

***MECAMAT***

**Groupement de Travail MECAMAT**

**Couplages multiphysiques**

**7 Novembre 2008**

**« Déformations et contraintes d'origine électrique et magnétique »**

**Compte rendu du GT**

# Programme

\*\*\*\*\*

8h45 : *accueil au bar du LMT-Cachan*

\*\*\*\*\*

*Matinée : physique, modélisation, calcul*

9h00 : O. Hubert (LMT-Cachan) - L. Daniel (LGEP)

« Déformation d'origine magnétique, magnétostriction, piézomagnétisme, mesure et modélisation »

9h45 : V. Loyau (SATIE)

« Déformation d'origine électrique, piézoélectricité, mesure et modélisation »

\*\*\*\*\*

10h30 – *pause*

11h00 : R. Desmorat (LMT-Cachan)

« Formulation de couplages électro-magnéto-mécaniques »

11h45 : A. Bossavit (LGEP)

« Modèles discrets unifiés en magnétoélasticité »

\*\*\*\*\*

*repas*

\*\*\*\*\*

*Après-midi : Applications*

13h45 : A. Di-Carlo (SMFM – Roma)

« Le couplage électromécanique chez les élastomères nématiques »

14h30 : E. Barthel (CNRS- Saint Gobain)

« Efforts volumiques ou surfaciques pour les modèles de zone cohésive dans l'adhésion des élastomères mous ? »

15h15 : J. Petit – P.Y. Chanal (Centre d'études de Gramat)

« Utilisation de forts courants impulsifs pour la création de fortes pressions sans onde de choc »

16h00 : Discussions – bilans - propositions pour l'organisation d'une nouvelle journée.

\*\*\*\*\*

16h30 : *Clôture*

## Résumé de la journée

La réunion du groupement de travail "couplages multiphysiques" s'est tenue le vendredi 7 novembre 2008 dans l'amphi 63 du laboratoire SATIE de l'ENS-Cachan. Cette journée avait pour thème: « Déformations et contraintes d'origine électrique et magnétique ». Les 7 exposés ont été suivis par un public d'environ 25 personnes.

La réunion a pu illustrer comment l'étude des couplages électro-magnéto-mécaniques, pose des problèmes à la fois théoriques, numériques ou expérimentaux. Les applications industrielles n'en sont qu'à leurs débuts. La potentialité est très importante grâce à l'amélioration des procédés, à l'élaboration de nouveaux matériaux, à des technologies mieux maîtrisées. Les principaux besoins sont des besoins de modélisation et d'outils numériques adaptés.

-----

Les deux premiers exposés avaient l'objectif de décrire les principaux mécanismes associés aux couplages. Ils ont été illustrés par un grand nombre d'exemples de résultats expérimentaux. Concernant la magnétostriction, l'accent a été mis sur la difficulté liée essentiellement aux faibles niveaux de déformation associés (en particulier pour les matériaux usuels du génie électrique), et à la pollution des mesures par « l'effet de forme ». D'autre part, la non-linéarité et l'effet de l'état de contrainte ne peuvent pas être négligés pour la caractérisation de ce comportement. Le caractère non-linéaire existe également pour le comportement piézoélectrique, mais ces aspects sont relativement peu étudiés compte tenu du mode d'utilisation de ce type de matériau : Le matériau piézoélectrique est essentiellement utilisé polarisé. Le comportement est alors à la fois linéaire et relativement indépendant des contraintes. La notion de tenseur de piezoélectricité a été mise en évidence et quelques exemples d'application ont illustré le deuxième exposé.

Les deux exposés suivants étaient beaucoup plus tournés vers la résolution numérique de problèmes couplés. Le premier présentait comment la thermodynamique des processus irréversibles permet de décrire les couplages électro-magnéto-mécaniques. L'accent est mis sur l'interprétation des bilans énergétiques et la part d'énergie électromagnétique qui est effectivement transmise à la matière. Ce point reste controversé : il conditionne néanmoins la formulation des forces et couples volumiques magnétiques. On a pu souligner en particulier un besoin de validation expérimental de cet aspect. Le deuxième exposé nous a fait toucher du doigt une théorie de représentation géométrique des grandeurs physiques qui permet de traiter de manière cohérente les problèmes mécaniques et magnétiques. La résolution numérique de problèmes couplés devient alors plus naturelle. A quand un code de calcul naturellement commun à toutes ces physiques ?

