



HAL
open science

Etude du comportement électrique du PET par mesures de charges d'espace

Serge Agnel, Jérôme Castellon, Petru Notingher, A. Toureille, J.-L. Franceschi, Christian Laurent, Didier Marty-Dessus, D. Mary, Anca Petre, G. Teyssedre

► To cite this version:

Serge Agnel, Jérôme Castellon, Petru Notingher, A. Toureille, J.-L. Franceschi, et al.. Etude du comportement électrique du PET par mesures de charges d'espace. Colloque Electrotechnique du Futur EF, 2003, Gif-sur-Yvette, France. hal-01883646

HAL Id: hal-01883646

<https://hal.science/hal-01883646>

Submitted on 24 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Étude du comportement électrique du PET par mesures de charges d'espace

SERGE AGNEL^{1,2}, JEROME CASTELLON^{1,2}, PETRU NOTINGHER JR^{1,2} ET ALAIN TOUREILLE^{1,2}

JEAN LUC FRANCESCHI^{1,3}, CHRISTIAN LAURENT^{1,3}, DIDIER MARTY DESSUS^{1,3}, DOMINIQUE MARY^{1,3}, ANCA PETRE^{1,3} ET GILBERT TEYSSÉDRE^{1,3}

¹ GdR ME²MS : Opération « synergie des contraintes et durabilité des isolants organiques »

² Laboratoire d'Electrotechnique de Montpellier, Université Montpellier 2

³ Laboratoire de Génie Electrique de Toulouse, Université Paul Sabatier de Toulouse

agnel@univ-montp2.fr

Résumé— Les propriétés électriques du polyéthylène terephthalate –PET–, choisi comme matériau modèle, sont examinées dans le cadre du GDR ME²MS. Dans ce travail, nous présentons des mesures de charges d'espace en s'appuyant sur trois principes de mesure différents de la répartition spatiale des charges. Deux phénomènes principaux sont révélés par les différentes méthodes: l'injection de charges aux électrodes et un phénomène de polarisation volumique. L'influence du champ appliqué et de la température sur ces phénomènes est présentée.

Mots clés— matériau isolant, charge d'espace, champ électrique, méthodes non destructives, PET.

d'entre elles seront présentées dans ce travail : la méthode MOT (méthode de l'onde thermique), la méthode FLIMM (Focused Laser Induced Modulation Method) et la méthode PEA (technique électro-acoustique pulsée).

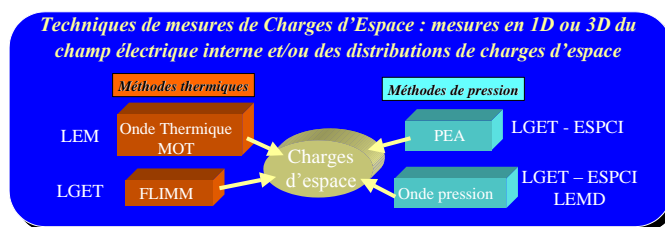


Figure 1. Techniques de mesures de charges d'espace

Les objectifs de cette communication sont d'une part de présenter les résultats préliminaires obtenus sur ces matériaux modèles dans le cadre du GDR, et d'autre part de s'appuyer sur ces résultats pour illustrer les spécificités et les complémentarités des diverses techniques de mesure de charges d'espace mises en œuvre dans le groupe de travail.

II. LES TECHNIQUES DE MESURE DES CHARGES D'ESPACE

Ces dernières années, la communauté scientifique internationale a porté une attention particulière sur le développement de techniques permettant la mesure des charges d'espace et du champ électrique interne dans les matériaux isolants. En effet, la connaissance de la distribution spatiale des charges ainsi que leur évolution temporelle permettent d'accéder aux différents processus de génération de charges, à leur mobilité, et ainsi à la dynamique des porteurs. Le développement de ces techniques apparaît donc d'un intérêt majeur, non seulement du point de vue scientifique pour mieux comprendre les phénomènes se produisant dans les isolants solides, mais également pour les industriels soucieux d'optimiser le fonctionnement en service de leurs systèmes isolés.

Les méthodes utilisées s'entendent non-destructives (ou non-intrusives) dans le sens où elles donnent accès à la distribution des porteurs, sans que la mesure ne modifie l'état électrique du matériau. Il s'agit de faire varier les charges d'influence aux électrodes, à l'aide d'une excitation non homogène dans le temps et dans l'espace. Cette excitation peut être d'origine thermique, mécanique ou électrique.

