

**Sylvie CASTAGNET, Jean-Claude GRANDIDIER, Mikael GUEGUEN, Yves NADOT**

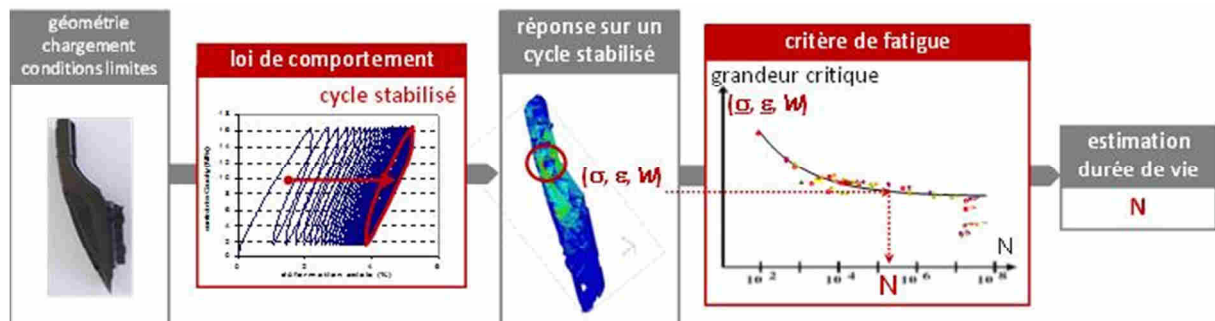
**Contacts :** sylvie.castagnet@ensma.fr, jean-claude.grandidier@ensma.fr, mikael.gueguen@ensma.fr,

**Partenariats :** Laboratoire de Mécanique et Génie Civil de Montpellier (équipe Thermomécanique)

**Thèses :** Berrehili 2009, Nguyen 2013

Malgré des enjeux industriels et la nécessité d'un dimensionnement fiable, la fatigue multiaxiale des thermoplastiques non-renforcés est un sujet peu abordé du point de vue de l'amorçage et du grand nombre de cycles. Les travaux menés à l'Institut Pprime relèvent des approches de dimensionnement en fatigue par critère. Ils ont donc des enjeux communs avec les travaux sur la Fatigue des Thermoplastiques Renforcés Fibres Courtes (décrits dans un autre document), traités en proportions variables pour chaque famille. La démarche générale d'un dimensionnement par critère est illustrée ci-après :

- Connaissant la géométrie de la pièce, le chargement représentatif et la loi de comportement du matériau, la réponse mécanique de la structure est calculée sur un cycle stabilisé (généralement au premier cycle sur les matériaux métalliques supposés élastiques ou en plasticité confinée).
- La grandeur mécanique critique intervenant dans le critère de fatigue (composantes du tenseur des contraintes, des déformations, terme énergétique,...) peut alors être cartographiée.
- Une estimation de la durée de vie  $N$  est alors extraite du critère de fatigue (qui relie  $N$  à la grandeur mécanique critique), en général au point critique (« point chaud »).



*Etapas d'un dimensionnement en fatigue par critère*

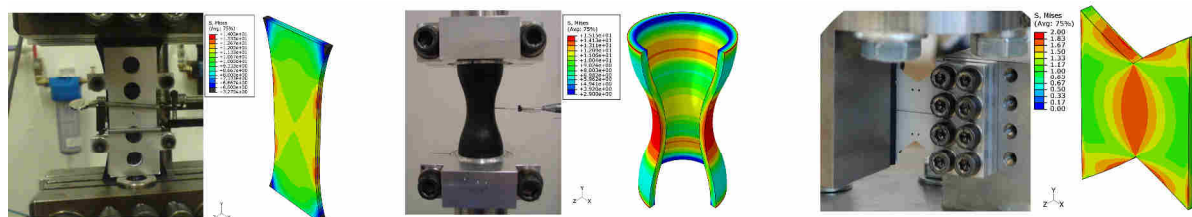
Une telle démarche appliquée aux polymères pose deux questions, en rouge sur le graphe :

- Sur un matériau viscoélastique, le début du cyclage s'accompagne d'une chute de raideur non nécessairement associée à de l'endommagement. Un premier enjeu est donc la définition et la prédiction d'un état stabilisé à partir duquel calculer les données d'entrée du critère.
- La construction de critères multiaxiaux adaptés aux polymères constitue le second enjeu. Pour les thermoplastiques « purs », le champ est très ouvert.

