie d'allumage dont nous nous servons dans notre banc d'essai est de marque NGK GR4. Elle possède une seule électrode masse comme nous le montre la Figure 4.1 ci-dessous :

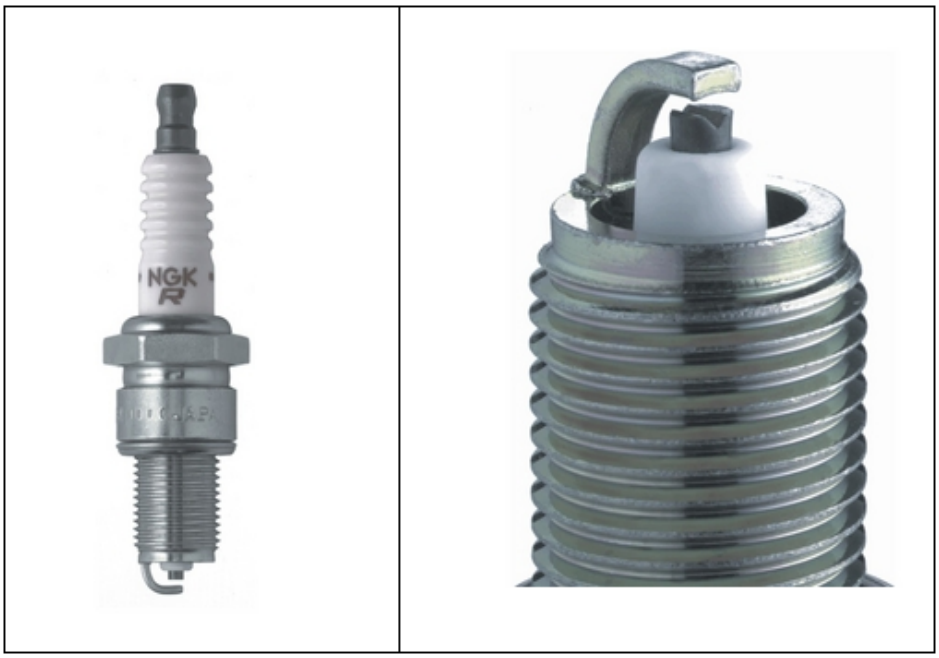

Figure 4.1 Bougie d'allumage NGK GR4

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Afin d'augmenter la tension aux bornes de la bougie, nous avons augmenté l'écartement des électrodes. Nous possédons ainsi un écartement inter-électrodes de 2.5 mm.

4.2 Principe du montage à électrodes

Lors de notre revue de la littérature, nous avions présenté quelques principes de montages à électrodes et démontré l'intérêt de ces derniers. Il s'agissait donc d'utiliser ces connaissances déjà existantes sur de tels montages afin de les appliquer et les adapter à notre banc d'essai.

4.2.1 Morphologie de la pièce à tester

La première chose que nous devions étudier afin de réaliser notre montage à électrodes était la morphologie de la pièce que nous souhaitions tester dans le but de pouvoir, par la suite, mettre en place le montage adéquat. La Figure 4.2 ci-dessous modélise la pièce sur laquelle nous avons effectué les essais diélectriques :

Figure 4.2 Modélisation de l'échantillon à tester

La partie de l'échantillon que nous avons testé se trouve être le cylindre situé au centre de la pièce, c'est-à-dire sa fraction intérieure ainsi que sa fraction extérieure. La fraction extérieure constitue un cylindre simple. En revanche, la fraction intérieure forme un cylindre avec épaulement, ce qui nous a obligés à adapter l'électrode interne au cylindre.

4.2.2 Morphologie des électrodes cylindre-cylindre

Lors de notre revue de la littérature, nous avions exposé les différents systèmes d'électrodes couramment utilisés dans le domaine des tests diélectriques. L'un de ces systèmes présentait un montage avec une configuration d'électrodes cylindre-cylindre. C'est Vincent (2002, p. 40) qui, dans sa thèse, nous proposait un tel montage. La configuration était alors la suivante :

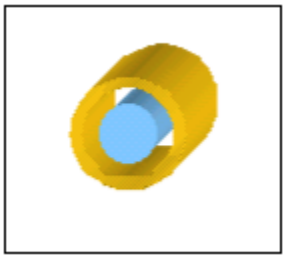

Figure 4.3 Système à électrodes en configuration cylindre-cylindre
Adaptée de Vincent (2002, p. 40)

Cependant, après avoir effectué les premiers tests sur les plastiques avec une telle configuration d'électrodes, les résultats se sont avérés insatisfaisants. Nous avons donc décidé, à la suite de cela, de choisir une autre configuration d'électrodes pour notre montage.

4.2.3 Morphologie des électrodes couteau-cylindre

Une autre configuration possible et qui par la suite a fait ses preuves était la configuration d'électrodes couteau-cylindre. À nouveau, c'est Vincent (2002, p. 40) qui, dans sa thèse, proposait ce montage. Nous avons donc décidé d'adapter cette configuration afin de l'ajuster à notre banc d'essai. Dans notre cas, nous avons ainsi choisi d'utiliser une électrode à cylindre creux d'une part, et une électrode en couteau avec trois lames d'autre part afin d'obtenir la configuration comme suit :

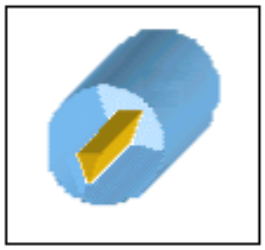

Figure 4.4 Système à électrodes en configuration couteau-cylindre
Adaptée de Vincent (2002, p. 40)

Afin d'adapter la configuration présentée en Figure 4.4, l'une des électrodes devait envelopper le cylindre extérieur de notre pièce à tester (Figure 4.2) tandis que l'autre devait se placer en couteau à l'intérieur du cylindre tout en s'ajustant à l'épaulement présent dans ce dernier. Dans son étude, Vincent (2012), nous expliquait qu'il avait utilisé ce type de montage pour générer des décharges couronnes entre les deux électrodes.

Nous avons donc conçu les électrodes de la façon suivante, comme l'illustre la Figure 4.5 :

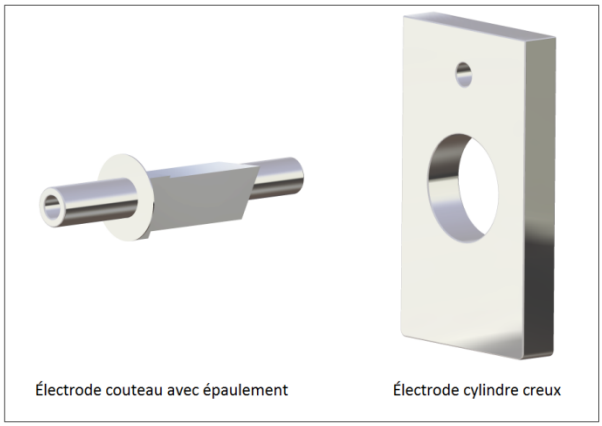

Figure 4.5 Modélisation des électrodes utilisées sur notre banc d'essai

On peut observer l'épaulement présent sur l'électrode à couteaux. Nous avons conçu l'électrode ainsi afin qu'elle puisse s'adapter parfaitement au cylindre intérieur de la pièce à tester. Aussi, il y a trois couteaux présents sur l'électrode. En fait, c'est dans un souci de

simplicité de fabrication et de stabilité de l'électrode lors des tests que nous l'avons conçue ainsi. Nous avons fabriqué les électrodes avec de l'aluminium puisque ce dernier est un très bon conducteur électrique lorsqu'il est de bonne qualité et pur.

Les figures ci-dessous nous permettent de visualiser l'assemblage et la disposition des électrodes sur la pièce à tester :

Figure 4.6 Modélisation de l'échantillon et des électrodes désassemblés

Figure 4.7 Modélisation de l'échantillon et des électrodes assemblés

Quant aux vues en coupe ci-dessous, elles nous permettent d'observer les contacts créés entre les électrodes et la pièce à tester :

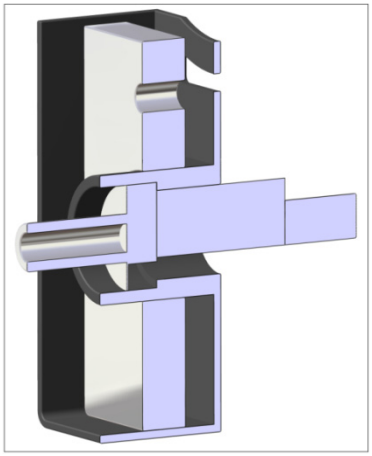

Figure 4.8 Vue en coupe latérale de l'échantillon et des électrodes

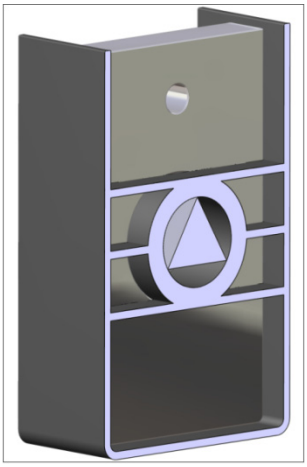

Figure 4.9 Vue en coupe verticale de l'échantillon et des électrodes

Grâce à ces vues en coupe, on peut correctement observer le contact entre chaque électrode et la pièce à tester. Aussi, nous avons fabriqué les électrodes de façon à ce qu'elles soient serrées avec la pièce, mais qu'il soit toutefois possible de les positionner et de les enlever à la main.

4.2.4 Intégration des électrodes dans le circuit électrique du banc d'essai

Comme nous le montre le schéma électrique (Annexe II, Figure-A II-1), nous avons câblé les électrodes en parallèle à la bougie d'allumage. La Figure 4.10 nous permet de visualiser la façon dont nous avons procédé pour cela :

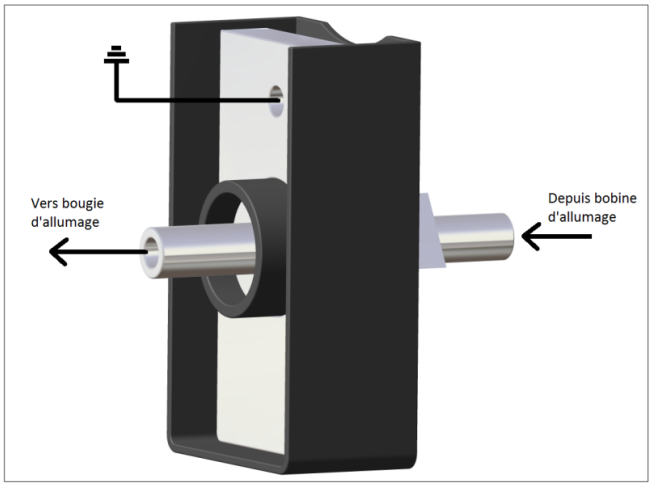

Figure 4.10 Câblage des électrodes couteau-cylindre

4.3 L'interface utilisateur

Nous avons voulu concevoir une interface utilisateur permettant de contrôler notre banc d'essai, c'est-à-dire capable de démarrer et d'interrompre les tests ainsi que de contrôler la durée de ces derniers. Afin de créer cette interface utilisateur, nous nous sommes servis de la plateforme de développement graphique LabVIEW développée par National Instruments (NI). Cette plateforme de développement est celle qui nous a semblé la plus appropriée afin

de concevoir notre interface utilisateur puisque NI propose un environnement permettant d'obtenir une interface, une fois terminée, simple et ergonomique pour son utilisateur.

4.3.1 Algorithme de programmation de l'interface utilisateur

L'algorithme ci-dessous présente la façon dont nous avons construit et géré le programme de notre interface utilisateur :

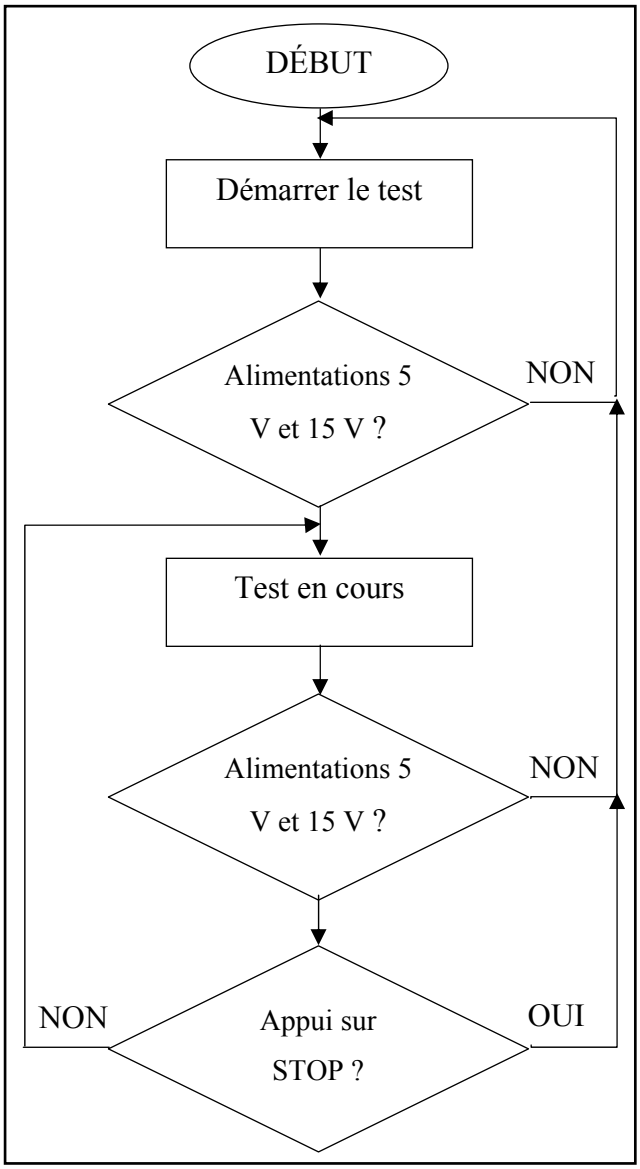

Figure 4.11 Algorithme de l'interface utilisateur

4.3.2 La carte d'acquisition USB 6009

Afin de pouvoir effectuer les différents transferts et acquisitions de données, nous avons utilisé la carte d'acquisition USB 6009 conçue par NI (Figure 4.12). Cette carte d'acquisition est facile d'utilisation et d'installation puisqu'il suffit de la brancher à l'ordinateur gérant l'interface utilisateur via un port USB pour profiter pleinement de ses attributs.

