

---

# MÉCAMAT

*Groupe de Travail « Mécanique des Polymères »*

*Groupe Scientifique et Technique de l'Association Française de Mécanique*

*parrainé par le G.F.P. (Groupe Français d'Etudes et d'Applications des Polymères)*

---

## **Compte-rendu de la journée de travail du Vendredi 1<sup>er</sup> Avril 2005**

La dernière réunion du groupe de travail « Mécanique des Polymères » de MECAMAT s'est tenue à Paris le Vendredi 1 Avril 2005, dans les locaux de l'ESPCI. Cette journée, articulée autour de quatre exposés d'une heure, était dédiée à la viscoélasticité, avec un éclairage particulier sur les origines physiques et les outils conceptuels utilisés pour traduire les différentes sources de non-linéarité. Elle a compté une cinquantaine de participants dont un quart d'industriels, du secteur automobile en particulier. Le programme de la journée était le suivant :

### **10 h Jean-Yves CAVAILLE (GEMPPM – INSA de Lyon)**

*Polymères Amorphes. Transition Vitreuse, Propriétés viscoélastiques linéaires et non linéaires*

Le comportement mécanique des polymères à l'état solide sous forte contrainte est fortement non linéaire. Il est remarquable que peu d'approches théoriques aient essayé de corrélérer les données expérimentales à faible déformation (mécanismes de relaxation en analyse dynamique mécanique) et les données en régime non linéaire, en dessous ou au voisinage de la transition vitreuse (Tg). La très forte variation des temps caractéristiques de la mobilité moléculaire sous contrainte et déformation élevées est comparable à ce qui est observé au voisinage de Tg. Une revue des approches classiques des théories de la transition vitreuse, et plus généralement des mécanismes de la mobilité moléculaire dans les matériaux amorphes est donc intéressante pour en montrer la richesse et les limites. L'extrapolation au régime non linéaire proposée ici repose sur un formalisme basé sur la métallurgie physique, dans lequel le concept de dislocation est associé à l'intensité de fluctuations de densité dans le matériau sur des échelles de quelques nm, elle même étroitement fonction des conditions thermomécaniques qui lui sont appliquées. Le passage en formalisme tensoriel de la loi de comportement permet maintenant de comparer à des essais sous champ de contrainte complexe (thèse de Renaud Renaldi, GEMPPM & LAMCOS, INSA).

### **11 h François SIDOROFF (LTDS - Ecole Centrale de LYON)**

*Viscoélasticité: Variables Internes et Grandes Déformations*

Le propos de l'exposé est d'apporter un éclairage sur les formalismes par variables internes et sur la prise en compte de non-linéarités géométriques. Dans le cadre des petites déformations, la symétrie des approches en contraintes ou en déformations est établie. La combinaison d'éléments rhéologiques unitaires permet de construire 21 types de modèles que l'on peut classer selon leurs réponses instantanées et différées. Les modèles paraboliques (à dérivées fractionnaires) échappent à cette classification par l'association particulière qu'ils font des comportements aux temps courts et aux temps longs. Ils s'avèrent plus économiques que les modèles rhéologiques à n branches qui leur sont équivalents.

En grandes déformations, les formulations sont très différentes selon qu'il s'agit de fluides, pour lesquels un formalisme eulérien est impératif, ou de solides, pour lesquels un formalisme lagrangien redevient pertinent. A la différence de la plasticité, en viscoélasticité, la signification physique de la configuration intermédiaire définie par partition cinématique du tenseur gradient de transformation n'est pas établie.

Du point de vue mécanique, la viscoélasticité apparaît comme un domaine « spécifique » en cela que les formalismes par variables internes s'appliquent mais de façon non exclusive. Les écritures par variables internes restent d'usage commode et assez naturel dans une gamme fréquentielle limitée. La multiplication de variables internes permet néanmoins d'étendre cette gamme de fréquence, au détriment cependant de la simplicité originale de l'outil.

