



**HAL**  
open science

## Couplage électrique-mécanique dans les diélectriques

G. Teyssedre, Laurent Berquez, Christian Laurent

► **To cite this version:**

G. Teyssedre, Laurent Berquez, Christian Laurent. Couplage électrique-mécanique dans les diélectriques. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. pp. 1-8. hal-01065203

**HAL Id: hal-01065203**

**<https://hal.science/hal-01065203>**

Submitted on 18 Sep 2014

**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.

# Couplage électrique-mécanique dans les diélectriques.

Gilbert TEYSSÉDRE, Laurent BERQUEZ, Christian LAURENT

\*Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie, Université P Sabatier, Bat 3R3, 118 Route de Narbonne, 31062 Toulouse.

**RESUME** – La capacité des matériaux isolants à générer et/ou stocker des charges électriques conduit à une variété de phénomènes électromécaniques qui peuvent être soit exploités dans des applications en lien avec le Génie Electrique, soit représenter des limitations dans les performances des matériaux isolants. L'objectif de cette communication est de présenter ces divers aspects des couplages électriques-mécaniques, en portant l'attention plus spécifiquement sur les ferro-électrets cellulaires, sur la mesure de déformation sous champ de polymères chargés et sur l'importance des propriétés mécaniques en lien avec les phénomènes de vieillissement électrique. La communication est destinée à alimenter la Session Spéciale "Génie Electrique – Mécanique" du Symposium.

**MOTS-CLES** – électrets, charge d'espace, décharges partielles, arborescence électrique

## 1. Introduction

Les effets électromécaniques couplés interviennent sous un très grand nombre de formes dans les matériaux du génie électrique, allant des phénomènes de piézoélectricité directe ou inverse, aux électrets où des charges statiques sont implantées, à la rupture électromécanique, ou aux phénomènes électroacoustiques en présence de perturbations transitoires incluant des décharges. Parmi les dispositifs technologiques exploitant ces couplages entre réponses électrique et mécanique, on trouve bien évidemment les dispositifs piézoélectriques: capteurs acoustiques (conversion d'énergie mécanique en énergie électrique, émetteurs et actionneurs (effet inverse), transformateurs piézoélectriques (effets directs et inverses), dans lesquels sont utilisés soit des matériaux purement piézoélectriques (i.e. dont la polarisation varie avec la contrainte électrique), organiques ou inorganiques, mais également des électrets dont les propriétés électro-actives sont liées à leur capacité à stocker de manière permanente des charges électriques. Ces électrets trouvent leurs applications dans divers domaines, allant des microphones et haut-parleurs aux actionneurs MEMS (micro-systèmes électromécaniques), ou à la récupération d'énergie.

Dans cette communication, destinée à contribuer à la Session Spéciale "Génie Electrique – Mécanique" organisée à l'occasion du Symposium, nous abordons plus particulièrement les propriétés électromécaniques de matériaux, principalement polymères, induites par leur capacité à générer et stocker des charges électriques. Ces propriétés électromécaniques peuvent être exploitées pour réaliser des dispositifs spécifiques, comme on l'a vu ci-dessus. Nous traiterons dans ce cadre-là des électrets et plutôt particulièrement des "piezo-" ou "ferro-" électrets, matériaux cellulaires chargés par décharges partielles générées dans les cavités. Une deuxième illustration de cette communication concerne la caractérisation de la réponse électromécanique de matériaux isolants chargés, et la caractérisation même de la charge implantée par méthode électroacoustique ou thermique. Enfin, nous verrons dans un dernier volet de quelle manière le couplage de contraintes mécaniques et électriques peut induire une dégradation des performances diélectriques des matériaux isolants.

## 2. Electrets

### 2.1 Principe

Les électrets sont des matériaux isolants dans lesquels des charges ont été implantées, généralement en surface des matériaux. Si les premiers transducteurs électrets, à base de paraffines, ont été fabriqués et commercialisés à la fin des années 20, ce n'est qu'au début des années 60 que des produits fiables et de grande diffusion, tels que des microphones, ont abouti, avec des films minces de PET (Mylar®) ou de polymères fluorés (Teflon®) [1]. Ces derniers restent aujourd'hui parmi les matériaux les plus performants en termes de rétention et stabilité de la charge. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour former les électrets telles qu'une combinaison champ électrique-température, le bombardement par

faisceau d'électrons non traversant ou la mise en contact avec une décharge couronne, cette dernière restant la plus communément utilisée car très simple à mettre en œuvre.