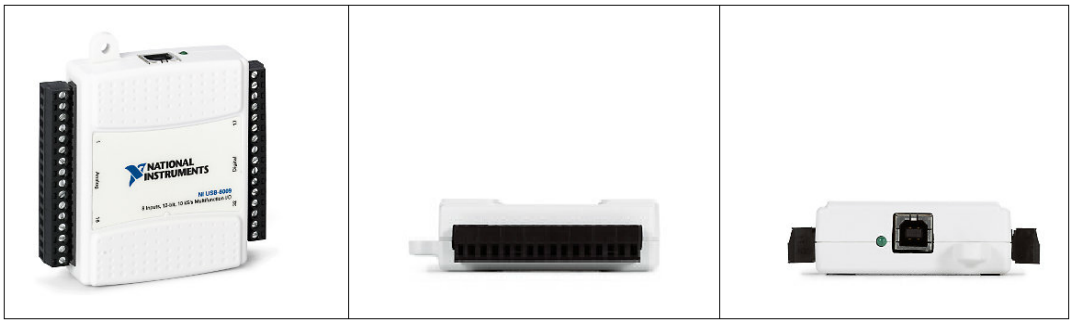

Figure 4.12 Carte d'acquisition USB 6009 de NI

Nous avons dû effectuer deux types d'échanges de données via cette carte d'acquisition :

- l'acquisition de données afin de contrôler si l'alimentation 5 V du microcontrôleur et l'alimentation 15 V du générateur de tension sont correctement établies;
- le transfert de données afin d'autoriser le départ du test lorsque toutes les conditions le permettant sont réunies.

Aussi, nous avons géré ces données comme des données de type booléen; cela implique que nous nous sommes servis des entrées/sorties numériques mises à disposition sur la carte USB 6009. La configuration de ces dernières se fait à partir de l'assistant DAQ présent dans les fonctions proposées par la plateforme LabVIEW.

Cette carte d'acquisition dispose, elle aussi, de sa propre masse électrique. Ainsi, tout comme nous l'avons fait pour le microcontrôleur présent dans notre montage électrique, nous avons

utilisé des optocoupleurs lors de son câblage afin de protéger les appareils sensibles tels que l'ordinateur.

4.3.3 Visuel de l'interface utilisateur

La Figure 4.13 ci-dessous nous présente l'interface utilisateur permettant le contrôle de notre banc d'essai :

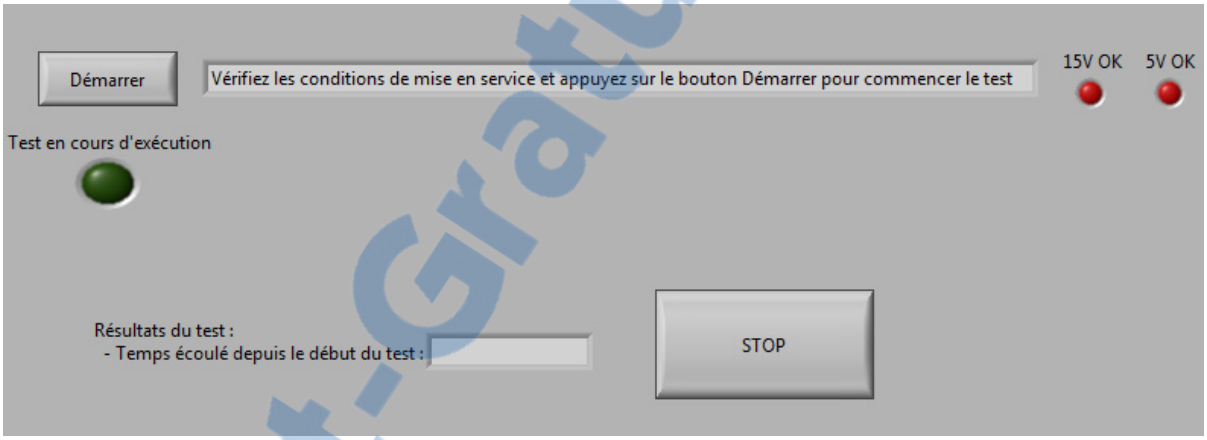

Figure 4.13 Interface utilisateur du banc d'essai

Le principe de cette interface est simple, elle nous permet de démarrer et de mettre fin au test sur le plastique et nous donne aussi la durée de celui-ci. Ainsi, lorsque les conditions décrites dans l'algorithme (Figure 4.11) sont réunies, le test démarre; les voyants lumineux (vert et rouge) nous indiquent le bon déroulement du test et l'état des alimentations de 5 V et de 15 V. La durée écoulée depuis le début du test est aussi indiquée en temps réel dans l'encadré prévu à cet effet. En Annexe III, Figure-A III-1, nous pouvons observer le programme en langage graphique nous ayant permis d'obtenir cette interface utilisateur.

Rapport-Gratuit.com

4.4 Détection électronique du claquage diélectrique

Via cette interface utilisateur, nous avons en réalité le contrôle sur deux entrées et une sortie. En effet, l'une des entrées permet le contrôle du bon fonctionnement de l'alimentation du microcontrôleur de 5 V et l'autre gère celle de 15 V. La sortie, quant à elle, permet de commander le départ de la MLI générée par le microcontrôleur.

Cependant, notre interface ne permet pas de commander de façon automatique l'arrêt du test, c'est-à-dire de stopper ce dernier si le claquage de la pièce en plastique est atteint. Cela est dû au fait que lors de nos tests sur les plastiques, le claque diélectrique n'a pu être atteint complètement; les résultats obtenus sont présentés et expliqués plus en détail dans le chapitre suivant. L'interface utilisateur n'est donc pas conçue pour gérer la rupture diélectrique et ainsi stopper le test. Cependant, une solution au niveau matériel a été développée afin de détecter électroniquement le claquage diélectrique de la pièce en plastique. Nous discutons de cette solution plus loin dans nos travaux de rédaction.

4.4.1 Le bruit électrique

Lorsque nous avons effectué les premiers tests avec notre banc d'essai, nous avons éprouvé quelques difficultés à observer le signal de sortie à l'aide de l'oscilloscope. En effet, le champ électromagnétique induit par la bougie d'allumage affectait notre oscilloscope de façon considérable et produisait du bruit[6] sur le signal observé. Cela était d'autant plus vrai lorsque, lors de nos travaux, nous avions procédé à des tests à l'aide d'un dispositif à

---

[6] Le bruit électrique est défini par The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms et repris par Vasilescu (2005) comme les perturbations indésirables superposées sur un signal utile qui tendent à obscurcir son contenu d'information. Cette définition est polyvalente, car elle s'applique à la fois au bruit intrinsèque et extrinsèque.

électrodes pointe-plan (Figure 4.14) en remplacement de la bougie d'allumage dans notre montage.

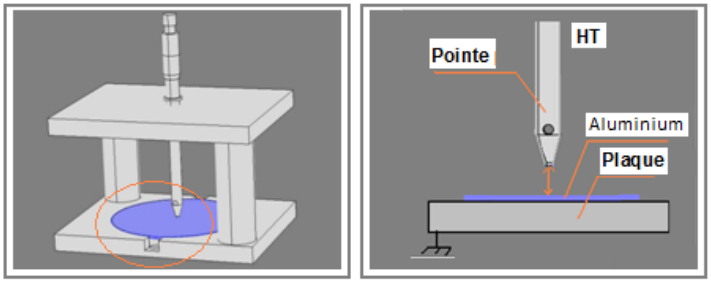

Figure 4.14 Système à électrodes pointe-plan
Adaptée de Mebarki (2012, p. 59)

Ce dispositif nous avait permis d'obtenir des arcs électriques à des tensions bien plus importantes que celles obtenues avec la bougie d'allumage. En effet, on parlait alors de tensions de l'ordre de 40 kV. Cependant, l'architecture de ce système à électrodes produisait un champ électromagnétique allant jusqu'à perturber l'ordinateur contrôlant le banc d'essai. L'électrode en pointe, réglable en hauteur, agissait comme une antenne et le seul moyen que nous aurions eu à notre disposition afin de protéger les appareils et composants avoisinants contre ce champ électromagnétique aurait été de placer ce système à électrodes pointe-plan dans une cage de Faraday. Nous avons par la suite abandonné ce système à électrodes pour revenir à la bougie d'allumage puisque les tensions obtenues avec ce dernier étaient bien trop importantes. Cela invalidait alors nos résultats puisque les conditions de tests étaient disproportionnées par rapport aux conditions réelles.

4.4.2 Filtre passe-bas analogique

La solution employée nous ayant permis d'obtenir un signal exploitable permettant de mettre en évidence le claquage diélectrique a été d'utiliser un filtre passe-bas (Figure 4.16). En effet, la fréquence nous intéressant est la fréquence de la MLI, c'est-à-dire environ 488 Hz. Cette fréquence est considérée comme une basse fréquence et a constitué la base de travail pour déterminer la fréquence de coupure f_c de notre filtre passe-bas. Nous avons donc commencé

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

par utiliser le filtre passe-bas le plus simple qui soit à mettre en place afin de filtrer le bruit sur notre signal. Il s'agissait du filtre passe-bas passif analogique d'ordre 1 composé d'un circuit avec une résistance R et un condensateur C (Figure 4.15) :

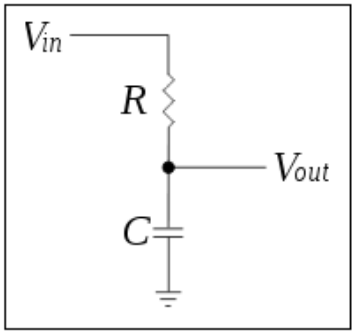

Figure 4.15 Filtre passe-bas passif analogique d'ordre 1 avec circuit RC
Adaptée de Mangiante (2005, p. 46)

Le signal composé du bruit est le signal d'entrée V_{in} et le signal filtré est la sortie V_{out}. Nous avons alors dû déterminer les valeurs de la résistance R et du condensateur C afin de calibrer correctement notre filtre passe-bas. Afin de réaliser cela, nous avons pris comme point de départ la fréquence de coupure f_c que nous voulions placer à environ 500 Hz puisque la fréquence avec laquelle nous avons travaillée est celle de la MLI, c'est-à-dire 488 Hz. Le filtre réalisé étant un passe-bas, il a fallu placer la fréquence de coupure à une fréquence supérieure à celle que nous souhaitons conserver afin de, justement, préserver cettedite fréquence. Nous avons donc déterminé les valeurs de R et C à partir de la relation suivante :

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \tag{4.1}$$

Nous connaissons f_c (500 Hz) et nous avons fixé C à 100 nF. Nous avons donc pu déterminer R de la façon suivante :

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C} = \frac{1}{2\pi . 500.10^{-7}} = 3183\,\Omega \tag{4.2}$$

Nous avons alors arrondi R à 3000 Ω pour nous cadrer sur ce qui existe dans la réalité en terme de composants électroniques sachant que notre valeur pour la fréquence de coupure ne devait pas obligatoirement être une valeur trop rigoureuse. Nous avons donc obtenu une constante de temps τ :

$$\tau = RC = 3000.10^{-7} = 3.10^{-4}\ s \tag{4.3}$$

Et donc une fréquence de coupure f_c qui vaut :

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi . 3000.10^{-7}} = 531\ Hz \tag{4.4}$$

Cette valeur reste valide puisqu'elle est supérieure à la fréquence de 488 Hz que nous cherchons à conserver. Le schéma électrique de ce montage avec filtre passe-bas est donné par la Figure 4.16 ci-dessous :

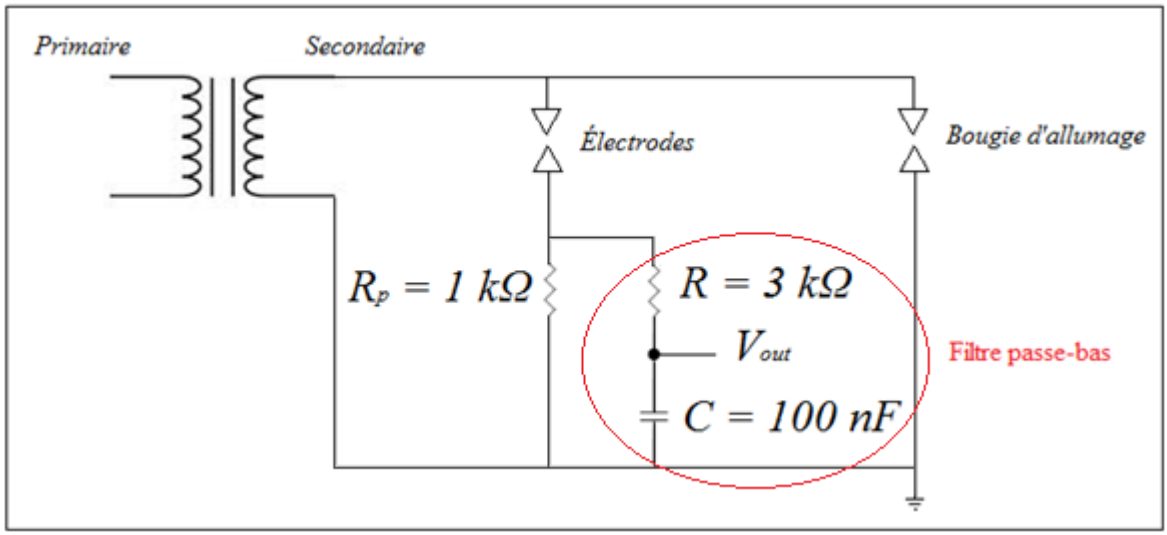

Figure 4.16 Schéma électrique du circuit secondaire de la bobine d'allumage avec mise en évidence du filtre passe-bas analogique du 1er ordre

Ce schéma électrique nous présente donc le montage de la bobine d'allumage au secondaire avec l'intégration du filtre passe-bas analogique que nous avons mis en place. Le schéma électrique complet du banc d'essai est donné en Annexe II, Figure-A II-1.