## Déjeuner

### 14h **Amina ALAOUI (LAMI – Ecole des Ponts & Chaussées)**

#### *Visco-hyperélasticité par approche intégrale : modélisation et confrontation aux essais*

Le modèle « pseudo-linéaire » présenté ici est un exemple de formalisme héréditaire. Le contexte de son développement est celui d'une identification facile, de la capacité à identifier le terme source de dissipation à partir du comportement et de la possibilité d'intégration dans un code de calcul par Eléments Finis. Il est écrit dans un cadre lagrangien complet et repose sur l'hypothèse d'une écriture possible du potentiel viscoélastique sous forme quadratique. L'enjeu consiste à construire une mesure de déformation  $\mathbf{E}$  telle que le potentiel viscoélastique puisse s'écrire sous une forme quadratique impliquant le tenseur de relaxation  $\mathbf{R}$ . La non-linéarité du comportement est contenue dans la mesure de déformation  $\mathbf{E}$ , et le tenseur de relaxation  $\mathbf{R}$  est alors identifié en hpp. Ce modèle, pour lequel un découplage entre  $\mathbf{R}$  et  $\mathbf{E}$  constitue une hypothèse forte, sort de son cadre d'applicabilité dès lors que le niveau de déformation modifie la réponse en relaxation.

La dernière partie de l'exposé est consacrée à la formulation variationnelle du problème mécanique, à l'implémentation en 2D par développement d'un super-élément, et aux résultats de simulations pour deux problèmes axi-symétriques.

### 15h **Jean-Michel MURACCIOLE (LMGC – Université de Montpellier)**

#### *Effet thermo-élastique et viscoélasticité : couplages et dissipation*

Le cadre de l'étude est celui de la thermo-viscoélasticité linéaire. Des essais de traction cyclés sont menés à température ambiante sur différents polymères (PMMA, PC, PVDF et Pebax) et couplés à une mesure de champ de température par thermographie infra-rouge. Une analyse comparative des contributions de dissipation et de couplage thermique à l'aire d'hystérésis est conduite dans le cadre de matériaux standards généralisés à partir des modèles de Zéner et Poynting-Thomson pour lesquels le coefficient de dilatation thermique porte sur des termes différents. Les termes de couplage thermique apparaissent prépondérants devant les termes de dissipation. La meilleure adéquation du modèle de Zéner pour le PMMA et de Poynting-Thomson pour le PC est constatée et commentée en regard des différences de mobilité moléculaire entre ces deux polymères à l'ambiante. La prise en compte de termes entropiques s'avère importante dans le cas du PVDF et du Pebax.

### 16h **Synthèse**

La brève discussion qui a clôt la réunion a essentiellement permis de confronter quelques points de vue sur l'état de l'art de la problématique.

En ce qui concerne les polymères amorphes, des travaux récents comme ceux menés à l'Insa de Lyon parviennent à une vision unifiée des mécanismes physiques en y associant un formalisme valable jusqu'aux grandes déformations.

Pour ce qui est des polymères hétérophasés en général (semi-cristallins, élastomères chargés), la compréhension physique des phénomènes et de leurs couplages est moins aboutie. La nécessité de modèles viscoélastiques est néanmoins cruciale. De ce fait, les formalismes plus phénoménologiques restent des recours actuels. Dans ce contexte, plusieurs questions restent ouvertes parmi lesquelles :

- Comment exprimer les non-linéarités matérielles ? Comment traduire les fortes modifications des paramètres matériau constatées en grandes déformations (au passage du seuil en traction par exemple) ?
- Les différents formalismes sont-ils équivalents ?
- Comme cela a été le cas en homogénéisation, le risque de se heurter à la nécessité d'un très grand nombre de variables internes et à l'extrême complexité de leurs couplages a été souligné. Un questionnement autour du choix pertinent d'un nombre restreint de variables internes s'avère crucial.
- Quel Volume Élémentaire Représentatif choisir ? Quelle microstructure décrire dans le VER ? Quel modèle micromécanique choisir ?

Une des difficultés réside dans la compréhension physique des effets cinétiques de la transition vitreuse pour laquelle une description en température s'avère insuffisante. La dynamique moléculaire apparaît comme un moyen de compréhension de ces phénomènes à petite échelle.

De l'avis des participants, la thématique a encore beaucoup à gagner de la collaboration entre physiciens et mécaniciens...