## 2.2 Matériaux cellulaires

Dans les années 90, une nouvelle famille d'électrets est apparue, constituée par les polymères cellulaires, principalement du polypropylène mais également des polymères fluorés. En effectuant une détente de pression à chaud de films polymères fortement orientés, il est possible de former, au sein des films, des cavités sous forme de lentilles de quelques  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, cf. Figure 1 [2].

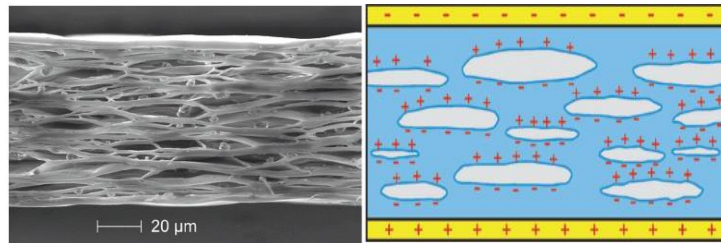


Figure 1 : Image MEB d'un PP cellulaire en coupe et schéma de fonctionnement [2].

Pour obtenir des matériaux ayant une activité électromécanique, les cavités doivent être chargées. La Fig. 1 montre un schéma en coupe des cavités une fois chargées en appliquant un champ électrique. Un ensemble de micro-décharges plasma est produit, créant des macro-dipôles au sein de l'isolant. Le terme "ferro-electret" provient du fait que les cycles d'hystérésis entre champ électrique et induction électrique qualitativement semblables à ceux des matériaux ferroélectriques sont observés dans ce type de matériaux. Des modèles ont été développés pour corrélérer l'efficacité de chargement et le comportement piézoélectrique aux conditions de chargement [3]. Les courbes de Paschen aux faibles dimensions doivent être modifiées pour rendre compte de décharges à barrières diélectriques dans des microcavités. Moyennant cela, il a été montré qu'il existe une pression optimale de chargement dépendante de la distribution en taille des cavités.

Ces matériaux présentent des coefficients piézoélectrique  $d_{33}$  très élevés, de l'ordre de  $600\text{pC/N}$ , soit significativement plus élevés que ceux de céramiques comme le PZT ( $170\text{pC/N}$ ) ou le PVDF ( $20\text{pC/N}$ ). Ce fort coefficient provient de la déformabilité importante des cavités sous contrainte mécanique. Un certain nombre d'autres avantages de ces matériaux justifie l'intérêt qui leur est porté, notamment pour des applications acoustiques (microphones, haut-parleurs miniatures par exemple) : légèreté, adaptabilité en termes de forme, bas coût, impédance acoustique bien plus faible que celle du PVDF ou des céramiques. Un des points faibles reste une tenue en température limitée, de l'ordre de  $50^\circ\text{C}$ : la charge stockée sur les parois des cavités est moins stable que celle des électrets.

## 3. Déformation sous champ de polymères chargés

A l'échelle macroscopique, lorsqu'un champ électrique est appliqué à un isolant polymère, celui-ci se déforme sous l'effet de la pression électrostatique. Dans un condensateur, cette pression électrostatique générée par l'attraction mutuelle des électrodes induit une diminution de l'épaisseur du diélectrique et par conséquent une augmentation du champ électrique. Ces processus peuvent mener à un phénomène de rupture électromécanique aux temps courts.

D'autre part, dans les matériaux diélectriques soumis à de fortes contraintes (champ électrique élevé, irradiation, variation de température, etc.), il apparaît dans certaines régions un excès de charges électriques. Ces charges, appelées charges d'espace, englobent l'ensemble des charges positives et négatives piégées dans un isolant. La présence de charges dans des zones à pièges, comme l'interface entre les phases amorphes et cristallines, peut produire un champ électrique interne très important pouvant conduire à la rupture diélectrique et/ou un vieillissement prématuré du matériau. Diverses études ont montré les rôles des contraintes électromécaniques et des charges d'espace sur le vieillissement des matériaux diélectriques et il semble que ces deux facteurs n'agissent pas de manière indépendante.