-----

Le repas du midi a été pris en commun au restaurant universitaire de Cachan dans une salle réservée pour l'occasion. Les repas ainsi que les pauses ont été subventionnées par l'association, grâce au budget alloué à chaque réunion annuelle de GT (montant maximum de 200€). Le coût total de l'organisation de ce GT s'élève à 151,3€.

-----

Les trois exposés de l'après-midi se voulaient plus appliqués, présentés par deux industriels et un collègue universitaire Italien venu pour l'occasion en France. Son exposé traitait du couplage électromécanique chez les élastomères nématiques. L'élastomère présente une faible viscosité : des particules chargées sont liées à ce polymère. Elles s'orientent sous l'effet d'un champ électrique. Cette technique est proche de celle employée pour les cristaux liquides.

L'application visée est ici la fabrication d'actionneur et l'exposé s'est essentiellement focalisé sur le comportement dynamique d'un film mince de ce matériau. Le premier exposé « industriel » traitait la question du contact adhésif d'élastomères mous à l'aide des forces de Van der Waals. La principale question posée est celle de la distribution de ces forces en surface / en volume et des conséquences sur la définition de la zone cohésive. Des expériences à l'échelle micrométrique ont été présentées illustrant l'élasticité à une échelle inhabituelle. Le dernier exposé traitait de l'application des forces de Lorentz pour la création de très fortes pression. Cette technique permet d'accéder au comportement mécanique de matériaux à des niveaux de vitesse de déformations impossibles à atteindre à l'aide des moyens standards (barres de Hopkinson). L'orateur a mis l'accent sur les difficultés expérimentales considérables associées à la mesure des grandeurs mécaniques dans des conditions de courant et de vitesses si extrêmes. Les moyens expérimentaux associés sont très spécifiques. Les codes de calculs usuels ne permettent pas des simulations réalistes. Des codes spécifiques sont donc développés en parallèle pour répondre aux besoins de simulations.

-----

Ce besoin d'outils de calcul de structures efficaces dans les domaines de recherche touchant aux comportements couplés électro-magnéto-mécaniques semble être général.

La réunion s'est achevée à 16h30.

-----

Une prochaine réunion du GT-Multiphysiques devrait être organisée en 2009. Elle devrait traiter des couplages thermo-mécaniques. Les responsables du GT sont dans l'attente de la proposition d'un laboratoire pour organiser cette journée.

O.Hubert

# Déformation d'origine magnétique, magnétostriction, piézomagnétisme, mesure et modélisation

O. Hubert<sup>°</sup>, L.Daniel\*, S.Lazreg<sup>°</sup>

<sup>°</sup>LMT-Cachan

ENS-Cachan - CNRS UMR 8535 – UPMC – Universud Paris  
61, avenue du président Wilson 94235 Cachan cedex France  
e-mail: hubert@lmt.ens-cachan.fr

\*LGEP (Laboratoire de Génie Electrique de Paris)  
CNRS (UMR 8507) – SUPELEC - UPMC Univ Paris 06 - Univ Paris-Sud  
11, rue Joliot-Curie - Plateau du Moulon F 91192 Gif-sur-Yvette Cedex  
e-mail: daniel@lgep.supelec.fr

Les phénomènes de couplage magnéto-mécanique ont deux manifestations principales : la déformation de magnétostriction (dite de Joule) et l'effet des contraintes sur l'aimantation. L'effet des contraintes sur la déformation de magnétostriction est également une caractéristique de ce couplage.

Quand un matériau ferro ou ferrimagnétique est soumis à un champ magnétique, il se déforme. Cette déformation est associée à deux phénomènes distincts:

\* Les forces d'origine magnétique, associées aux gradients d'aimantation, provoquent une déformation purement élastique. Ces forces apparaissent sur les surfaces libres et en volume. Elles sont directement reliées à la géométrie de l'échantillon d'où leur nom d'"effet de forme", et s'ajoutent à la déformation de magnétostriction. Les formulations à ce sujet ne font néanmoins pas l'unanimité et conduisent à des résultats parfois contradictoires. La déformation due aux forces d'origine magnétique est le résultat d'un couplage global n'impliquant pas le comportement du matériau.