### Essais multiaxiaux

Le cadre multiaxial impose plusieurs types d'essais et de géométries d'éprouvettes. Outre les essais de traction classiquement menés sur éprouvettes haltère, nous réalisons des essais sur tubes sur machine bi-axiale en traction et torsion (seules ou combinées). L'avantage est de travailler sur des échantillons de même géométrie, en s'affranchissant des variations de microstructure induites par des procédés différents.

Nous avons également développé un essai de glissement de type Losipescu. La combinaison de ces différents types d'essais permet de dissocier les parts volumique et déviatorique dans la réponse thermo-viscoélastique, et de dialoguer ainsi de façon plus naturelle avec les modèles thermo-viscoélastiques développés en parallèle. La géométrie de l'éprouvette a été optimisée numériquement pour garantir un chargement de cisaillement le plus propre possible et l'effet de structure a été analysé par confrontation à des mesures de champs de déformation par corrélation d'images numériques. De façon plus générale, l'analyse de ces essais est fortement adossée à la simulation numérique par éléments finis pour la compréhension des hétérogénéités de champs mécaniques et la détection de zones critiques.



*Géométries d'éprouvettes testées en traction, torsion et cisaillement*

## Critère multiaxial

Sur la base des essais précédemment décrits, à plusieurs rapports de charge, une première tentative de formulation d'un critère de durée de vie a été proposée dans la thèse de Berrehili (2009).

Dans ce travail, basé sur un polyéthylène non-renforcé, la fin de vie de l'éprouvette intervenait par localisation de la déformation, et non par initiation et propagation d'une fissure.

## Notion d'état stabilisé - Modélisation thermo-mécanique fortement couplée de l'accommodation cyclique

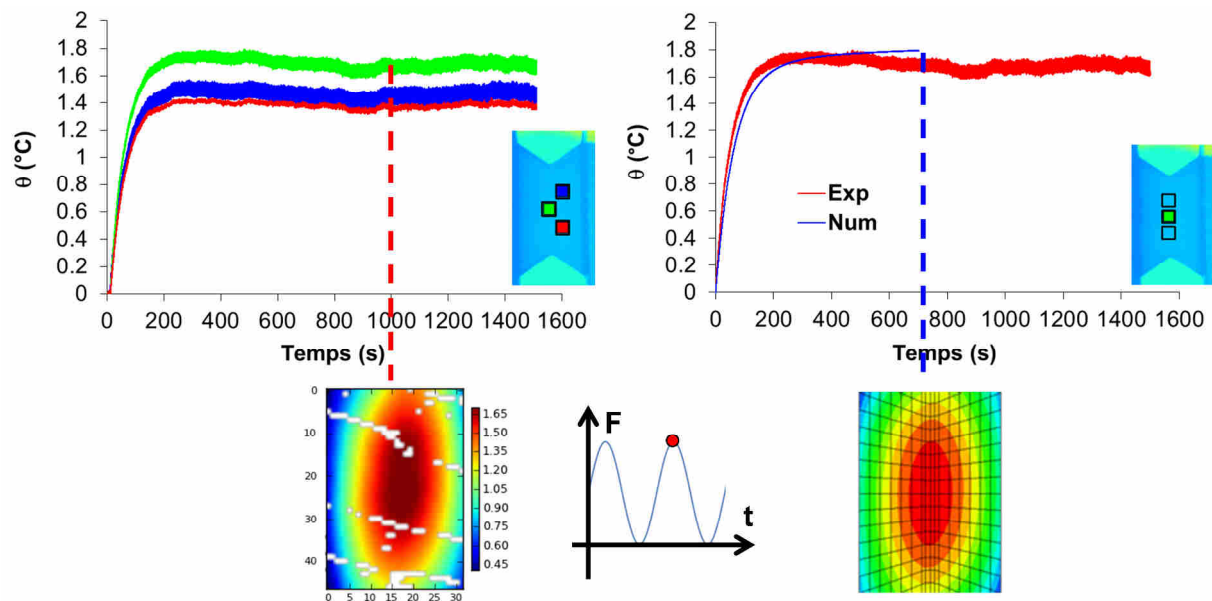
Dans une approche de dimensionnement en fatigue basée sur un critère multiaxial, les paramètres d'entrée du critère (contraintes, déformations, termes énergétiques) sont généralement calculés sur un état stabilisé. Dans les métaux, il s'agit souvent du premier cycle, en supposant que le matériau se comporte élastiquement ou présente des processus de plasticité très localisés. Dans les matériaux viscoélastiques comme les polymères, l'évolution significative de la raideur en début de cyclage soulève la question de la stabilisation du cycle sur lequel les paramètres mécaniques devraient être calculés. Un enjeu majeur est donc de définir et prédire cet état stabilisé, c'est à dire non seulement l'évolution de la déformation moyenne qui accompagne le cyclage mais aussi la boucle stabilisée elle-même et les contributions énergétiques pertinentes. Pour être applicable à des structures, le modèle doit conserver un formalisme aussi maniable que possible.