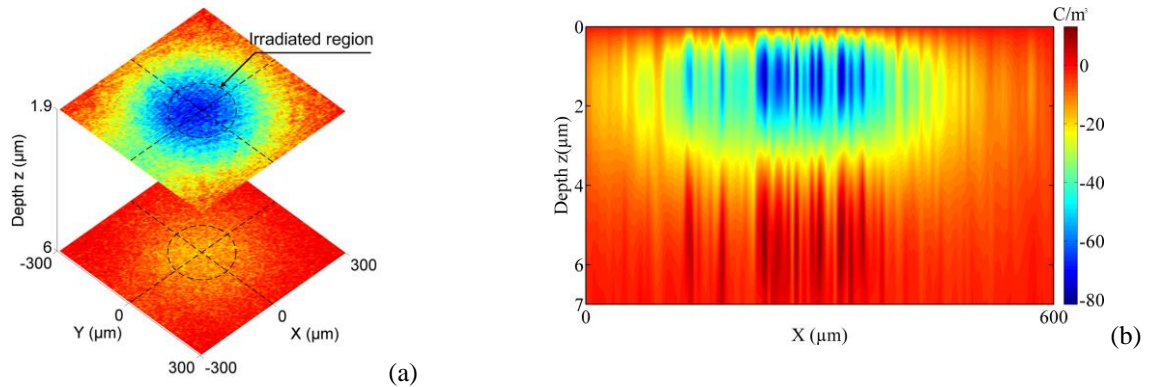
### 3.1 Dispositif expérimental

Un dispositif permettant de mesurer la charge d'espace et la déformation mécanique induite par l'application d'un champ électrique a été développé au Laboratoire en 2009. Ce dispositif est basé sur un microscope qui permet d'observer la surface d'un échantillon pour effectuer une mesure de déformation mécanique par la méthode DIC (*Digital Image Correlation*) et de focaliser un faisceau laser pour la mesure de charge d'espace par la méthode FLIMM (*Focused Laser Intensity Modulation Method*). La technique de mesure de déformation DIC utilise une méthode de corrélation d'image qui permet de mesurer les déformations de l'échantillon entre une image de référence et une image de la surface de l'échantillon déformée par l'application d'un champ électrique ou de tout autre champ de contrainte [4]. La méthode FLIMM [5] consiste à irradier la surface de l'échantillon par un faisceau laser modulé en intensité et focalisé à la surface de l'échantillon afin de créer un gradient thermique non uniforme à l'intérieur de l'échantillon. Cette onde thermique modifie la permittivité du matériau et engendre une variation des charges d'influence créées par les charges internes sur les électrodes de l'échantillon. Sous condition de court-circuit, la variation des charges d'influence génère

un courant pyroélectrique qui permet de remonter à la distribution spatiale de la charge d'espace après un traitement mathématique.

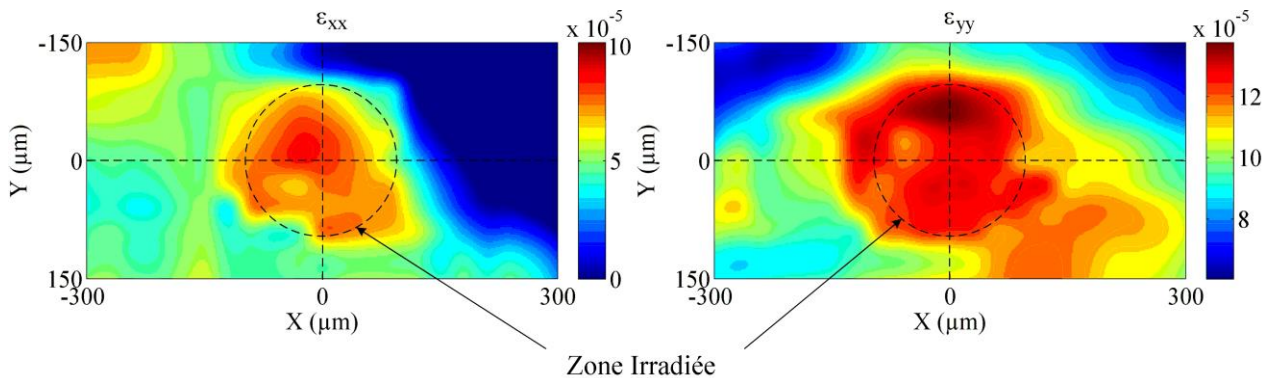
### 3.2 Charge d'espace et déformation sur matériaux irradiés par faisceau d'électrons