I. INTRODUCTION

Le travail présenté s'inscrit dans le cadre de l'opération "Synergie des contraintes et durabilité des isolants organiques" du thème matériaux du GDR ME²MS. Au sein de cette opération, quatre groupes de travail ont été constitués : Mesures de charges d'espace, Potentiel de surface et conductivité, Synergie des contraintes électro-mécaniques et Modélisation mécanique et diélectrique. Les objectifs des travaux entrepris concernent la caractérisation d'un matériau organique modèle. Dans un premier temps, le choix s'est porté sur le polyéthylène téréphthalate (PET) dont les applications actuelles concernent l'isolation électrique de composants du génie électrique (condensateurs, transformateurs,...) et qui peut présenter des morphologies différentes (amorphe ou avec différents taux de cristallinité).

Nous présenterons ici les résultats obtenus sur des échantillons de PET de référence et qui concernent leur faculté à accumuler des charges électriques, dites charges d'espace. En effet, les matériaux isolants sont généralement supposés neutres d'un point de vue électrique. Cependant, sous l'effet d'une contrainte extérieure (électrique, thermique, mécanique...), leur état électrique peut être largement modifié par l'apparition de charges électriques appelées "charges d'espace" qui viennent rompre l'équilibre électrique du matériau. Ces charges créent des distorsions du champ électrique interne et peuvent, par intensification du champ ou par interaction avec le matériau, induire une dégradation et un vieillissement de l'isolant et conduire ainsi à terme à la rupture diélectrique. Afin de caractériser ce phénomène, diverses techniques de détection de charges d'espace ont été développées depuis quelques années [1,2]. Les techniques répertoriées dans notre groupe de travail sont au nombre de quatre (Figure 1), mais uniquement trois

Dans ce travail, deux des techniques utilisées sont basées sur une excitation thermique (MOT et FLIMM), et la troisième sur une excitation électrique (PEA).

A. La méthode de l'onde thermique (MOT)

Son principe consiste en l'application d'un échelon de température sur une face d'un échantillon d'isolant contenant des charges d'espace. L'échantillon, muni d'électrodes métalliques ou semi-conductrices, est placé en court circuit. En l'absence de l'échelon de température, le système échantillon – électrodes - fil conducteur est en équilibre électrique (système isolé). En conséquence, des charges d'influence apparaissent sur les électrodes.

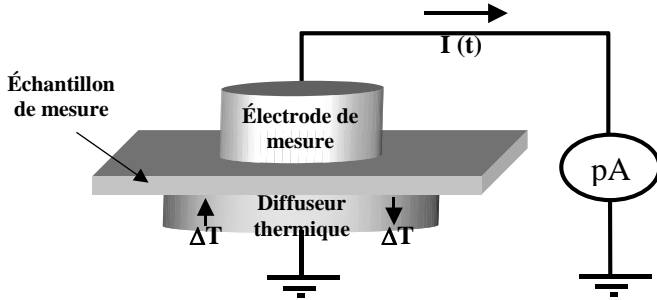


Figure 2. Principe de la mesure MOT

Après l'application d'un échelon de température sur une face (généralement par circulation d'un liquide caloporteur dans un diffuseur de température – voir Figure 2), une onde thermique parcourt l'échantillon. En raison de la contraction (ou la dilatation) de l'échantillon, qui produit un léger déplacement des charges d'espace dans l'échantillon, et de la variation locale de sa permittivité avec la température, l'équilibre électrostatique du système est rompu. Comme le système a tendance à se rééquilibrer, les charges d'influence aux électrodes sont redistribuées ; il apparaît ainsi un transport de charge d'une électrode à l'autre, dans le circuit extérieur. Ce transport de charge correspond à un courant dont l'expression est [3,4] :

$$I(t) = -\alpha \cdot C \int_0^d E(x) \frac{\partial \Delta T(x,t)}{\partial t} dx \quad (1)$$

où d est l'épaisseur de l'échantillon; α est une constante du matériau tenant compte de la contraction (ou dilatation) de l'échantillon et de la variation de sa permittivité avec la température ; C est la capacité de l'échantillon ; $E(x)$ est le champ électrique résiduel (dû aux charges d'espace) ; $T(x,t)$ est la distribution de la température dans l'échantillon.

Le courant est mesuré à l'aide d'un amplificateur de courant et enregistré sur ordinateur; il est ensuite traité mathématiquement pour retrouver la répartition du champ résiduel $E(x)$. En se basant sur un processus d'étalonnage réalisé sous champ appliqué, et en utilisant l'équation de Poisson, on peut calculer la distribution de la densité de charge d'espace dans le matériau:

$$\rho(x) = \varepsilon \frac{\partial E(x)}{\partial x} \quad (2)$$

où ε est la permittivité de l'échantillon.