Les résultats obtenus à l'oscilloscope avec ce montage sont présentés ci-dessous. Une première série d'images nous présente alors le signal obtenu à l'oscilloscope sans la mise en place de ce filtre passe-bas, sans claquage du plastique et avec claquage du plastique. Et une seconde série d'images illustre le signal obtenu après l'intégration de ce filtre passe-bas, à nouveau sans claquage du plastique et avec claquage du plastique.

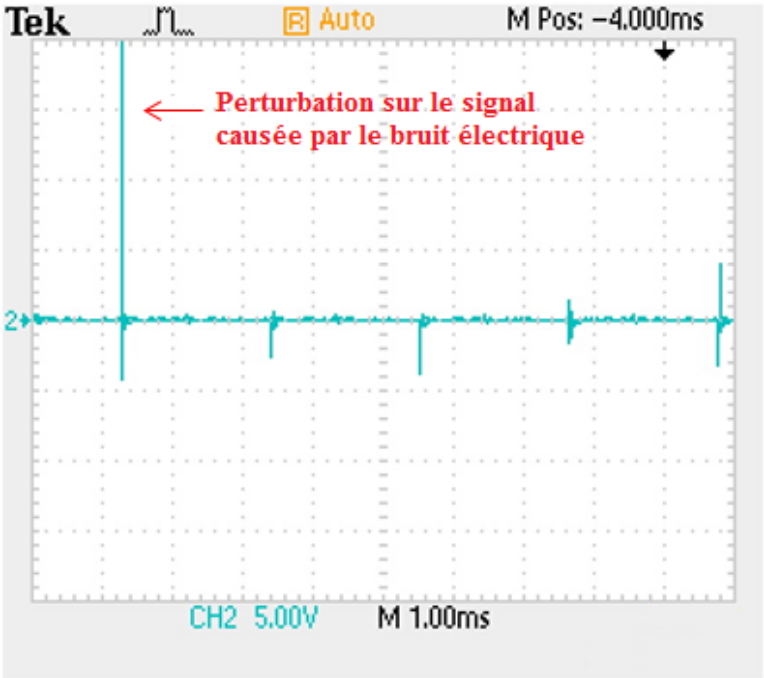

Figure 4.17 Signal de sortie sans filtre passe-bas et sans claquage du plastique

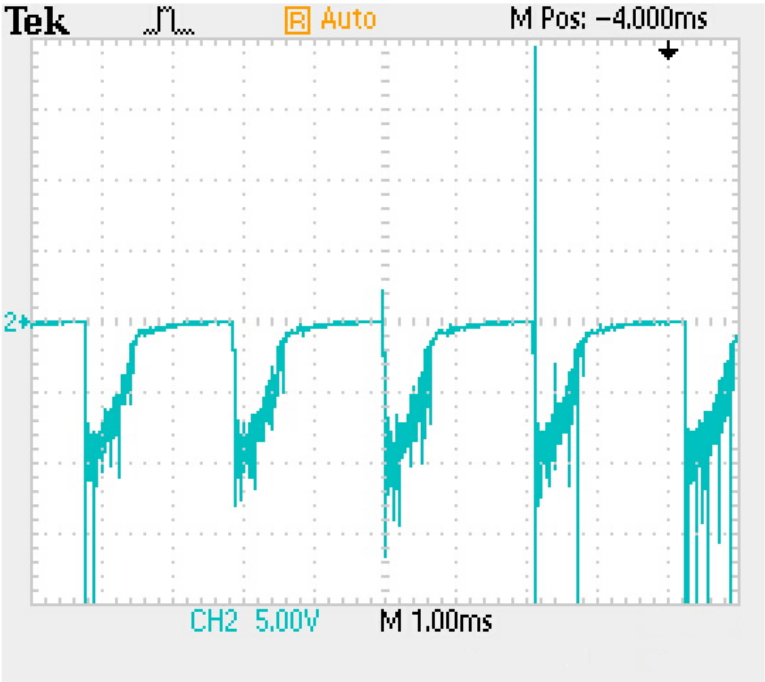

Figure 4.18 Signal de sortie sans filtre passe-bas et avec claquage du plastique

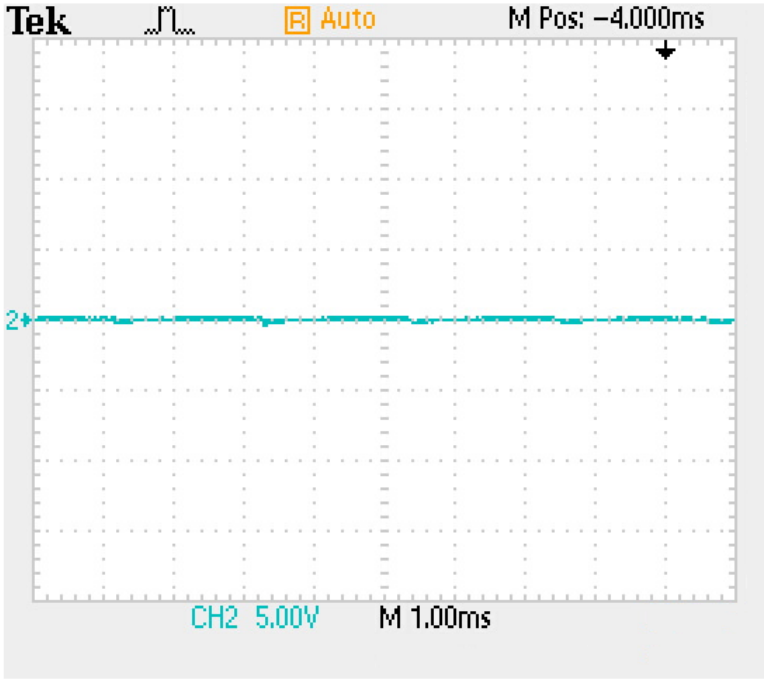

Figure 4.19 Signal de sortie avec filtre passe-bas et sans claquage du plastique

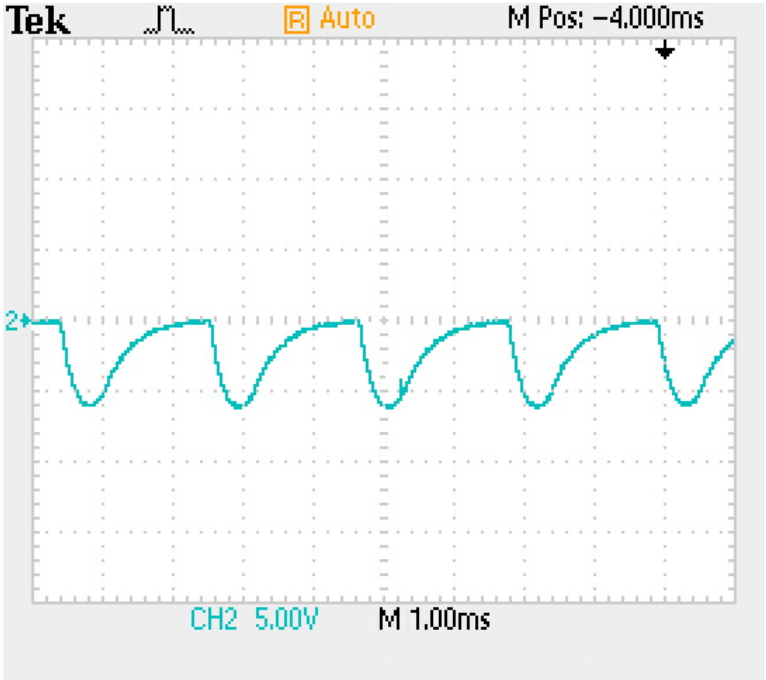

Figure 4.20 Signal de sortie avec filtre passe-bas et avec claquage du plastique

La raison pour laquelle nous n'avons pas effectué de filtre passe-bas actif ou d'ordre supérieur est parce que le filtre passe-bas passif analogique de 1er ordre nous permet d'obtenir un résultat suffisant quant à l'exploitation du signal filtré obtenu. En effet, avec un tel signal, nous sommes à présent capables de détecter le claquage diélectrique du plastique et d'exploiter ce signal afin de programmer l'arrêt automatique du test via LabVIEW. Cette dernière partie fera l'objet de recommandations.

Aussi, il est intéressant de remarquer qu'un temps de charge est présent sur les diagrammes où il y a le claquage diélectrique, avec ou sans filtre passe-bas. Cela s'explique par le fait que le filtre passe-bas ne joue aucun rôle dans ce temps de charge. En effet, ce phénomène est induit par les électrodes couteau-cylindre entourant le plastique à tester qui créent un effet capacitif à leurs bornes; d'où la forme des signaux obtenus sur les figures ci-dessus.

4.5 Synthèse du montage à électrodes et de l'interface utilisateur

À travers ce chapitre, nous avons présenté la morphologie des électrodes utilisées afin de réaliser nos tests diélectriques sur les différents plastiques. Ainsi, après avoir testé, dans un premier temps, des électrodes dans une configuration cylindre-cylindre, nous avons préféré une configuration couteau-cylindre. Cette dernière procure de meilleurs résultats puisque les pointes formées par les couteaux permettent une meilleure accumulation des charges à leurs extrémités à cause du phénomène d'effet de pointe[7]. Nous avons donc fabriqué ces électrodes afin qu'elles s'adaptent parfaitement à la pièce que nous souhaitons tester en tenant compte, pour cela, de sa morphologie. Nous avons donc ainsi pu mettre en place notre montage à électrodes et l'intégrer à notre banc d'essai.

Lorsque le montage à électrodes fut opérationnel, nous avons développé l'interface utilisateur contrôlant notre banc d'essai via la plateforme de développement graphique LabVIEW. Cette interface nous permet de démarrer et stopper les tests tout en contrôlant les paramètres importants au bon déroulement de ces derniers. Le Groupe Lavergne voulant mettre en évidence la capacité de leurs produits à résister aux contraintes électriques, l'interface utilisateur nous donne donc la durée du test effectué permettant ainsi d'évaluer la qualité de ce dernier.

Au cours des différents essais que nous avons effectués afin de déterminer le meilleur montage à électrodes menant à celui intégré à notre banc d'essai, nous avons utilisé un montage à électrodes pointe-plan en remplacement de notre bougie d'allumage. Ce montage ne s'est pas avéré concluant puisque, en plus d'émettre un champ électromagnétique perturbant tous nos appareils électroniques avoisinants, il créait une tension électrique trop importante à ses bornes, cette tension étant de l'ordre de 40 kV. Nous avons donc adopté

---

[7] L'effet de pointe est un phénomène physique expliquant le fait que le champ électrique au voisinage d'une pointe d'un conducteur chargée est plus fort que dans le reste de ce conducteur.

finalement la bougie d'allumage en tant que montage à électrodes principal de notre circuit électrique couplé au montage à électrodes couteau-cylindre afin de tester le plastique. Aussi, afin de réduire le bruit causé par notre bougie d'allumage sur le signal à observer, nous avons intégré un filtre passe-bas à notre montage. Ce filtre nous permet d'obtenir un signal exploitable pour la détection électronique du claquage diélectrique du plastique.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les différents résultats obtenus après des séries de tests effectués sur les différents plastiques mis à notre disposition. Une analyse de ces résultats sera alors proposée.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS DES TESTS DE CLAQUAGE DIÉLECTRIQUE

À travers ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus lors de nos tests de claquage diélectrique. Nous exposons également les différentes procédures préliminaires ayant mené au final au banc tel qu'il est décrit tout au long de cet écrit. Enfin, nous analysons les résultats obtenus afin de pouvoir émettre des hypothèses quant à la caractérisation des propriétés diélectriques des matériaux composites à base de PET que nous avons testés.