La thèse de Berrehili (2009) s'était intéressée à la sensibilité de cet état accommodé aux paramètres de chargement (rapport de charge, fréquence, blocs de chargement). Il a clairement été mis en évidence que l'accommodation cyclique résulte de conditions thermo-mécaniques.

L'objectif de la thèse de Nguyen (2013) a donc été de caractériser expérimentalement (en collaboration avec le LMGC de Montpellier) et de modéliser cette accommodation cyclique dans un cadre thermo-viscoélastique fortement couplé.

Le travail a été mené sur les 1000 premiers cycles de la vie d'un polyéthylène. La première partie du travail a été menée dans un cadre supposé isotherme, à température ambiante et à faible fréquence. La comparaison d'essais de traction et de cisaillement de type Losipescu a permis de discuter les parts volumique et déviatorique. Un modèle viscoélastique non linéaire isotherme en petites déformations a été proposé en parallèle, dans le cadre de la Thermodynamique des Processus Irréversibles. Il permet de prédire l'évolution de l'aire de la boucle d'hystérésis, son inclinaison et la dérive de la déformation moyenne de façon satisfaisante sur une gamme d'essais cycliques plus large que ce qui est classiquement proposé dans la littérature.

Dans une deuxième partie, l'étude expérimentale et théorique a été étendue au cadre thermo-mécanique. Des essais de traction et cisaillement ont été réalisés par le LMGC de Montpellier, avec une mesure de champs de température et déformation en cours d'essai qui permet de calculer les différents termes de l'équation de diffusion de la chaleur et d'accéder aux sources de chaleur. Ces résultats expérimentaux ont été analysés et confrontés à une extension du modèle thermo-viscoélastique du modèle dans laquelle le couplage est introduit via la thermo-élasticité (par la déformation volumique) et via la dissipation visqueuse (sur la base du principe d'équivalence temps-température). Après implémentation dans Abaqus®, l'ensemble de l'éprouvette a été simulée pour permettre cette comparaison.



Mesure expérimentale (gauche) et prédiction (droite) des champs des variations de température au cours d'un essai de cisaillement cyclique à  $R=0.1$

## Publications associées

A. Berrehili, Y. Nadot, S. Castagnet, J.C. Grandidier, C. Dumas. *Multiaxial fatigue criterion for a polypropylene involved in automotive applications*, International Journal of Fatigue, 32, pp. 1389–1392, 2010.

[PR-16]A. Berrehili, S. Castagnet, Y. Nadot, *Multiaxial fatigue criterion for a high-density polyethylene thermoplastic*, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 33, pp. 345-357, 2010.

S.T.T. NGuyen, S. Castagnet, J.C. Grandidier, *Non-linear viscoelastic contribution to the cyclic accommodation of high-density polyethylene in tension: experiments and modelling*, International Journal of Fatigue, 55, pp. 166-177, 2013.