B. La méthode FLIMM

La méthode FLIMM [5,6] utilise une onde thermique non uniforme qui interagit avec la charge d'espace et la polarisation spatiale en produisant un courant pyroélectrique.

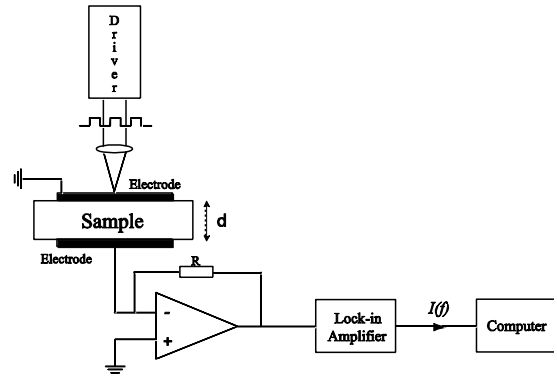


Figure 3. Principe de génération du courant FLIMM

L'excitation thermique est produite par la focalisation d'un faisceau laser ($\lambda=658\text{nm}$) modulé en intensité sur chaque face de l'échantillon. La modulation du laser provoque une variation de la température près de la surface, ce qui produit une onde thermique qui se propage à l'intérieur du matériau. La propagation de la chaleur dépend des caractéristiques thermiques de chaque milieu constituant l'échantillon (air, électrode supérieure, matériau à étudier et électrode inférieure). Un modèle mathématique quatre couches [7] a été développé afin de calculer le gradient thermique, en tenant compte des conditions limites aux interfaces et de l'absorption thermique dans chaque niveau.

L'interaction de cette onde thermique avec la polarisation et les charges d'espace génère, entre les deux électrodes un courant pyroélectrique, détecté par un préamplificateur faible bruit (Figure 3). Il dépend de la fréquence de modulation f , de la valeur locale de la température $T(z, f)$ dans l'échantillon ainsi que de la "fonction charge $r(z)$ " (charge d'espace $\rho(z)$ et polarisation $P(z)$), z désignant l'abscisse du point considéré mesuré à partir du point d'impact du faisceau laser.

$$I(f) = \frac{A}{L} j \cdot 2\pi \cdot f \cdot \int_0^L r(z) T(z, f) dz \quad \text{avec} \quad r(z) = p(z) - (\alpha_x - \alpha_\varepsilon) \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E(z) \quad (3)$$

où $A(\text{m}^2)$ représente la surface des électrodes, $r(z)$ ($\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$) la charge d'espace totale, $p(z)$ ($\text{Cm}^{-2}\text{K}^{-1}$) le coefficient pyroélectrique, $E(z)$ (Vm^{-1}) le champ électrique interne, $\alpha_x, \alpha_\varepsilon$ (K^{-1}) les dépendances relatives de la dilatation thermique et de la permittivité diélectrique.

Connaissant le courant pyroélectrique et le profil de la température, on peut déterminer le profil de la polarisation ou de la charge d'espace en utilisant une méthode de déconvolution mathématique appropriée. L'équation fondamentale FLIMM (3) est une équation intégrale de Fredholm de première espèce caractérisée par l'extrême sensibilité de la solution aux perturbations du système. Pour résoudre ce type d'équation, nous avons utilisé la méthode de régularisation de Tikhonov [8].

L'originalité de cette méthode réside dans la focalisation du faisceau laser qui permet de réaliser des cartographies 3D des charges ou de détecter ponctuellement des charges dans l'isolant [9,10].

C. La technique électro-acoustique pulsée (PEA)

Le principe de la méthode PEA consiste à détecter des ondes acoustiques générées par les charges d'espace lorsqu'elles sont soumises à une impulsion de champ électrique.