5.1 Configurations matérielles préliminaires

Avant de réaliser les tests avec le montage final dont nous avons fait la description tout au long de cette étude, nous avons essayé différentes configurations matérielles au niveau du circuit électrique de la bobine d'allumage au secondaire.

5.1.1 Montage avec la structure pointe-plan à réglage millimétrique

Les premiers tests que nous avons effectués ont été réalisés à l'aide d'un montage à électrodes dont la structure était en pointe-plan et à réglage millimétrique. Ce montage prenait le rôle de la bougie d'allumage dans notre banc d'essai et comme il disposait d'un réglage millimétrique, nous pouvions régler l'écartement entre les deux électrodes de façon précise.

Un aspect qu'il est important de comprendre est que nous avions choisi ce type de montage pour nos tests, c'est-à-dire de placer le plastique à tester entre deux électrodes et de câbler en parallèle une autre paire d'électrodes, pour deux raisons. La première était par souci de reproductivité de ce que nous retrouvions dans la réalité, afin d'obtenir une configuration quasi similaire à ce que nous pouvons observer dans les moteurs d'automobiles. Et la

Rapport-Gratuit.com

seconde était d'assurer le claquage de façon certaine aux bornes d'une paire d'électrodes dans montage. En effet, il fallait permettre à la bobine d'allumage de se décharger à chaque cycle. Autrement, cela aurait pu endommager le matériel ou bien causer des formations d'arcs électriques dans l'air par ionisation de celle-ci, ce phénomène pouvant être dangereux.

La Figure 5.1 ci-dessous présente la structure, à électrodes pointe-plan, utilisée lors de nos premières séries de tests sur les plastiques :

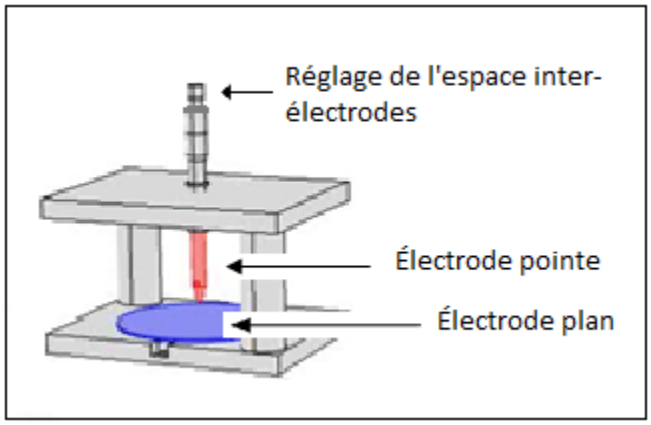

Figure 5.1 Montage, à électrodes pointe-plan, utilisé pour les premiers essais

Nous avions déjà expliqué dans le chapitre précédent que nous avions utilisé ce type de montage lors des premiers tests effectués. Nous avions alors soulevé les problèmes liés au champ électromagnétique créé par ce système induisant ainsi du bruit sur le signal que nous voulions exploiter.

Cependant, la raison principale nous ayant mené à exclure ce type de montage pour réaliser nos tests était le fait que les décharges couronnes créées aux bornes des électrodes, utilisées pour tester le plastique, étaient trop importantes. En effet, les décharges couronnes sont un phénomène que nous avions expliqué lors de notre revue de la littérature. Une lumière bleutée était visible au niveau de l'espace inter-électrodes avec plus ou moins d'intensité en fonction de la tension aux bornes des électrodes du montage pointe-plan.

Figure 5.2 Mise en évidence des décharges couronnes lors des tests

Ci-dessus, la Figure 5.2 nous présente l'endroit où l'on pouvait observer l'effet bleuté durant nos tests; cette lueur bleutée étant causée par les décharges couronnes. Plus la tension générée aux bornes du montage à électrodes pointe-plan était importante, plus cette lueur était visible à l'œil nu; cette tension croissant avec l'augmentation de la distance entre les deux électrodes pointe-plan.

Dans les phases critiques de nos tests, lorsque nous avons écarté l'électrode pointe de l'électrode plane au maximum, les décharges couronnes étaient telles que nous avons pu observer des arcs électriques se former entre l'électrode couteau et l'électrode plane en contournant la pièce à tester.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure 5.3 Chemin emprunté par le courant pour la formation d'arcs électriques lors des tests à tension maximale

La Figure 5.3 permet de visualiser la façon dont les arcs électriques se propageaient d'une électrode à l'autre sans passer à travers le plastique de la pièce testée; le claquage électrique n'avait donc pas lieu avec ce procédé.

Ainsi, ce montage nous aura permis d'obtenir la tension maximale atteinte lors de nos tests avec notre banc d'essai. Cependant, cela n'était pas le but de notre étude puisque nous nous écartions alors trop des conditions réelles où les tensions générées aux bornes des électrodes des bougies d'allumage sont bien moindres. Aussi, ce système à électrodes pointe-plan produisait de forts champs électromagnétiques qui perturbaient jusqu'à notre ordinateur de contrôle. Un moyen d'empêcher cela aurait été de créer une cage de Faraday capable d'isoler notre système et ainsi retenir ces champs électromagnétiques. Cependant, nous n'avons pas développé un tel système puisque nous avons exclu ce montage. De plus, nous n'avons pas réussi à atteindre le claquage diélectrique du plastique lors des tests effectués avec le banc d'essai configuré de cette façon.

5.1.2 Montage avec la bougie d'allumage et une distance inter-électrodes standard

Après avoir effectué plusieurs séries de tests avec le montage à électrodes pointe-plan et l'avoir invalidé pour les raisons expliquées précédemment, nous avons remplacé ce dernier par une bougie d'allumage d'automobile. Cette bougie d'allumage était de marque NGK GR4 et est illustrée au chapitre précédent.

Lors de nos premiers tests effectués avec cette dernière, nous n'avions pas modifié sa distance inter-électrodes et avions donc travaillé avec l'écartement standard d'une valeur de 0.8 mm. Après des tests sur des plastiques totalisant une durée dépassant sept jours sans interruption chacun, les résultats obtenus étaient peu probants. En effet, à la fin de ces tests, le claquage diélectrique n'avait pas été atteint. Aussi, l'état d'avancement de la dégradation du plastique, face aux contraintes électriques, était bien plus faible qu'avec le montage adopté par la suite.

5.2 Configuration matérielle finale

Nous venons de détailler deux types de montage différents que nous avons mis en place avant de mener à la solution retenue au finale. Nous ne possédions pas de solution prédéfinie au départ, nous savions simplement que nous devions obtenir un montage final respectant certaines conditions telles que le fait de rester représentatif de la réalité afin de permettre la validation des résultats obtenus.

Le montage au circuit secondaire de la bobine d'allumage que nous avons retenu pour réaliser notre banc d'essai complet est détaillé tout au long de cette étude à travers les différents chapitres. Cependant, il est bon de rappeler quelle est sa structure avant de présenter les résultats obtenus avec ce dernier. La synopsis ci-dessous nous présente le matériel présent dans le circuit secondaire de la bobine d'allumage de notre banc d'essai et la façon dont les éléments ont été interconnectés :

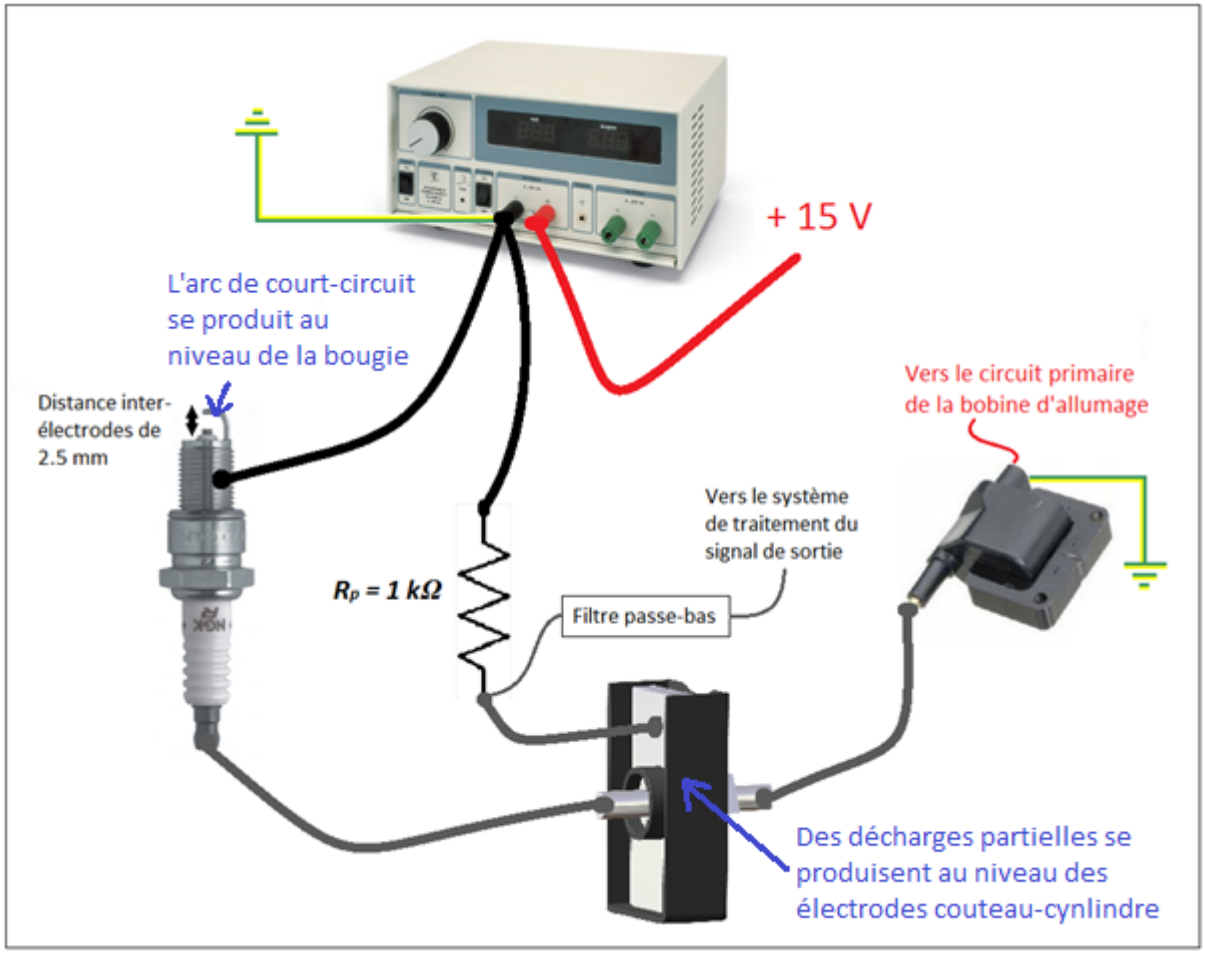

Figure 5.4 Synopsis du montage du circuit secondaire de la bobine d'allumage de notre banc d'essai

Nous avons câblé la masse de notre générateur de tension à la Terre afin de ne pas créer une masse flottante[8] avec la borne négative du générateur, ce qui aurait pu engendrer des potentiels trop élevés entre la Terre et la borne positive du générateur. Il s'agit en fait de sécuriser un maximum notre banc d'essai afin de minimiser les risques pour l'utilisateur puisque nous travaillons avec de hautes tensions. Aussi, la bougie d'allumage présente dans

[8] Tous les circuits électriques possèdent une masse électrique, celle-ci pouvant être reliée à la Terre. Cette masse est dite « flottante » lorsqu'elle n'est pas connectée à la Terre.

notre montage, en plus de permettre d'effectuer des tests représentatifs de la réalité, permet de limiter la tension fournie pas la bobine d'allumage. Nous évitons ainsi tous dommages matériels au niveau de la bobine et diminuons les risques pour l'utilisateur du banc d'essai.

5.3 Résultats des tests et analyses

Avec la configuration matérielle finale que nous avons décrite ci-dessus, nous n'avons jamais réussi à atteindre le claquage diélectrique du plastique et ce, peu importe l'échantillon testé. Cependant, nous avons testé les trois types d'échantillons que le Groupe Lavergne avait mis à notre disposition pendant une durée de sept jours chacun. Nous avons alors pu constater des brûlures à l'endroit où les plastiques étaient en contact avec l'électrode en forme de couteau. Nous avons donc effectué des observations plus abouties à l'aide de différents microscopes (optique et laser) sur les échantillons après les tests. Nous cherchions ainsi à voir si les échantillons de plastique avaient été affectés par les contraintes électriques auxquelles nous les avions soumis. Nous voulions aussi observer si, selon la composition du matériau, un échantillon avait été plus endommagé qu'un autre. Les tests réalisés avec notre banc d'essai ont été effectués durant sept jours sans interruption pour chacun des trois plastiques différents.

5.3.1 Les matériaux candidats

Le Tableau 5.1 ci-dessous nous donne une description sommaire des trois types d'échantillons que nous avons testés. Il nous donne la composition des différents matériaux candidats.