\*Une déformation "spontanée", intrinsèque au matériau apparaît également (déformation de Joule). Cette déformation dépend de l'état magnétique local du matériau. Déformation et aimantation peuvent être reliées par une loi de comportement. Ce deuxième phénomène est appelé magnétostriction. Le comportement magnétostrictif, comme le comportement magnétique est fortement non-linéaire. Cette non-linéarité est associée à l'existence d'une déformation maximale, appelée déformation à saturation. Les principales caractéristiques de la magnétostriction sont son signe, son amplitude et que cette déformation s'effectue généralement à volume constant.

La déformation de magnétostriction d'un matériau magnétique est fonction de l'état de contrainte mécanique auquel il est soumis. Cette sensibilité à l'état de contrainte permet d'expliquer en particulier l'effet  $\Delta E$ , qui correspond à une apparente perte de linéarité du comportement élastique des échantillons magnétiques désaimantés.

L'objet de cette présentation est d'illustrer les mécanismes de déformation, à l'aide de résultats expérimentaux obtenus sur différents matériaux. On s'appuiera en outre sur quelques calculs EF et un modèle de comportement multidomaines pour tenter de faire une distinction entre effet des forces et magnétostriction. L'exposé sera complété par quelques illustrations de l'effet des contraintes sur le comportement magnétique, mettant en évidence le phénomène de piézomagnétisme.

# **Piézoélectricité et applications**

V.Loyau

SATIE

ENS-Cachan - Universud Paris  
61, avenue du président Wilson 94235 Cachan cedex France  
e-mail: [loyau@satie.ens-cachan.fr](mailto:loyau@satie.ens-cachan.fr)

Cette présentation est axée sur les matériaux piézoélectriques modernes de type céramique PZT. Ces matériaux ferroélectriques deviennent piézoélectriques par polarisation.

Les équations d'état, qui décrivent le comportement électromécanique du matériau, seront établies à partir de réflexions qualitatives sur la structure microscopique. La manipulation de ces équations dans des exemples simples sera présentée afin de bien saisir les possibilités offertes par les matériaux piézoélectriques (effets directs et inverses) : leurs avantages et leurs inconvénients seront présentés.

L'exposé terminera en faisant le tour des principales applications de ces matériaux qui sont utilisés aussi bien dans des technologies de pointe que dans la vie de tous les jours.

## **Formulation de couplages électro-magnéto-mécaniques**

R. Desmorat

LMT-Cachan

ENS-Cachan - CNRS UMR 8535 – UPMC – Universud Paris  
61, avenue du président Wilson 94235 Cachan cedex France  
e-mail: [desmorat@lmt.ens-cachan.fr](mailto:desmorat@lmt.ens-cachan.fr)

Nous reprenons l'approche thermodynamique des processus irréversibles pour décrire les couplages électro-magnéto-mécaniques très classiques (piezo-élasticité, magnéto-élasticité). Un premier accent est mis sur l'interprétation des bilans énergétiques, la question de fond étant la part d'énergie électromagnétique qui est effectivement transmise à la matière. Un second concerne la formulation des forces électro-magnétiques (celle donnée par Eringen et Maugin est considérée). Nous montrons comment procéder pour des calculs couplés électro-magnétisme / mécanique faits dans deux codes spécialisés différents (l'un d'électro-magnétisme, l'autre de mécanique).

## Modèles discrets unifiés en magnétoélasticité

A. Bossavit

LGEP (Laboratoire de Génie Electrique de Paris)  
CNRS (UMR 8507) – SUPELEC - UPMC Univ Paris 06 - Univ Paris-Sud  
11, rue Joliot-Curie - Plateau du Moulon F 91192 Gif-sur-Yvette Cedex  
e-mail: bossavit@lgep.supelec.fr

L'idée est de représenter déformation  $S$  et contrainte  $T$  par des degrés de liberté associés aux « arêtes » et « facettes » d'un maillage, de la même façon qu'en électromagnétisme, où champ électrique et induction magnétique sont représentés par des DdL attribués aux arêtes et facettes. La discrétisation des lois de conservation est alors quasi-automatique, et la difficulté du problème de couplage se concentre sur l'observation et la représentation des lois de comportement croisées.

On discutera deux difficultés de cette approche. L'une, plus apparente que réelle, tient à ce que les DdL représentant  $S$  et  $T$  ne sont pas des scalaires mais des vecteurs (dans le cas de  $S$ , la déformation) ou des covecteurs (dans le cas de  $T$ , la contrainte). La seconde, qui touche à la vieille controverse sur le Principe d'Indifférence Matérielle, est la nécessité de quotienter par les déplacements rigides.



# Le couplage électromécanique chez les élastomères nématiques

A. Di Carlo

SMFM at DiS (Dipartimento di Strutture)  
Mathematical Structures of Materials Physics  
Università degli Studi "Roma Tre"  
adicalro@mac.com  
adc@uniroma3.it

Liquid crystal elastomers (LCEs) have attracted considerable attention in recent years. Their interesting properties stem from the interaction between liquid crystal ordering and rubber elasticity. A phenomenon that has been studied quite extensively is the spontaneous distortion exhibited by nematic elastomers when undergoing the isotropic-to-nematic phase transformation, with the related possibility of exploiting this effect by using LCEs as actuators to fabricate, say, artificial muscles. Another thoroughly analyzed feature of nematic elastomers is their soft mechanical response under imposed stretch. Because of the technological interest in exploiting this mode of response in various applications, the stretching-induced reorientation process has been carefully studied, at least in the quasi-stationary regime. In spite of these advances, the dynamics of director remodeling remains largely unexplored. Since actuator applications demand short response times, understanding dynamics is clearly necessary. The goal of my talk is to set forth an evolutive theory for the dynamics of nematic gels under electromechanical loads, and study the way this dynamics depends on mechanical actions (imposed stretch or imposed force) and the applied electric field. This is joint work with Antonio DeSimone, Luciano Teresi and Kenji Urayama.

## **Efforts volumiques ou surfaciques pour les modèles de zone cohésive dans l'adhésion des élastomères mous ?**

E. Barthel (CNRS- Saint Gobain)  
Surface du Verre et Interfaces  
BP 135  
F-93303 Aubervilliers Cedex  
email : Etienne.Barthel@saint-gobain.com

On considère la question du contact adhésif d'élastomères mous. Dans les modèles simples de zone cohésive, on utilise une estimation physique grossière des efforts cohésifs de traction, que l'on suppose s'exercer à la surface du solide. Si le module élastique du matériau est faible, comme dans le cas des élastomères mous, les tailles de zone cohésive obtenues ainsi sont ridiculement faibles.

De nombreux aspects du modèle peuvent être mis en cause. On pose ici la question de l'amélioration attendue d'une description plus réaliste des efforts cohésifs. En particulier on propose de considérer leur effet en termes de distribution volumiques et non plus surfaciques. Les descriptions classiques des interactions de van der Waals seront rappelées et des méthodes pour les incorporer au problème mécanique suggérées. A travers l'analyse de la longueur de pénétration des interactions de van der Waals, on tentera de se convaincre que cette approche peut contribuer à résoudre le problème...

## **Utilisation de forts courants impulsionnels pour la création de fortes pressions sans ondes de choc.**

J.Petit, P.Y. Chanal

Centre d'études de Gramat, BP 80200, 46500 Gramat

[jacques-m.petit@dga.defense.gouv.fr](mailto:jacques-m.petit@dga.defense.gouv.fr)

[pierre-yves.chanal@dga.defense.gouv.fr](mailto:pierre-yves.chanal@dga.defense.gouv.fr)

Les études de détonique et balistique font aujourd'hui largement appel à la simulation numérique. La crédibilité et la précision des résultats obtenus dépendent en grande partie de celles des modélisations utilisées pour déterminer l'état thermodynamique et le seuil de plasticité des matériaux utilisés. Différents moyens expérimentaux utilisant de forts courants impulsionnels ont été développés ces dernières années au centre d'études de Gramat pour répondre à ces incertitudes.

Un générateur de courant 4 MA-2 MHz (GEPI) est utilisé pour générer des rampes de compression sur échantillons plans, sans formation de choc, jusqu'à 100 GPa. Les mesures, essentiellement de vitesse, peuvent alors permettre de tester des modélisations de changement de phases ou, dans certaines géométries d'échantillons particulières, de recalculer directement l'état du matériau pendant sa compression.

Un autre générateur de courant de 5 MA-15 kHz (Cyclope) permet de tester des modèles de plasticité en configuration cylindrique. Sa principale caractéristique est de permettre la validation de modèles de comportement dans des gammes de déformations inaccessibles aux moyens de caractérisation conventionnels (jusqu'à  $\epsilon = 1.5$  et  $d\epsilon/dt \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$ ).

En parallèle aux études expérimentales, un effort a été entrepris pour le développement d'outils numériques de Magneto-Hydro-Dynamique qui permettent de comprendre les expériences et d'en fixer les limites d'exploitation.