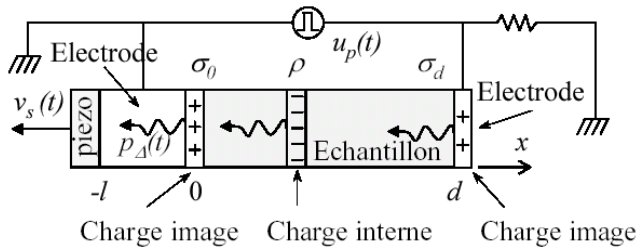


Figure 4. Principe de la technique PEA

Considérons un échantillon d'épaisseur d avec une couche de charge négative ρ d'épaisseur Δx à la profondeur x (Figure 4). Cette couche induit par influence totale, des charges images σ_0 et σ_d . L'application d'un potentiel pulsé $u_p(t)$ vient provoquer, par effet "Coulombien", un déplacement transitoire des charges d'espace autour de leur position. Des ondes de pression élémentaire $p_A(t)$ issues de chaque zone chargée, dont l'amplitude est proportionnelle à la densité locale des charges, se propagent alors à la vitesse du son dans l'échantillon. Sous l'effet de ces variations de pression, le capteur piézoélectrique délivre alors une tension $v_s(t)$ caractéristique des pressions embrassées; ce signal piézoélectrique est amplifié et enregistré à l'aide d'un oscilloscope numérique. Enfin la distribution de charge dans l'échantillon est calculée par traitement du signal basé sur les équations physiques et le signal de référence obtenu à partir d'un échantillon libre de charges mis sous tension. L'expression finale de la densité de charge est la suivante [11, 12]:

$$\rho(x) = F^{-1} \left[\frac{\epsilon_1 U}{vp.d_1} \cdot \frac{Vs(\nu)}{Vs_1(\nu)} \right] \quad (4)$$

où ϵ_1 , d_1 et U sont la permittivité relative, l'épaisseur et la tension appliquée, définissant les conditions dans lesquelles le signal de calibration est réalisé, vp est la vitesse du son dans l'échantillon, $Vs(\nu)$ et $Vs_1(\nu)$ sont les transformées de Fourier des signaux mesurés lors de la mesure et de la calibration, respectivement.

III. RÉSULTATS

A. Paramètres relatifs aux mesures de charges d'espace

Les travaux présentés ont été réalisés sur des films de PET d'épaisseurs 100 et 500 μ m par les trois techniques citées précédemment : la méthode de l'onde thermique (MOT), la technique du pulse électro-acoustique (PEA) et la méthode FLIMM. Les différents paramètres relatifs aux mesures effectuées sont récapitulés dans le Tableau 1 ci après :

Tableau 1. Paramètres relatifs aux mesures réalisées sur PET

Épaisseur PET	500 μ m	100 μ m	100 μ m
Technique de test	MOT	PEA	FLIMM
Conditions de mesure	Court circuit	Court circuit et sous champ (dc)	Court circuit
Electrodes	aluminium	or	or
Contrainte électrique appliquée	10kV/mm	de 30 à 180kV/mm	10kV/mm
Températures de conditionnement électrique	25, 50 et 90°C	20°C	25, 50 et 90°C

Les niveaux des contraintes électriques à appliquer ont été déterminés en tenant compte de la caractéristique de conduction courant-tension $I=f(V)$ du matériau étudié. Ainsi, les tests effectués ont été les suivants :

- mesure de l'état électrique résiduel des films de 500 μ m avant application des contraintes (électrique et thermique);
- mesure de l'état électrique résiduel des films de 100 et 500 μ m après application d'un champ électrique de 10kV/mm à trois températures, 25, 50 et 90°C;
- mesure de l'état électrique interne (résiduel ou sous tension) des films de 100 μ m sous forts champs appliqués (de 30 à 180kV/mm) à 20°C.

B. Résultats concernant l'état électrique résiduel des films de 500 μ m avant application des contraintes

Dès réception des échantillons de 500 μ m, sans application de contrainte, la présence de charges d'espace (faibles valeurs de densités) a été observée. Cependant, une assez forte dispersion dans les mesures MOT a été relevée, dénotant une hétérogénéité des échantillons testés (voir Figures 5 et 6). Les densités de charges relevées, vraisemblablement liées au processus de fabrication, sont apparues très faibles (inférieures à 0.5C/m³).

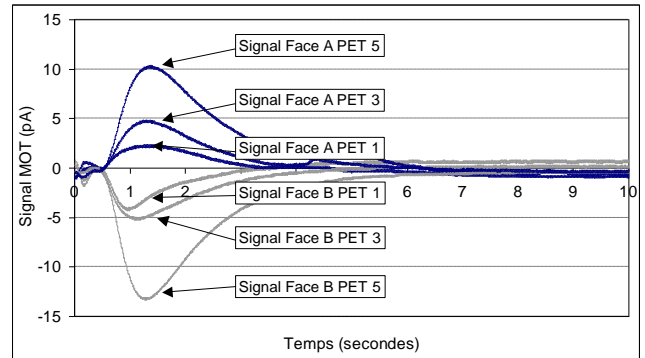


Figure 5. Signaux MOT (dès réception des échantillons)