Tableau 5.1 Description sommaire des matériaux candidats
Tiré de Mebarki (2012, p. 31)

Produit	Fibre de verre (%)	Mica (%)	Autres
VNT 340HD	26,5	14 (150S)	PET et additif
VNT 840	26,5	14 (150S)	PET et additif
VNT 340SK	26,5	14 (60S)	PET et additif

Les matériaux candidats étaient donc principalement composés de fibre de verre, de mica et du PET recyclé. La différence entre ces derniers se situait principalement au niveau des proportions des fibres de verre et des flocons de mica dans les matériaux ainsi qu'au niveau de la taille des flocons de mica. Nous avons donc testé les produits nommés VNT 340SK, VNT 340HD et VNT 840.

5.3.2 Observations au microscope optique

Les illustrations ci-dessous nous présentent les observations effectuées à l'aide du microscope optique avec des grossissements de x20 et de x45. Nous avons découpé notre pièce en plastique de façon à pouvoir observer la partie brûlée par les tests à la verticale.

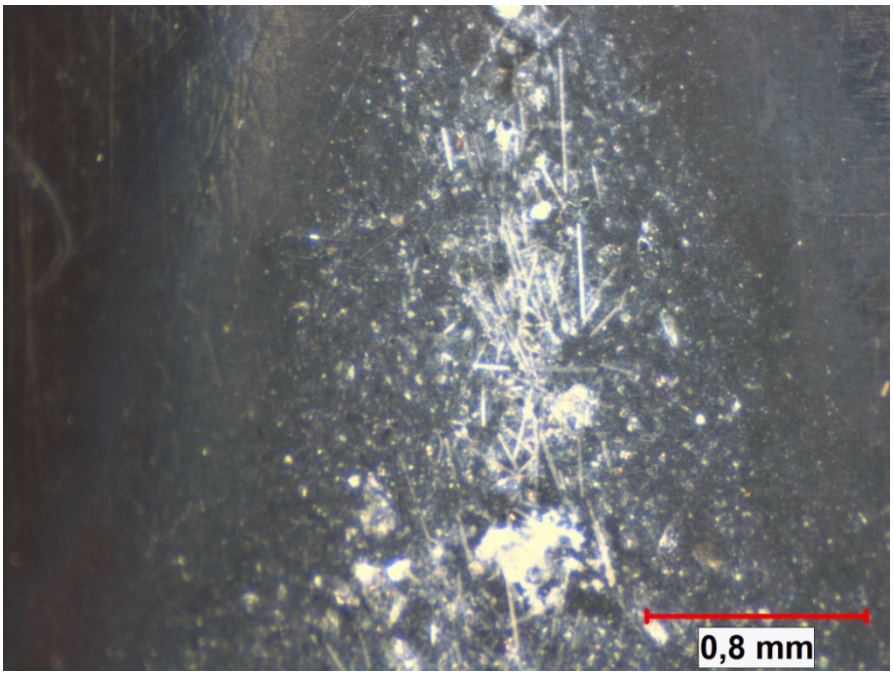

Figure 5.5 VNT 340SK observé avec un grossissement x20

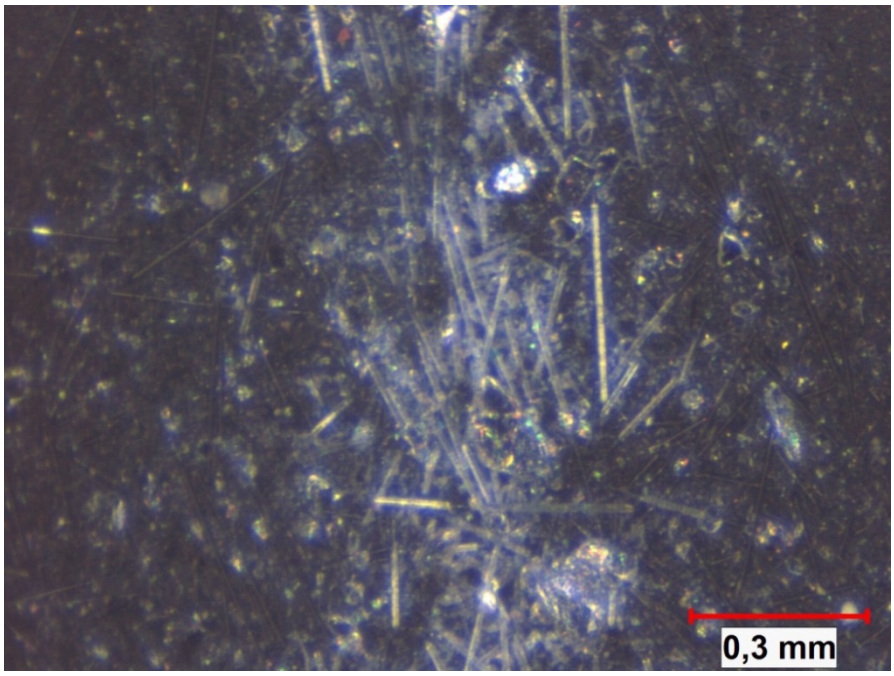

Figure 5.6 VNT 340SK observé avec un grossissement x45

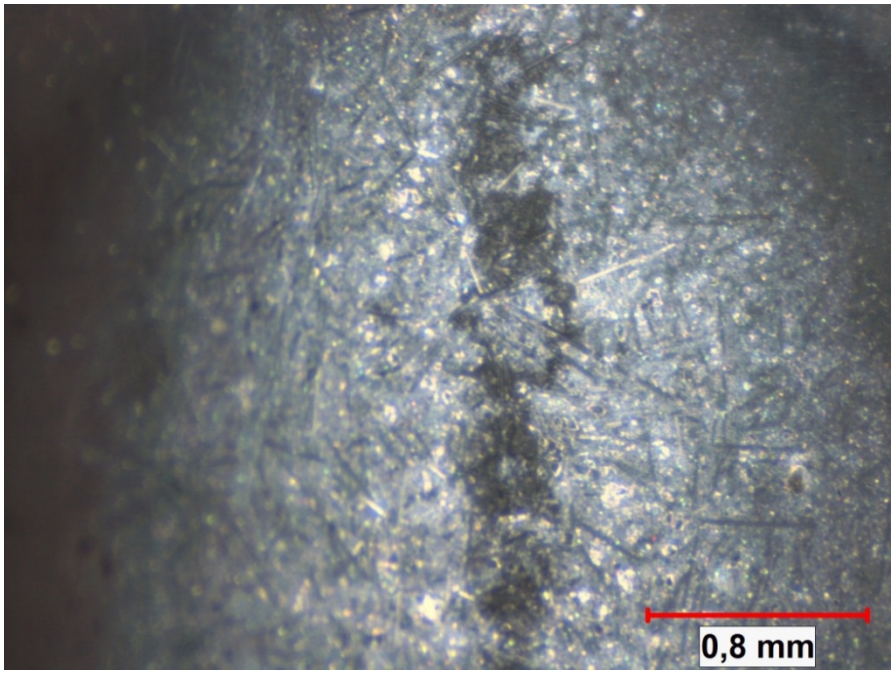

Figure 5.7 VNT 340HD observé avec un grossissement x20

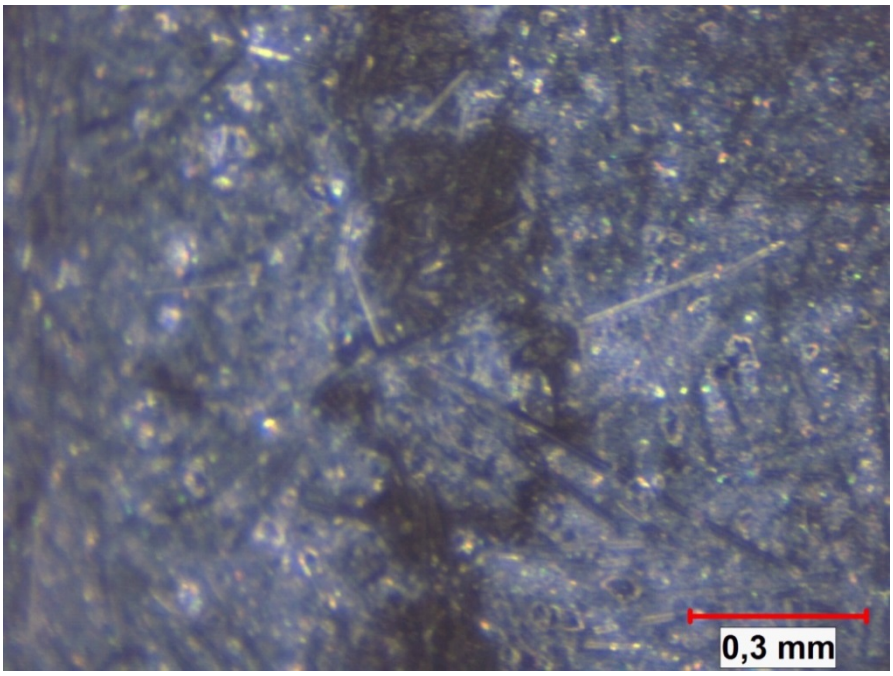

Figure 5.8 VNT 340HD observé avec un grossissement x45

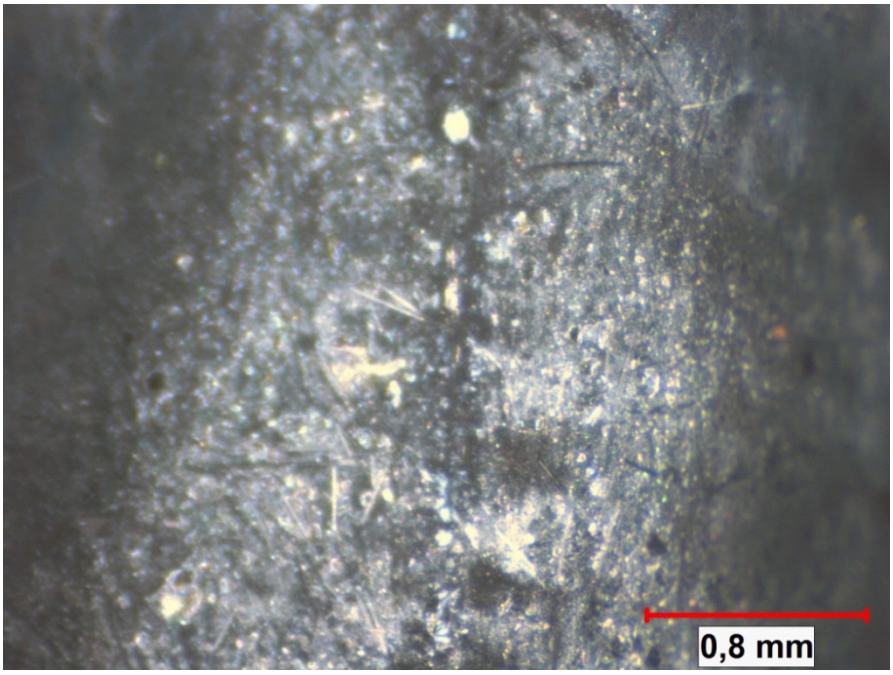

Figure 5.9 VNT 840 observé avec un grossissement x20

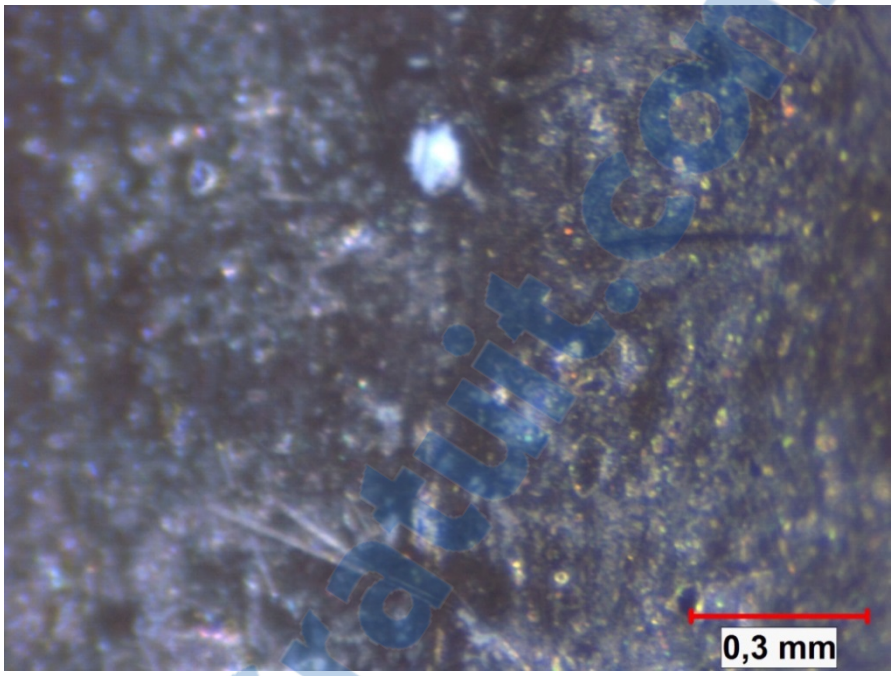

Figure 5.10 VNT 840 observé avec un grossissement x45

À travers ces illustrations, on observe que les plastiques ont été endommagés lors des tests diélectriques que nous avons effectués. En effet, on remarque que le PET a été érodé, laissant apparaître les fibres de verre (brins blancs sur la photographie) et les flocons de mica (flocons blancs sur la photographie). On remarque aussi que la taille des flocons de mica varie. En effet, comme nous l'avons précisé, selon le type de produit, les tailles des flocons ne sont pas les mêmes. Les brins et flocons noirs sur les illustrations représentent les endroits où des fibres de verre ou des flocons de mica ont été arrachés lors des tests à cause de la destruction du PET les entourant.