Pour mettre en évidence le lien entre charge d'espace et déformation mécanique, nous avons irradié un film de PTFE de 50  $\mu\text{m}$  d'épaisseur métallisé sur ses deux faces (30 nm d'or) avec un canon à électrons à 40 keV pendant 5 minutes. Pour limiter la zone irradiée, un masque avec une ouverture de 200  $\mu\text{m}$  de diamètre a été placé sur l'échantillon au cours de l'irradiation. La zone irradiée a tout d'abord été cartographiée (Figure 2) avec une résolution de 5  $\mu\text{m}$ . On peut voir que la charge se situe en surface avec un étalement qui correspond au diamètre de l'ouverture dans le masque lors de l'irradiation.



**Figure 1 : Distribution en trois dimensions des électrons implantés (a) dans des plans (XY) parallèles à la surface de l'échantillon, (b) dans un plan (XZ) perpendiculaire à la surface de l'échantillon**

L'application d'un champ électrique de 60kV/mm à l'échantillon permet de mesurer les déformations mécaniques  $\epsilon_{xx}$  et  $\epsilon_{yy}$  dans le plan de l'échantillon (Figure 3).



**Figure 2 : Déformation induite dans deux directions orthogonales par l'application d'un champ électrique de 60kV/mm selon l'axe Z.**

On peut donc apprécier sur les Figures 2 et 3 le lien entre charge d'espace, déformation mécanique et champ électrique. En effet, la zone irradiée est parfaitement reconstruite à partir des mesures de charge d'espace et de déformation mécanique. Il faut également noter des déformations mécaniques plus importantes dans les zones irradiées où le champ électrique interne est modifié par la présence de charges électriques.

### 3.3 Méthodes acoustiques de mesures de charge d'espace

Diverses méthodes de mesure de distribution de densité de charges ont été développées, pouvant s'appuyer sur des phénomènes électromécaniques [6]. Si l'application d'un champ électrique continu crée une force de Coulomb sur une charge, l'application d'une impulsion de tension sur une région chargée génère une onde acoustique au sein du matériau où se trouve cette charge. C'est ce principe qui est utilisé dans la méthode PEA (*Pulsed Electro-Acoustic*) de mesure de distribution de charge d'espace. Ainsi, l'application d'une impulsion de tension entre les deux électrodes d'un film diélectrique génère une onde acoustique dont la forme d'onde est l'image de la distribution de charge dans l'échantillon.

A l'inverse, la propagation d'une onde acoustique dans un matériau va induire un courant électrique entre deux électrodes en présence de charge d'espace. Ce courant caractérise la distribution de charge dans l'échantillon. Ce principe est à l'origine des méthodes de mesure de charge d'espace LIPP (*Laser Induced Pressure Propagation*) et PIPWP (*Piezoelectric Induced Pressure Wave Propagation*).

## 4. Contrainte électromécanique et tenue des isolants

La durée de vie des isolants dans les composants du GE est limitée par un enchaînement de phénomènes qui s'initient au niveau microscopique et se développent ensuite progressivement aux niveaux méso- et macroscopique, conduisant éventuellement à la rupture diélectrique. Les propriétés mécaniques sont fortement couplées à ces phénomènes de vieillissement.