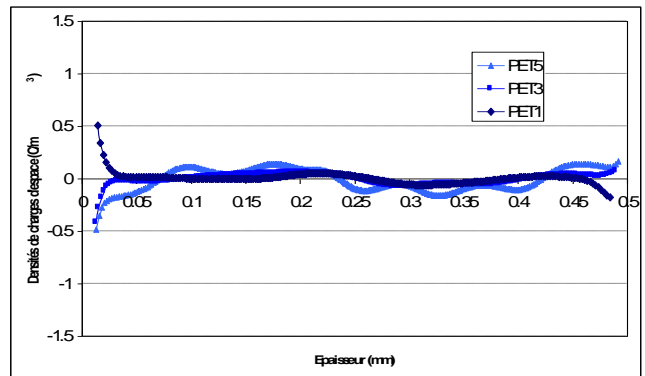


Figure 6. Densité de charges (dès réception des échantillons)

C. Résultats sur films de 500 μ m après application d'un champ électrique de 10kV/mm, 5h (sous 25, 50 et 90°C)

Ces tests ont été réalisés hors tension par la méthode MOT. A la fin du conditionnement électrique, l'échantillon a été refroidi sous champ, et la mesure MOT a été faite en conditions de court circuit à température ambiante.

Pour une température de conditionnement de 25°C, le matériau présente des densités de charges faibles, avec des profils assez proches de ceux relevés avant conditionnement. A cette température, le champ appliqué de 10kV/mm ne semble pas

(ou peu) engendrer de phénomène de polarisation ou d'injection de charges significative. Par contre, lorsque la température de conditionnement augmente, ces phénomènes apparaissent de plus en plus nettement. En effet, il a été mis en évidence pour ces deux températures de 50 et 90°C (et encore plus nettement pour 90°C) ou l'injection de porteurs augmente de façon très significative, les deux phénomènes suivants :

- une polarisation volumique (température proche de la température de transition vitreuse T_g de ce PET);
- une injection de charges au niveau des deux électrodes (homocharges : charges de même signe que les électrodes lors du conditionnement électrique).

L'observation de ces 2 phénomènes a également été confirmée par des mesures de Courants de Décharges ThermoStimulés (CDTS) avec l'apparition d'une désorientation dipolaire suivie d'une relaxation de charges injectées lors du conditionnement électrique.

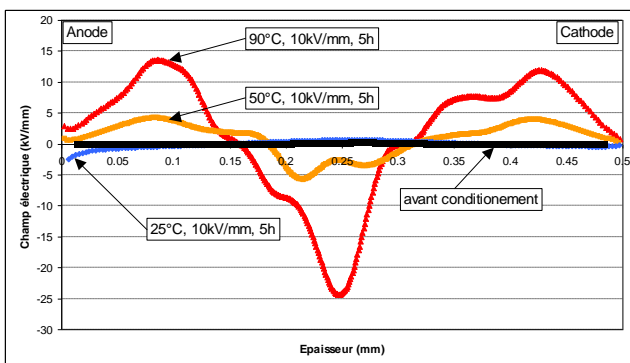


Figure 7. Champs électriques résiduels (après 10kV/mm, 5h)

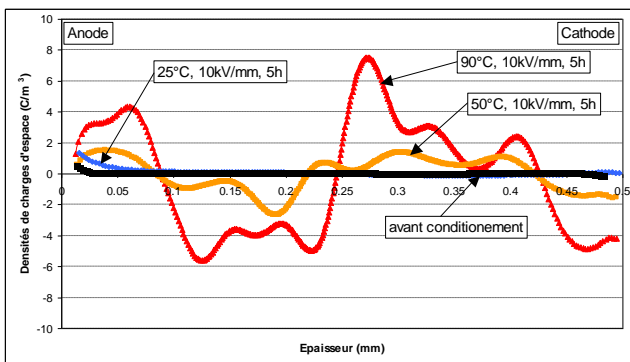


Figure 8. Densité de charges résiduelles (après 10kV/mm, 5h)

D. Résultats sur films de 100 µm après application d'un champ électrique de 10kV/mm, 5h (à 25, 50 et 90°C)

La Figure 9 présente un exemple de courant pyroélectrique enregistré par la méthode FLIMM, pour un échantillon de PET chargé sous un champ de 10kV/mm, à 50°C. On remarque un comportement différent des modules, ce qui suggère une hétérogénéité du matériau. A température ambiante (25°C), les valeurs de champ et de densité de charges sont très faibles, ce qui laisse supposer qu'il n'y a pas eu d'injection de charges. Les densités de charges obtenues ($\sim 0.5 \text{ C/m}^3$) sont associées à la polarisation intrinsèque du matériau.