Même si nous constatons clairement qu'il y a eu une détérioration du plastique avec la destruction du PET recyclé présent dans le boîtier du distributeur, nous ne sommes pas en mesure de déterminer l'étendue de cette destruction. En effet, nous ne pouvons pas déterminer sur quelle distance le PET a été détruit avec le microscope optique; il n'est donc pas possible d'émettre une comparaison entre les différents matériaux candidats à ce stade des observations.

Rapport-Gratuit.com

5.3.3 Observation au microscope laser

Afin d'obtenir un ordre de grandeur de la profondeur de détérioration du plastique, nous avons utilisé le microscope laser LEXT Olympus. Ce microscope nous a permis d'obtenir une image en trois dimensions de l'échantillon que nous avons observé. Nous avons donc voulu obtenir une idée des profondeurs des cavités causées par nos tests sur les plastiques. Les illustrations ci-dessous présentent les images obtenues à l'aide de ce microscope.

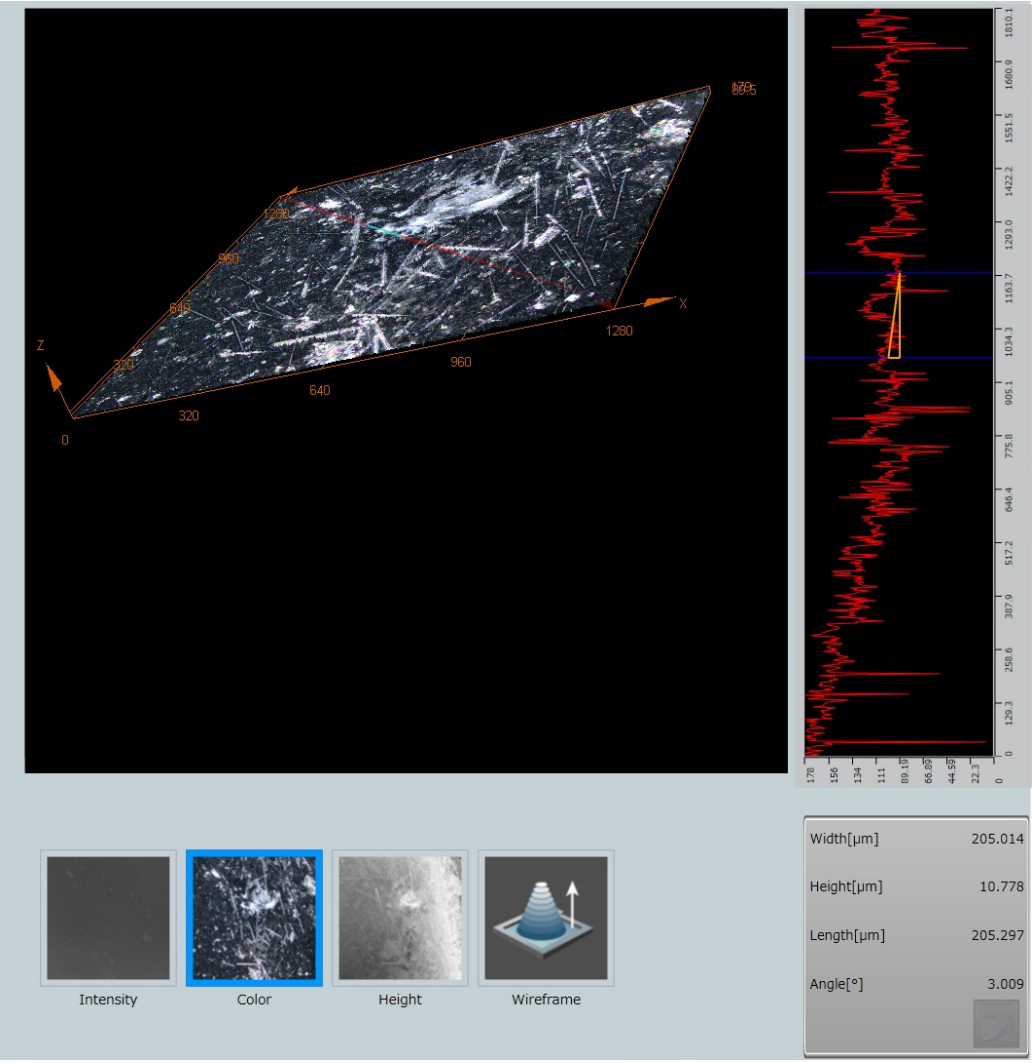

Figure 5.11 Observation en trois dimensions du VNT 340SK

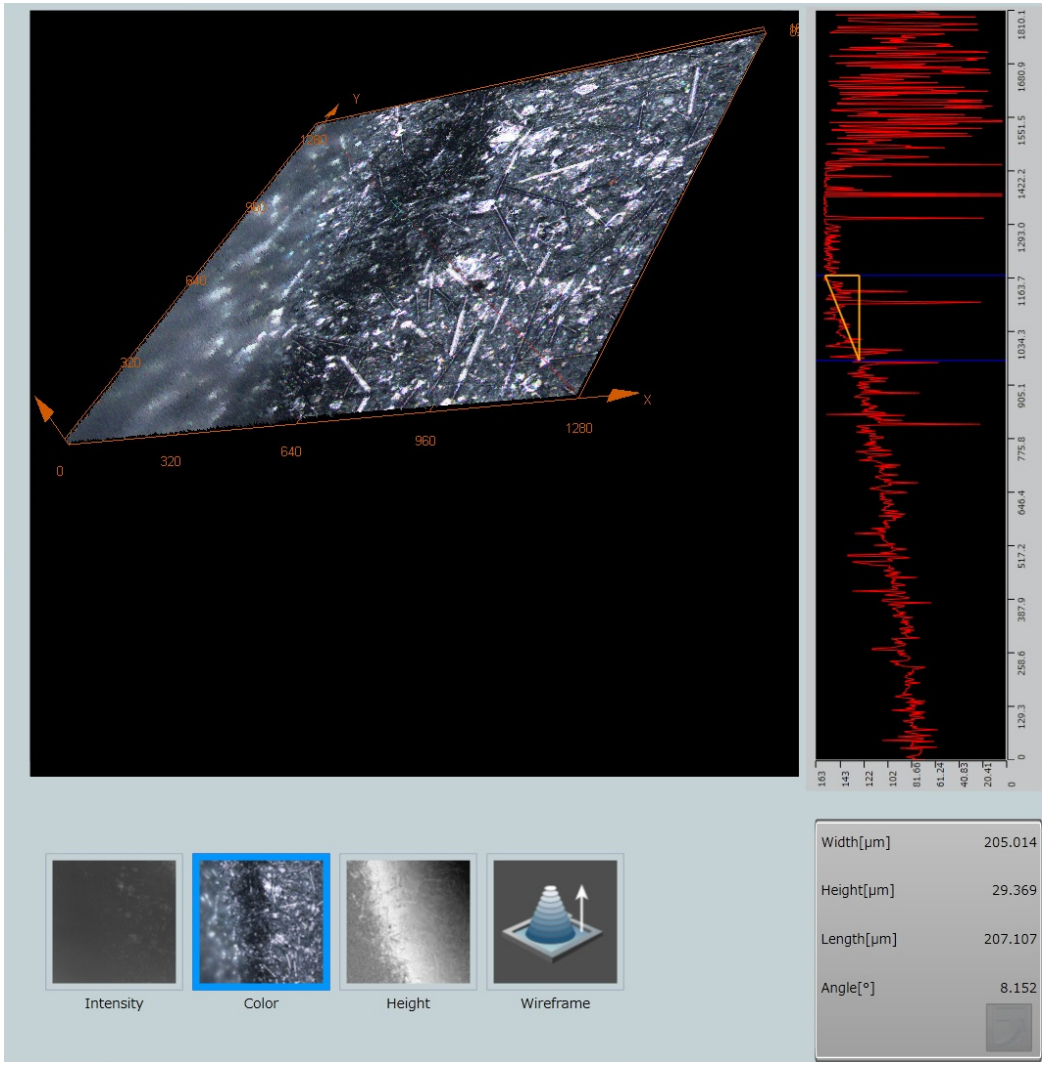

Figure 5.12 Observation en trois dimensions du VNT 340HD

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

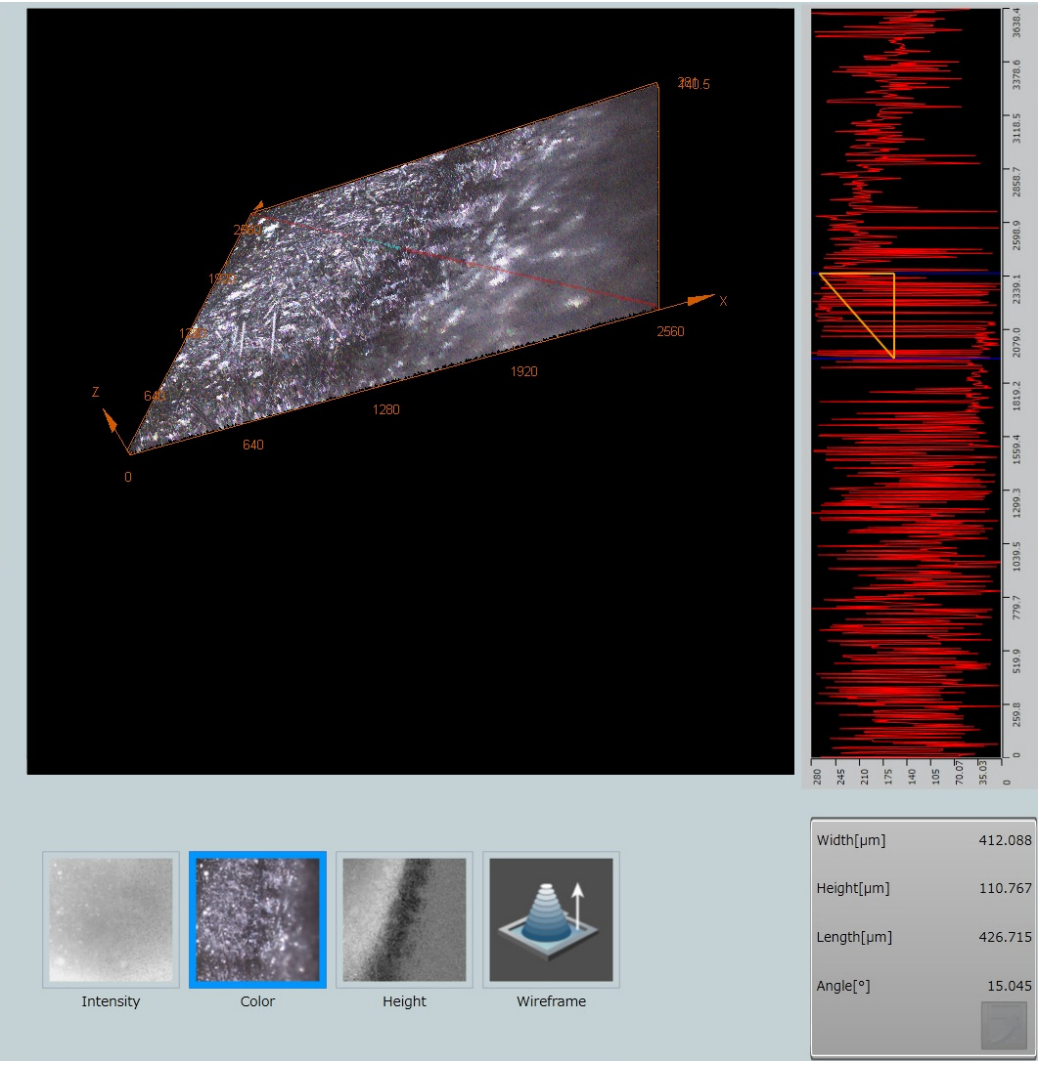

Figure 5.13 Observation en trois dimensions du VNT 840

Comme nous pouvons le constater sur ces illustrations en bas à droite au niveau des caractéristiques dimensionnelles des différents échantillons observés, ce microscope nous a fourni les profondeurs des reliefs des pièces observées. Cependant, nous n'avons malheureusement pas pu tenir compte de ces données. En effet, ce microscope a effectué la différence entre le point le plus profond et le point le moins profond de la partie observée afin de nous fournir la profondeur de la brûlure de la pièce. Cependant, nous n'avons pas pu considérer cette donnée comme étant être valide puisqu'il aurait été nécessaire, pour cela,

d'effectuer la différence de profondeur entre un point brûlé et un point sain, non brûlé, et se trouvant en dehors de la zone observée. Cependant, nous ne disposions par le l'appareillage nécessaire à ce genre de mesure; l'obtention du niveau de profondeur de la détérioration du PET a donc été impossible.