### 4.1 Des zones de charge d'espace à la formation de domaines à faible densité

Comme décrit plus haut, la présence de charges d'espace dans les isolants induit des contraintes mécaniques sur le matériau. Au niveau moléculaire, la présence d'une charge électrique localisée (donc piégée sur un défaut du réseau moléculaire) induit un champ de contrainte sur les liaisons inter-atomiques voisines [7], diminuant ainsi le seuil énergétique nécessaire aux ruptures de liaison (de l'ordre de 10 eV dans les polymères non contraint). Les calculs montrent que le champ de contrainte mécanique n'est pas suffisant à lui seul pour expliquer la formation de défauts par rupture et réarrangement des liaisons inter-atomiques. La présence de charges électriques libres, en densité très faible, peut, combinée à ce champ de contrainte, induire des dissociations atomiques. Il a en effet été démontré que des charges électroniques libres de faible énergie cinétique (typiquement 1 eV – [8]) peuvent générer des ruptures de liaisons si celles-ci sont déjà contraintes. La longueur de diffusion d'un électron libre dans un isolant solide peut atteindre 10 nm sous un champ de 100 kV/mm. L'énergie cinétique gagnée par un électron libre (injecté à partir d'une électrode, dépiégé par effet thermique ou optique, généré par des rayonnements ionisants, etc.) sous ce champ est donc suffisante pour affecter les liaisons interatomiques de façon irréversible. Il s'en suit, par effet cumulatif, la formation de zones de plus faible densité dans lesquelles les électrons libres sont susceptibles de gagner une énergie cinétique plus grande (leur longueur de diffusion augmentant), et donc d'accélérer l'extension du défaut initial. Ces idées ont été développées dans la littérature depuis les années 80 [9] mais les éléments permettant d'en étayer le schéma ne sont apparus que plus tard et restent assez largement non finalisés.

### 4.2 Des domaines à faible densité aux microcavités

L'extension de ces domaines à faible densité conduirait à l'apparition de microcavités au sein du diélectrique. Les réactions de dégradation sont alors amplifiées puisqu'on peut dès lors parler de libre parcours moyen électronique dans un gaz (selon la nature de la microcavité). Les énergies cinétiques potentiellement mises en jeu sont alors bien plus importantes puisque l'énergie gagnée par un électron libre accéléré par le champ dans un micro-vide ne dépend que de sa dimension. Pour une distance d'accélération de 1  $\mu\text{m}$ , l'énergie gagnée dans un champ de 100 kV/mm est de 100 eV. Le seuil des réactions de dégradation est alors très largement dépassé. Dans le cas d'une vacuole gazeuse, l'énergie gagnée est limitée par le libre parcours moyen électronique –la distance entre deux collisions avec les molécules du gaz. L'ordre de grandeur de celui-ci reste de l'ordre du  $\mu\text{m}$  à la pression atmosphérique.

### 4.3 Des microcavités aux cavités sièges de décharges partielles, origines des arborescences électriques

Par extension des microcavités, la dimension minimale critique pour l'amorçage de décharges électriques (dites décharges partielles) est atteinte (typiquement une dizaine de  $\mu\text{m}$ ). Les réactions de dégradation font alors intervenir des espèces excitées, des ions, des électrons, des rayonnements UV, etc. Des arborescences électriques, structures filamenteuses ramifiées issues de ces défauts, se propagent alors en des temps très variables en fonction des conditions (ms, mois ou années!) et conduisent à la rupture.

Les mécanismes de propagation des arborescences électriques sont fortement couplés aux propriétés mécaniques. L'arborescence est en effet une structure filamenteuse creuse (d'un diamètre de l'ordre du  $\mu\text{m}$  à plusieurs  $\mu\text{m}$ ) qui nécessite donc la formation de nouvelles interfaces internes et un certain degré de déformation plastique du matériau. L'énergie nécessaire à l'apparition de cette structure filamenteuse doit être fournie par le champ électrique. Les arborescences électriques étant le siège de décharges électriques internes et intermittentes, plusieurs tentatives d'interprétation ont été proposées sur cette base mais fort est de constater que 90% de l'énergie des décharges est dissipée le long des parois de la structure ce qui peut expliquer l'augmentation du diamètre des filaments au cours de leur propagation mais plus difficilement leur avancement. Les théories les plus étayées sur cette question mettent en balance l'énergie électrostatique dissipée en pointe de filament (régulièrement impacté par les décharges électriques internes à la structure) et l'énergie mécanique nécessaire à la formation du filament. Là encore, les estimations montrent que les charges électriques injectées dans le matériau en extrémité de filament sont nécessaires pour affecter les propriétés mécaniques [10].