Pour des températures plus importantes, respectivement de 50 et 90°C, on remarque une apparition d'homocharges dans le matériau, leurs amplitudes augmentant avec l'augmentation de la température (Figure 11).

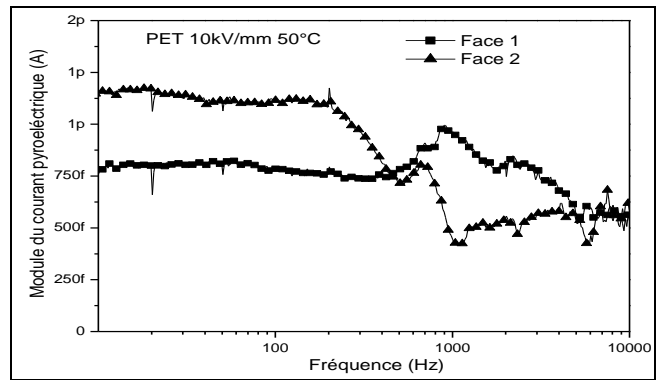


Figure 9. Courants pyroélectriques obtenus par la FLIMM

A 90°C, température proche de la T_g , la mobilité des porteurs augmente, entraînant une polarisation quasi-complète des dipôles, ce qui explique les valeurs importantes de densité de charges (15 C/m^3). On note également que le champ résiduel représente 50% du champ appliqué et présente une parfaite symétrie (Figure 10). La symétrie est également retrouvée dans la distribution de charges d'espace qui, comme a été déjà mis en évidence par la MOT, est associée à une polarisation volumique.

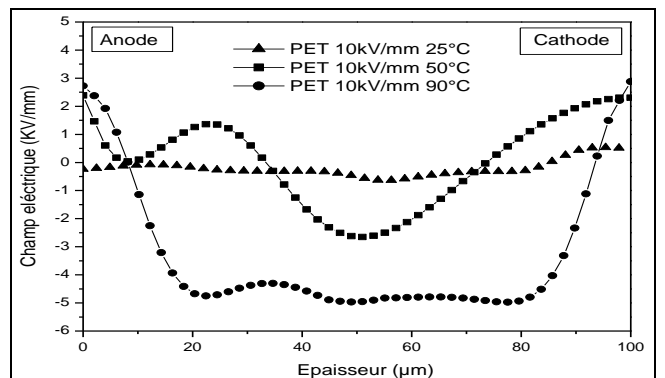


Figure 10. Champs électriques résiduels (après 10kV/mm, 5h)

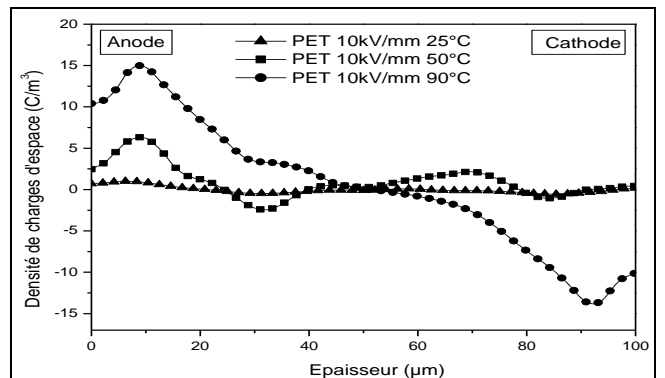


Figure 11. Densité de charges résiduelles (après 10kV/mm, 5h)

E. Résultats sur films de 100µm après et pendant l'application d'un champ incrémenté par pas de 30kV/mm jusqu'à 180kV/mm

Les résultats présentés ci après ont été obtenus par la technique PEA sur des échantillons de 100µm d'épaisseur. Les mesures ont été réalisées à 20°C. L'échantillon a été soumis à des cycles de polarisation/dépolarisation de 1h/1h, le champ étant incrémenté par pas de 30kV/mm jusqu'à 180 kV/mm (la rupture est intervenue à 210 kV/mm). Les Figures 12 et 13 représentent les profils de champ résiduel et de charge d'espace obtenus après 1h de dépolarisation, pour chacun des paliers de champ appliqué indiqué en insert.