5.4 Synthèse des résultats des tests de claquage diélectrique

Ce chapitre nous a permis de mettre en évidence les différentes configurations matérielles que nous avions mises en place pour mener, finalement, à la configuration finale décrite tout au long de cette étude.

Nous avons donc relevé, dans un premier temps, plusieurs problèmes liés aux premiers montages employés. En effet, dans le premier cas avec l'utilisation de la structure à électrodes pointe-plan avec réglage millimétrique de la distance inter-électrodes, nous obtenions des tensions bien trop élevées par rapport à ce que nous recherchions. Aussi, le phénomène de décharges couronnes était tel qu'il n'était pas possible de le contenir avec des tensions aussi élevées du fait de la morphologie de la pièce à tester. Enfin, cette structure induisait un champ électromagnétique si élevé qu'il déstabilisait nos appareils de mesures à proximité tels que l'oscilloscope, mais surtout notre ordinateur de contrôle depuis lequel nous commandons le banc d'essai via l'interface utilisateur.

La deuxième série de tests réalisée avec la bougie d'allumage de marque NGK GR4 pourvue d'une distance inter-électrodes standard de 0.8 mm s'est avérée, elle aussi, peu fructueuse. En effet, nous n'arrivions alors plus à générer une tension assez élevée avec ce montage à cause de l'espace inter-électrodes qui était trop faible. Les résultats obtenus nous montraient alors que le plastique n'avait pas ou trop peu été affecté par les tests effectués.

Finalement, nous avons fait le choix de garder la bougie d'allumage de marque NGK GR4 afin d'effectuer nos tests, mais nous avons modifié son espace inter-électrodes. En effet, nous

l'avons augmenté afin d'obtenir une distance entre les deux électrodes de la bougie de 2.5 mm. Avec ce montage, nous avons pu réaliser nos tests et obtenir des résultats quant à la résistance du PET employé dans la fabrication des boîtiers de distributeurs.

Ainsi, le claquage diélectrique n'a pu être atteint après sept jours consécutifs de tests sur chaque échantillon. Cependant, nous avons observé à l'œil nu des brûlures qui se sont formées sur les échantillons après les tests. Nous avons donc, par la suite, observé cela à l'aide de microscopes optique et laser afin de pouvoir constater exactement ce qu'il en était. À travers les illustrations obtenues grâce aux microscopes, on peut clairement constater que les tests effectués sur les pièces en plastique ont eu un effet destructeur sur ces derniers, plus précisément sur le PET contenu dans ces pièces. Même si le claquage diélectrique n'a pas été atteint, les contraintes électriques exercées sur les plastiques ont détruit en surface le PET recyclé présent dans la composition du matériau. Ceci a principalement été dû au phénomène de décharges couronnes qui se produit lors de nos tests.

CONCLUSION

L'objectif de ce travail de recherche était de concevoir un banc d'essai permettant de caractériser les propriétés diélectriques de matériaux composites à base de PET recyclé. Il s'agissait de créer un système capable de mener le plastique testé jusqu'à sa rupture diélectrique et d'être capable de fournir la durée du test. Il fallait aussi que ces tests soient représentatifs de la façon dont sont contraints les plastiques dans la réalité, dans leur utilisation courante.

Afin que ce banc d'essai puisse effectuer ce travail, il fallait qu'il soit capable de générer des impulsions à haute tension avec une fréquence régulière, cela dans le but de créer des arcs électriques à haute tension. Nous avons donc commencé par concevoir ce banc d'essai en programmant une MLI à l'aide d'un microcontrôleur. La fréquence à laquelle nous avons programmé cette MLI était à 488 Hz. Elle déterminait la fréquence de formation des arcs électriques.

Il a ensuite été nécessaire d'amplifier le signal obtenu par le microcontrôleur puisque nous n'avions alors qu'une amplitude de 5 V pour ce dernier. Nous avons alors conçu la suite de notre banc d'essai en y intégrant les circuits primaire et secondaire de la bobine d'allumage que nous avons utilisée dans notre montage. Les tensions obtenues aux bornes de la bougie d'allumage intégrée à notre montage étaient alors de l'ordre de 10 kV.

Par la suite, nous avons fabriqué un système d'électrodes s'adaptant à la morphologie de la pièce à tester. La configuration de ces électrodes est couteau-cylindre. Elle nous a permis de soumettre le plastique aux contraintes électriques puisqu'elles s'adaptent parfaitement à celui-ci. Notre premier choix s'était porté vers une configuration d'électrodes cylindre-cylindre, mais nous avions ensuite privilégié la configuration couteau-cylindre afin d'accroitre le nombre des charges présentes sur les pointes des couteaux de l'électrode grâce à l'effet de pointe.

Lorsque le banc d'essai fut opérationnel, nous avons créé l'interface utilisateur via la plateforme de développement graphique LabVIEW. Cette interface nous permit de contrôler entièrement les phases de tests et d'obtenir un compte-rendu sur la durée de chaque test effectué.

Enfin, nous avons été en mesure de réaliser les tests de claquage diélectrique sur les trois types d'échantillons que le Groupe Lavergne a mis à notre disposition. Après les différentes séries de tests que nous avons effectués, le claquage diélectrique n'a pu être atteint. Les résultats obtenus nous ont montré que le PET composant nos échantillons a été brûlé et détruit en surface à cause des contraintes électriques que nous leur avons imposées. Ces résultats ont été confirmés par l'utilisation du microscope optique et du microscope laser pour observer les échantillons. Les illustrations présentées dans le dernier chapitre permettent d'observer l'effet destructeur que ce genre d'environnement a sur ces matériaux. Cette destruction a principalement été l'œuvre du phénomène de décharges couronnes dont le principe a été expliqué lors de notre revue de la littérature.

Malgré une destruction certaine et apparente lors des tests effectués, nous n'avons pas été en mesure de classifier les trois types d'échantillons pour déterminer lequel a été le plus affecté par les tests. En effet, les microscopes à notre disposition ne nous ont pas permis d'obtenir cette donnée. Aussi, le but recherché initialement avec notre banc d'essai était d'atteindre le claquage diélectrique afin de savoir quel type d'échantillon pourrait convenir à l'application faite de ces plastiques en analysant la durée du test avant que le claquage ne se produise. Nous savons donc que les tests effectués sont destructeurs pour le PET et pouvons très légitimement imaginer qu'avec des tests d'une durée bien supérieure, le plastique perforerait. Cependant, cela n'était à nouveau pas le but recherché puisque des tests trop longs sur nos échantillons n'étaient pas envisageables. Dans notre cas, on peut supposer que les tests auraient été supérieurs à quatre semaines avant de pouvoir espérer atteindre le claquage diélectrique du plastique.

Afin de conclure ces travaux de recherches, nous pouvons dire que même si l'objectif initial qui était de pouvoir caractériser les propriétés diélectriques des matériaux n'a pas été complètement atteint, notre banc d'essai offre de belles performances. En effet, nous sommes capables de contraindre au niveau électrique les différents échantillons que le Groupe Lavergne souhaiterait tester de la façon la plus fiable qui soit comparativement à la réalité. Aussi, il est important de stipuler que, dans les conditions réelles, ces pièces ne sont pas uniquement contraintes électriquement, mais aussi thermiquement. En effet, lors de nos séries de tests, nous nous en sommes tenus à des essais purement électriques à température ambiante. Cependant, en condition réelle, ces plastiques sont soumis à de fortes contraintes thermiques puisqu' au Québec, les températures peuvent atteindre jusqu'à - 40 °C en hiver. Sachant que la température idéale d'un moteur de voiture avoisine les + 90 °C; ces produits peuvent atteindre des variations de température allant jusqu'à ± 130 °C. Considérant ces faits, notre banc d'essai pourrait donner lieu à des évolutions futures permettant d'effectuer des tests sur les plastiques mêlant les contraintes électriques déjà existantes à des contraintes thermiques.

RECOMMANDATIONS

Bien que cette étude ait mené à la conception du banc d'essai et que ce dernier soit fonctionnel, il reste des axes exploitables pour des travaux futurs. En effet, d'un point de vue purement électrique, nous avons atteint les objectifs en matière de conception du banc d'essai puisqu'il répond aux exigences des tests que nous souhaitions effectuer.

Cependant, le claquage diélectrique n'a pu être atteint. Dans cette optique, il serait intéressant d'intégrer la prise en compte des contraintes thermiques à notre banc d'essai. En effet, comme nous l'avons stipulé précédemment dans nos travaux de recherche, les pièces en plastique étudiées sont soumises à des variations extrêmes de température lors de leur utilisation normale. Lors de notre revue de la littérature, nous avons mis en avant certaines données démontrant que les conditions thermiques ont des effets sur les propriétés électriques du PET. Il est donc parfaitement légitime d'envisager qu'avec une prise en compte des contraintes thermiques environnantes lors de nos tests, nous puissions obtenir des résultats plus probants. En effet, Rain (2011, p. 16) dans ses travaux nous explique qu'une augmentation de la température du composant diélectrique (dans notre cas le PET) provoque une augmentation de la densité de courant. Et Mebarki (2012, p. 66) dans son mémoire de recherche, confirme ces dires en nous expliquant qu'avec l'augmentation de la température, l'activité des décharges augmente elle aussi. Ainsi, lorsque la température ambiante est plus importante, la tension d'initiation de l'arc électrique est réduite. En d'autres termes, plus la température ambiante est élevée, moins la tension a besoin d'être élevée afin d'amorcer un arc électrique.

Il conviendrait donc d'imaginer un système isolant complètement la pièce lors des tests et permettant le contrôle de la température ambiante au sein de cet espace clos dans un même temps. Nous pourrions ainsi obtenir un claquage diélectrique de la pièce dans un délai que l'on pourrait supposer acceptable.

Rapport-Gratuit.com

Cela nous mène vers le second axe exploitable au niveau des travaux pouvant être menés pour aller plus loin dans cette recherche. En effet, nous venons de parler du claquage diélectrique de la pièce qui pourrait être obtenu avec l'ajout de contraintes thermiques lors de nos tests sur le plastique. Nous n'avons malheureusement jamais atteint ce claquage lors nos travaux de recherche et nous n'avons donc pas conçu le programme de façon à arrêter les tests automatiquement via l'interface utilisateur développée sous LabVIEW. Cependant, nous sommes en mesure de détecter électroniquement lorsque le claquage diélectrique se produit grâce à notre filtre passe-bas. Ainsi, nous pouvons parfaitement et très simplement exploiter le signal en sortie du filtre afin de le câbler sur une des entrées numériques de la carte d'acquisition USB 6009. On pourrait alors construire en amont le programme qui stopperait automatiquement les tests après que la rupture diélectrique de l'échantillon se soit produite.

ANNEXE I

PROGRAMME DE LA MLI

```c
/* Final_Program.c
 *
 * Created: 08/05/2013
 * Author: Florian Muller
 * Version : 1.0
 */


#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>

int main(void)
{
    char ipwm;

    // Initial Port I/O
    DDRB = 0xFF;                    // Set PORTB as Output

    // Initial PWM
    OCR0A = 128;                    // Duty cycle = 50%
    TCCR0A = 0b10000011;            // Fast PWM 8 Bit
    TCCR0B = 0b00000010;            // Prescaler = 8
    TCNT0 = 0;                      // Reset TCNT0
    // F(PWM)=F(clk)/(Prescaler*256)=1000000/(8*256)=488Hz

    while(1)
    {
        ipwm = 0;

        while (ipwm <= 255)
        {
            ipwm = ipwm+1;
            _delay_ms(2);           // Delay = 2 milliseconds
        }

        ipwm = 255;

        while (ipwm >= 0)
        {
            ipwm = ipwm-1;
            _delay_ms(2);           // Delay = 2 milliseconds
        }

        _delay_ms(100);             // Delay = 100 milliseconds
    }

    return 0;                       // Standard Return Code
}
```