Une très belle illustration de l'importance des propriétés mécaniques sur les structures arborescentes a été apportée récemment par des mesures effectuées sur des gels, intermédiaires entre solides et liquides vis-à-vis de leurs propriétés mécaniques. Alors que les arborescences sont des structures permanentes dans le cas des solides, elles apparaissent comme des structures transitoires dans les gels (la pression électrostatique étant nécessaire à leur observation) et disparaissent dès que la tension n'est plus appliquée à l'objet. Elles se reforment dès que la tension est de nouveau appliquée à l'objet ce qui démontre que la structure est bien permanente mais ne « s'ouvre » que sous contrainte électrique [11].

## 5. Conclusion

Nous avons succinctement illustré les liens qui pouvaient exister entre la charge présente dans un diélectrique et le comportement électromécanique du matériau: les électrets, qu'ils soient sous forme de films classiques ou cellulaires présentent un comportement piézoélectrique, comportement qui peut lui-même être exploité pour sonder la densité et la position de la charge dans un isolant. Parce que la charge produit localement des contraintes sur le matériau, elle peut se révéler être une faiblesse dans le contexte de matériaux appliqués à l'isolation. Lorsque ces charges excédentaires sont suffisamment mobiles, elles entraînent des dommages irréversibles sous forme de filaments dans lesquels des phénomènes de fracture se produisent.

## 6. Références

- [1] G.M. SESSLER, J.E. WEST, "Electret transducers: a review", *J. Acoust Soc. Am.*, vol. 53, p. 1589, 1973
- [2] S. BAUER, R. GERHARD-MULTHAUPT, G.M. SESSLER, "Ferroelectrets: Soft electroactive foams for transducers", *Physics Today*, vol. 57, p. 37, 2004
- [3] S. HARRIS, A. MELLINGER, "Pressure dependence of space charge deposition in piezoelectric polymer foams: simulations and experimental verification", *Appl Phys A*, vol. 107, p. 553, 2012
- [4] T. TRAN ANH, L. BERQUEZ, L. BOUDOU, J. MARTINEZ-VEGA, "Space charge and Induced Mechanical Deformation Cartographies by FLIMM and Digital Image Correlation on electron irradiated PTFE thin film", *ISE – International Symposium on Electrets*, Montpellier, August 28–31, 2011.
- [5] A. PETRE, C.D. PHAM, D. MARTY-DESSUS, L. BERQUEZ, "Three-dimensional space charge cartographies by FLIMM in electron irradiated polymers", *J. Electrostat.*, vol. 67, p. 430, 2009.
- [6] R. J. FLEMING, "Space Charge Profile Measurement Techniques: Recent Advances and Future Directions", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, p. 967, 2005
- [7] G. MAZZANTI, G. C. MONTANARI, L.A. DISSADO, "Electrical Aging and Life Models: The Role of Space Charge", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, p. 876, 2005.
- [8] L. SANCHE, "Nanosopic Aspects of Electronic Aging in Dielectrics", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 4, p. 507, 1997.
- [9] A. K. JONSCHER, R. LACOSTE, "On a cumulative model of dielectric breakdown in solids", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 19, p. 567, 1984.
- [10] H. R. ZELLER, W. R. SCHNEIDER, "Electrofracture mechanics of dielectrics aging", *J. Appl. Phys.*, vol. 56, p. 455, 1984.
- [11] L. SALVATIERRA, S. DODD, L. DISSADO, E. MOLA, "Electrical Trees in Silicone Gel: A Combination of Liquid and Solid Behaviour", *Proc. Conf. on Electr. Insul. and Dielectr. Phen.*, Shenzhen China, p. 1018, 2013.