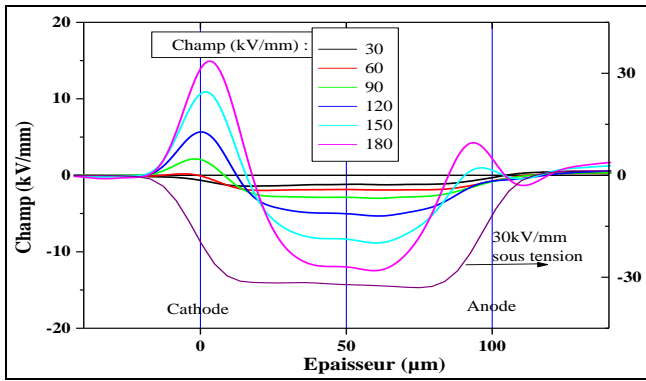


Figure 12. Champ électrique résiduel après 1h de dépolarisation et profil sous 30kV/mm en début de cycle. Cathode à gauche.

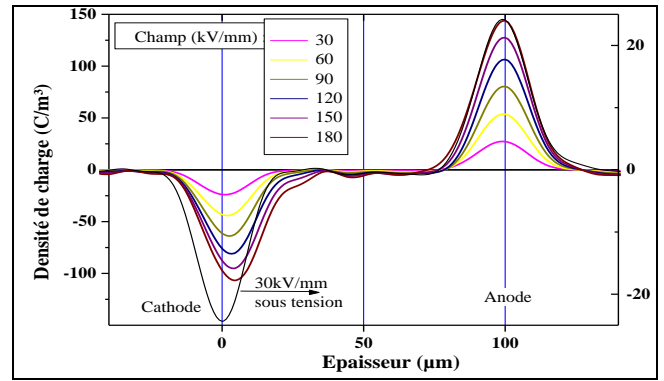


Figure 14. Profils de charges d'espace (sous tension) après 1h de polarisation et profil sous 30kV/mm en début de cycle.

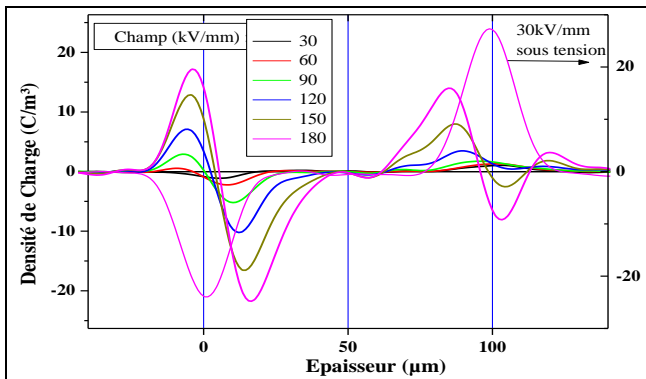


Figure 13. Profils de charges résiduelles après 1h de dépolarisation et profil sous 30kV/mm en début de cycle.

En l'absence de charges internes, les profils attendus sont ceux caractéristiques d'une orientation dipolaire à cinétique de relaxation lente, et auraient donc qualitativement la même forme –et même signe- que ceux obtenus sous faible tension. En présence d'une charge interne, se superpose à ce profil-type la signature des charges internes (de même signe que le signal de polarisation dans le cas d'homocharges), et la charge image relative (de même forme mais de signe opposé à la polarisation dans le cas d'homocharges). Les profils présentés à la Figure 13 s'interprètent de cette façon. Une homocharge est détectée à la cathode dès 30 kV/mm et apparaît plus nettement à 60kV/mm (et au-delà). A l'anode, les profils à 30 et 60kV/mm font apparaître un pic homothétique au signal sous tension qui peut être dû à une polarisation résiduelle. L'injection apparaît moins évidente qu'à la cathode mais est tout de même clairement observée à champ plus élevé. Il est clair que pour des champs croissants, la zone de charge d'espace se déplace vers le cœur de l'échantillon. Dans les conditions de mesure, les zones de charges positives et négatives restent cependant disjointes.

Il est également à noter que le champ électrique résiduel (Figure 12) après 1 heure de mise en court circuit de l'échantillon est de l'ordre de 5 à 10% du champ électrique appliqué (respectivement pour 30 et 180kV/mm).

Les mesures sous champ après 1h de polarisation sont présentées à la Figure 14. L'augmentation du champ conduit à un déplacement du maximum du pic au voisinage de la cathode, ce qui s'explique par le fait que l'homocharge contribue au signal, et que la charge mesurée sur l'électrode est la charge capacitive diminuée de l'image de la charge interne. L'homocharge apparaît moins nettement à l'anode.

IV. CONCLUSIONS

Les conclusions et les interprétations principales qui ressortent de ces premiers résultats sur PET sont les suivantes :

- par la méthode de l'onde thermique (MOT) sur films de 500 μ m :
 - observation d'une présence de charges d'espace dès réception des échantillons sans application de contraintes (niveaux résiduels faibles, inférieurs à 0,5C/m³);
- par la méthode de l'onde thermique (MOT) sur films de 500 μ m et la méthode FLIMM sur films de 100 μ m :
 - après application d'un champ électrique de 10kV/mm les phénomènes de polarisation volumique et d'injection de charges semblent augmenter sensiblement avec la température de conditionnement (le champ électrique résiduel pouvant localement atteindre de 50% à 200% de la valeur du champ appliqué – respectivement pour les échantillons de 100 et 500 μ m à 90°C); ces phénomènes de polarisation volumique ont également été observés par des mesures de retour de potentiel réalisées à Supélec dans le cadre de ce GDR.
- par la technique électro-acoustique pulsée (PEA) sur films de 100 μ m :
 - après application de forts champs (entre 30 et 180kV/mm), des homocharges ont été mises en évidence avec une accumulation plus nette à la cathode. Les champs électriques résiduels ont atteint 5 à 10% du champ électrique appliqué;
 - les mesures faites sous tension (pour 1 heure d'application du champ électrique) ont montré la présence d'homocharges à la cathode dès 60kV/mm.

L'objectif ici n'était pas de mener à bien une étude comparative des différentes techniques, mais de présenter leurs principes, et de les illustrer par les premiers résultats obtenus sur PET, le matériau modèle adopté pour cette action. Des phénomènes d'injection et de polarisation en volume ont été mis en évidence par les différentes techniques. L'augmentation de la température favorise nettement l'injection bipolaire, et il en va de même lorsque le champ appliqué est augmenté.

V. REFERENCES

- [1] G.M. Sessler, "Charge Distribution and Transport in Polymers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 5, pp. 614-628, 1997
- [2] N.H. Ahmed, N.N. Srinivas, "Review of Space Charge Measurements in Dielectrics", IEEE Transactions on

Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 5, pp. 644-656, 1997

- [3] A. Toureille, J. P. Reboul, P. Merle, " Détermination des densités de charge d'espace dans les isolants solides par la méthode de l'onde thermique", J. Phys. App. (1), pp. 111-123, 1991.
- [4] P. Notingham jr., S. Agnel, A. Toureille, "The Thermal Step Method for Space Charge Measurements under Applied dc Field", IEEE TDEI 8(6), pp. 985-994, 2001
- [5] S.B. Lang, D. K. Das Gupta, "Laser intensity modulation method: A technique for determination of spatial distributions of polarization and space charge in polymer electrets", J. Appl. Phys., vol. 59, p. 2151, 1986
- [6] B. Ploss, R. Emmerich, S. Bauer, "Thermal wave probing of pyroelectric distributions in the surface region of ferroelectric materials: A new method for the analysis", J. Appl. Phys., vol. 72, n°11, p. 5363, 1992
- [7] A. Petre, D. Marty-Dessus, L. Berquez, J.L. Franceschi, "Traitement mathématique des données en instrumentation FLIMM", Proceedings in C2I, january 2004 (to be published)
- [8] D. Marty-Dessus, L. Berquez, A. Petre, J.L. Franceschi, "Toward an improvement of thermal modelling and mathematical deconvolution in FLIMM", Proceedings in Electrostatics 2003, Scotland, (to be published)
- [9] D. Marty-Dessus, L. Berquez, M. Mousseigne, C. Biellmann, J.L. Franceschi, " Space charge and polarization profiles determination in thin polymer insulators by FLIMM", Proceedings of IEEE CEIDP, Victoria (Canada), 2000
- [10] D. Marty-Dessus, L. Berquez, A. Petre, J.L. Franceschi, "Space charge cartography by FLIMM: a tree-dimensional approach" J.Phys. D: Appl.Phys., vol 35, p. 3249, 2002
- [11] T.Maeno, "Calibration of the pulsed electroacoustic method for measuring space charge density" - Trans. IEE Japan, Vol.119A, p.1119, (1999).
- [12] O. Gallot-Lavallée, V. Griseri, G. Teyssedre, C. Laurent. "Mesure de la charge d'espace par la méthode électroacoustique pulsée". Congrès Annuel de la Société Française d'Electrostatique, Toulouse, 3-4 Juillet 2003. Proc. SFE-2002, pp.1-6, 2002.