Figure-A I-1 Programme de la MLI écrit et compilé avec Atmel Studio 6.1

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

ANNEXE II

SCHÉMA ÉLECTRIQUE DU BANC D'ESSAI

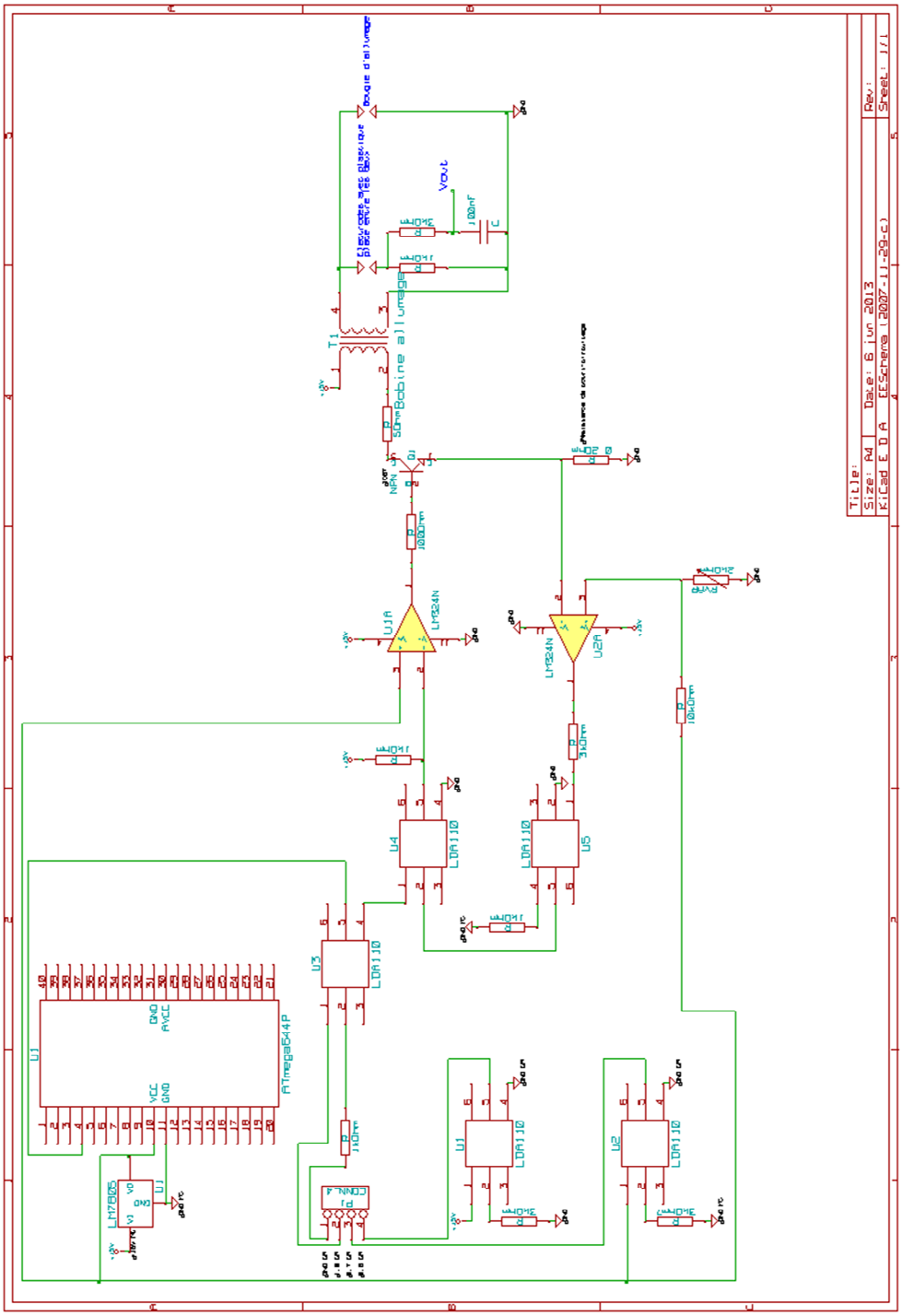

Figure-A II-1 Schéma électrique du banc d'essai créé avec KiCad

ANNEXE III

PROGRAMME DE L'INTERFACE UTILISATEUR

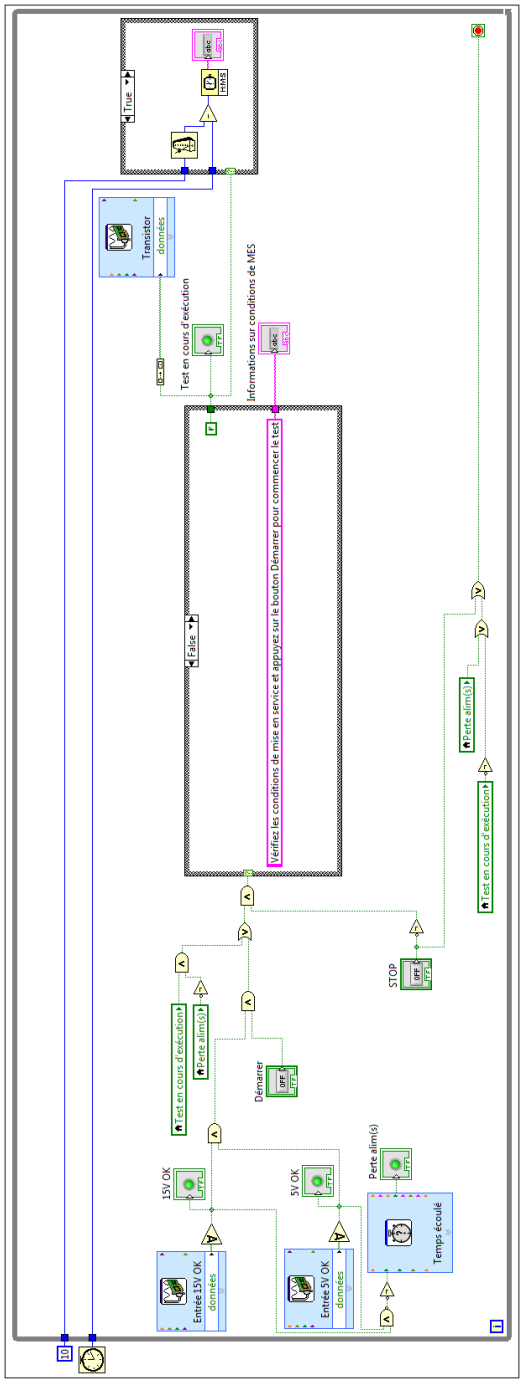

Figure-A III-1 Programme de l'interface utilisateur en langage graphique écrit et compilé avec LabVIEW 2012

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Arguet, Michel et Mircea Ianovici. 1982. *Haute tension*, 1e éd. St-Saphorin : Éditions Georgi, 425 p.

Atmel AVR Microcontroller. 2013. « ATmega164P/324P/644P Datasheet ». En ligne. 505 p. <http://www.atmel.com/Images/Atmel-8011-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega164P-324P-644P_datasheet.pdf>. Consulté le 14 mars 2014.

Awaja, Firas et Dumitru Pavel. 2005. « Recycling of PET ». *European Polymer Journal*, vol. 41, n°7, p. 1453-1477.

Bach, Cristina, Xavier Dauchy et Serge Etienne. 2009. « Characterization of poly(ethylene terephthalate) used in commercial bottled water ». *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, vol. 5 n°1, p. 1-5.

Benoit, Laurent. 1996. *Technologie des injections électroniques et performances moteur*, 1e éd. Boulogne-Billancourt : Éditions Techniques pour l'Automobile et l'Industrie (E.T.A.I.), 230 p.

Bordival, Maxime. 2009. « Modélisation et optimisation numérique de l'étape de chauffage infrarouge pour la fabrication de bouteilles en PET par injection-soufflage ». Thèse de doctorat en mécanique numérique, Paris, École des Mines de Paris, 214 p.

Champeau, Paul. 1989. *L'électricité automobile : circuits de base*, 2e éd. Boulogne-Billancourt : Éditions Techniques pour l'Automobile et l'Industrie (E.T.A.I.), 255 p.

Chen, Wai-Kai. 1986. *Passive and active filters : theory and implementations*, 2e éd. New York : J. Wiley, 504 p.

Collins, Stephen. « Differential Scanning Calorimetry ». En ligne. 16 p. <http://www.google.ca/#hl=fr&gs_nf=1&cp=33&gs_id=23&xhr=t&q=Stephen+Collins+spectroscopie+DSC&pf=p&sclient=psyab&oq=Stephen+Collins+spectroscopie+DSC&aq=f&aqi=&aql=&gs_l=&pbx=1&bav=on.2,or.r_gc.r_pw.r_qf.,cf.osb&fp=226ce4f7e4331842>.Consulté le 14 mars 2014.

Coltman, John W. 2002. « The transformer [historical overview] ». *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 8, n°1, p. 8-15.

Diez Medina, Rafael. 2008. « Alimentation de puissance d'une lampe exciplexe à décharge à barrière diélectrique, en vue du contrôle du rayonnement ». Thèse de doctorat de génie électrique, Toulouse, Université de Toulouse, 157 p.

Dissado, L.A. et J.C. Fothergill. 1992. *Electrical degradation and breakdown in polymers*, 1e éd. Londres (U.K.) : G.C. Stevens, 601 p.

Fairchild Semiconductor. 2013. « LM7805 Datasheet ». En ligne. 24 p. <http://www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM7805.pdf>. Consulté le 14 mars 2014.

Füzesséry, Sándor. 1997. Polyéthylènetéréphtalates (PET) pour films et feuilles. Propriétés électriques principales des PET. *Technique de l'ingénieur*. A3530.

Füzesséry, Sándor. 1997. Polyéthylènetéréphtalates (PET) pour films et feuilles. *Technique de l'ingénieur*. A3375.

Grossner, Nathan R. et Isabel S. Grossner. 1983. *Transformers for electronic circuits*, 2e éd. New York : McGraw-Hill, 467 p.

IEEE. 1997. *IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms*, 6e éd. New York : Wiley Interscience, 1278 p.

IXYS. 2008. « IXGP24N120C3 Datasheet ». En ligne. 6 p. <http://ixdev.ixys.com/DataSheet/DS99851A%28IXGA-H-P24N120C3%29.pdf>. Consulté le 14 mars 2014.

IXYS. 2012. « LDA110 Datasheet ». En ligne. 6 p. <http://www.clare.com/home/PDFs.nsf/www/Lda110.pdf/$File/Lda110.pdf>. Consulté le 14 mars 2014.

Kreuger, F. H. 1989. *Partial discharge detection in high voltage equipment*, 1e éd. Oxford : Butterworth-Heinemann, 193 p.

L. Su, Kendall. 2002. *Analog filters*, 2e éd. Norwell : Kluwer Academic Publishers, 406 p.

Mangiante, Gérard. 2005. *Analyse et synthèse des filtres actifs analogiques*, 1e éd. Paris : Éditions TEC & DOC, 380 p.

Massicot, A. et J.P. Morisi. 1991. *L'électronique moteur*, 1e éd. Boulogne-Billancourt : Éditions Techniques pour l'Automobile et l'Industrie (E.T.A.I.), 95 p.

Mebarki, Fouzia. 2012. « Caractérisation des propriétés diélectriques de matériaux composites à base de polyéthylène téréphtalate recyclé ». Mémoire de maîtrise en génie mécanique, Montréal, École de technologie Supérieure, 153 p.

Naudin, Céline-Anne et Claude Clozza. 1987. Plastiques et composites. *Technique de l'ingénieur*. A3220.

Noguchi, Kazuo, Yoshiwo Okamoto et Yasuo Sekii ,2008. « Statistical Consideration of Dielectric Breakdown of Polymeric Insulating Material » In *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. (Québec, QC, octobre 26-29 2008), p. 563-566.

Paroli, Ralph M., Karen K.Y. Liu et Terrence R. Simmons. 1999. « Membranes de couverture en polyoléfine thermoplastique ». En ligne. <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/ctu-sc/fr/ctu_sc_n30>. Consulté le 14 mars 2014.

Philips, Jean. 1985. Plastiques et composites. *Techniques de l'ingénieur*. A3530.

Rain, Pascal. 2011. « Étude des précurseurs de la rupture diélectrique des isolations composites ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Grenoble, Université de Grenoble, 69 p.

Rochette, Pierre. 2006. *Les fondamentaux en électronique : semiconducteurs, circuits intégrés, fonctions*, 1e éd. Paris : Ellipses, 220 p.

Orlowska, Sabina. 2003. « Conception et prédiction des caractéristiques diélectriques des matériaux composites à deux et trois phases par modélisation et validation expérimentale ». Thèse de doctorat en génie électrique, Lyon, École centrale de Lyon, 140 p.

Sato, Shinji et Kenichi Koyama. 2003. « Relationship between electrode surface roughness and impulse breakdown voltage in vacuum gap of Cu and Cu-Cr electrodes ». *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 10, n°4, p. 576-582.

Savard, Pierre et Fadhel M. Ghannouchi. 1995. *L'électromagnétisme en application*, 1e éd. Montréal : Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 179 p.

Séguier, Guy et Francis Notelet. 2006. *Électrotechnique industrielle*, 3e éd. Paris : Éditions TEC & DOC, 554 p.

Texas Instruments. 2014. « LM324N Datasheet ». En ligne. 34 p. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm224.pdf>. Consulté le 14 mars 2014.

Torres, N., J.J. Robin et B. Boutevin. 2000. « Study of thermal and mechanical properties of virgin and recycled poly(ethylene terephthalate) before and after injection Molding ». *Europeean Polymer Journal*, vol. 36, n°10, p. 2075-2080.

Ul Haq., S. et R. Omranipour. 2011. « Accelerated life testing of high voltage stator coils with enhanced PET-mica insulation system ». In *Electrical Insulation Conference (EIC)*. (Annapolis, MD, juin 5-8 2011), p. 479-482.

Rapport-Gratuit.com

Vacquié, Serge. 2000. *L'arc électrique*, 1e éd. Paris : Eyrolles, 305 p.

Vasilescu, Gabriel. 2005. *Electronic noise and interfering signals: principles and applications*, 1e éd. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 709 p.

Vincent, Axel. 2002. « Conception et simulation d'un réacteur fil-cylindre à décharge couronne avec barrière diélectrique adapté au traitement des oxydes d'azote dans des effluents marqués par un isotope ». Thèse de doctorat en génie des procédés et haute technologie, Paris, Université de Paris VI Pierre et Marie Curie, 244 p.

Wastiaux, Gérard. 1994. *La Microscopie optique moderne*, 1e éd. Paris : Éditions TEC & DOC, 269 p.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES