

# Apports des mesures de champs d'énergie dissipée pour le dimensionnement en fatigue des élastomères et composites thermoplastiques

Y. MARCO<sup>a</sup> *et al.*

a. Institut de Recherche Dupuy de Lôme (IRD - FRE CNRS 3744)

ENSTA Bretagne

Yann.marco@ensta-bretagne.fr

## Résumé

*Cette contribution tente de répondre aux attentes du colloque annuel Mécamat 2017 qui vise de partir de la problématique du dimensionnement en fatigue des structures et des outils qui y sont adossés, pour aller vers les approches «amont » sur le matériau destinées à faire progresser ces outils. Nous nous intéressons ici en particulier aux matériaux thermoplastiques renforcés de fibres courtes et aux élastomères chargés. Dans un premier temps, les difficultés principales de dimensionnement pour ces deux classes de matériaux sont évoquées. Une technique de caractérisation des champs d'énergie dissipée est ensuite décrite succinctement. Puis certaines réponses apportées aux attentes industrielles sont détaillées : validation de la chaîne numérique de dimensionnement, investigation rapide de l'influence des paramètres sur la tenue en fatigue et capacité de diagnostic sur structures. Dans une dernière partie, les verrous de compréhension et les perspectives de développement sont détaillés.*

**Mots clés :** Energie dissipée ; Matériaux hétérogènes ; Auto-échauffement ;

## 1. Contextes, démarches et attentes industrielles

### 1.1 Thermoplastiques renforcés de fibres courtes

Les composites thermoplastiques injectés renforcés de fibres courtes sont des candidats idéaux au remplacement des matériaux métalliques dans l'optique de l'allègement des structures, pour des industries à hautes cadences de production. La complexité des formes accessibles par l'injection permet de compenser la chute relative de rigidité par des renforts géométriques (nervures, parois, variations d'épaisseur, ...). La complexité du dimensionnement pour l'ingénieur est par contre très fortement accrue du fait de 2 facteurs. Le premier est le comportement complexe de la matrice (visco-elasto-plastique endommageable), sensible à la température et à l'humidité [1,2,14,16,17]. Le second est la dépendance à l'ordre 1 de la réponse et la ruine de ces matériaux composites à l'orientation des fibres induite par l'écoulement dans le moule d'injection. Comme le montre la Figure 1, la chaîne de dimensionnement en fatigue nécessite donc un premier calcul de ces tenseurs d'orientation, puis l'utilisation d'une loi de comportement anisotrope (et dépendante de l'environnement de service) et enfin, l'application d'un critère de fatigue pertinent pour les conditions de chargement, de conditionnement et de microstructure locales.

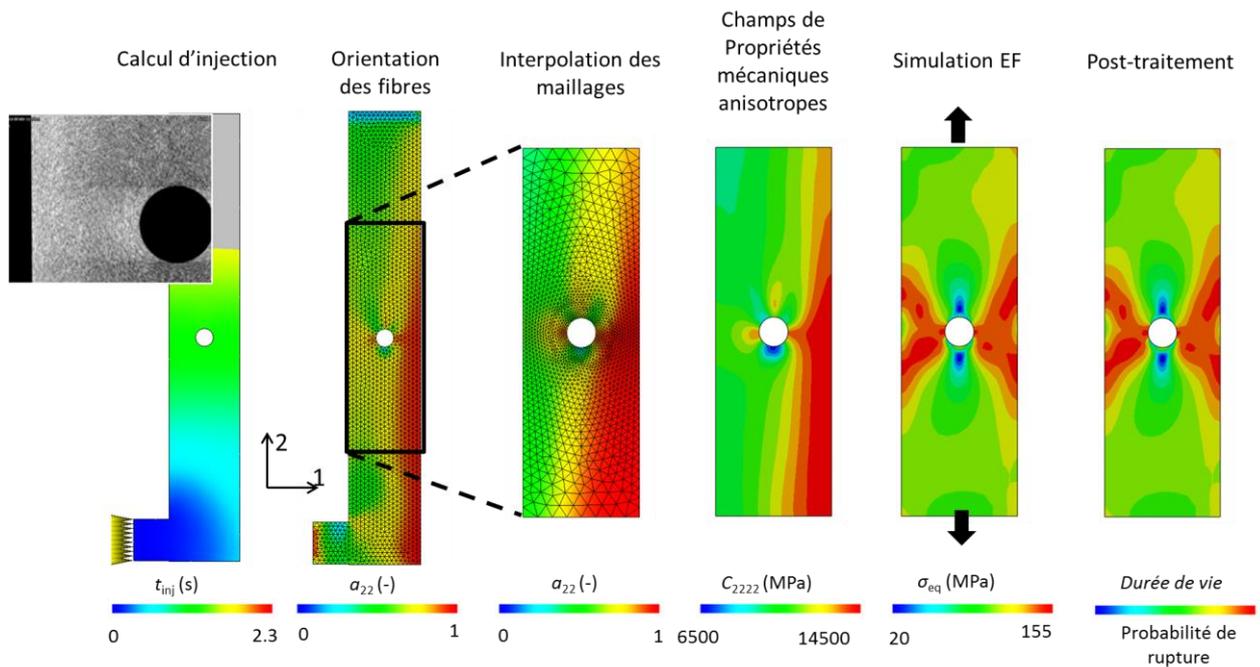


Figure 1. Chaîne numérique de dimensionnement en fatigue (thermoplastiques fibrés injectés).

## 1.2 Elastomères chargés

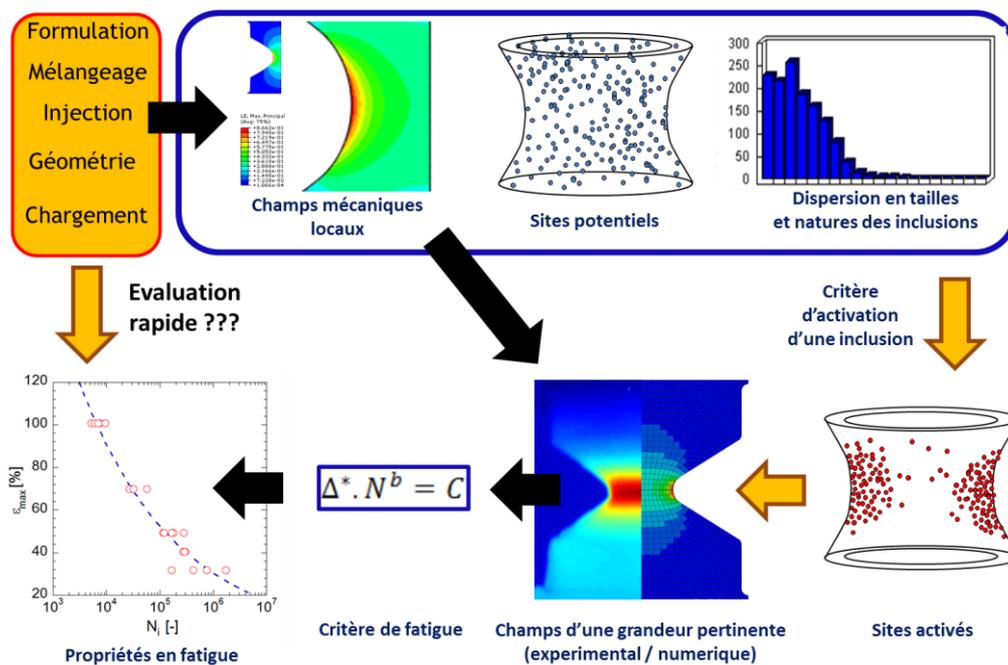


Figure 2. Chaîne numérique de dimensionnement en fatigue (élastomères chargés).

Il s'agit ici aussi de composites à matrices organiques, présentant donc des difficultés de dimensionnement communes avec le cas précédent (comportement dissipatif complexe, sensibilité à l'environnement). Néanmoins, outre les grandes déformations et l'auto-échauffement fort de ces matériaux à vocation antivibratoire, la difficulté vient ici de la grande diversité de mélanges et de paramètres du procédé qui pilotent la dispersion en taille et en natures des inclusions critiques [3]. La Figure 2 présente des éléments de la chaîne de dimensionnement, en sachant que la démarche actuelle utilise uniquement la boucle avec les flèches noires.

### 1.3 Attentes industrielles

Les attentes des partenaires industriels sont de manière classique les suivantes :

- **Validation des étapes de la chaîne numérique pour le comportement et la ruine.** Outre le critère de fatigue, les difficultés concernent l'intégration de l'anisotropie pour les composites fibres courtes et la prédiction de l'auto-échauffement pour les élastomères chargés ;

- **Sondage rapide de l'influence de multiples paramètres sur la tenue en fatigue.** Ces paramètres peuvent être microstructuraux (taille et orientation des renforts), environnementaux (température, humidité), ou mécaniques (rapport de charge, biaxialité,...). C'est là encore une problématique commune à de nombreux matériaux mais l'accélération de la caractérisation en fatigue ne peut se faire par une augmentation de la fréquence du fait de la nature dissipative de ces matériaux combinée à une forte sensibilité à la température;

- **Diagnostic rapide sur démonstrateurs et pièces.** La durée et le coût des campagnes de caractérisation en fatigue impactent également le développement et la validation des prototypes, qui sont évidemment plus onéreux que des éprouvettes. Une technique de caractérisation rapide des propriétés en fatigue applicable aux structures serait donc très intéressante.

L'objectif du paragraphe 3 est de proposer une illustration des éléments de réponse apportés par une caractérisation énergétique sur ces différents points.

## 2. Champs d'énergie dissipée et courbe d'auto-échauffement

### 2.1 Caractérisation des champs d'énergie dissipée

La caractérisation par thermographie infrarouge donne accès à des champs de température de surface. Deux difficultés sont donc à résoudre : d'une part, identifier les termes sources de dissipation car la température n'est pas une caractéristique intrinsèque du matériau (les valeurs atteintes dépendant de la géométrie et des conditions d'échange) et dans le même temps évaluer leur répartition spatiale dans le volume. Il est pour cela nécessaire de résoudre l'équation de la chaleur. Le format réduit du document ne permet malheureusement pas une présentation de détails, qui sont disponibles dans d'autres références [4,5]. Dans les cas investigués ici, nous prenons avantage de la différence importante entre le temps caractéristique de sollicitation mécanique cyclique (1 seconde pour une sollicitation à 1 Hz) et les temps d'échange thermique (conduction, convection) pour utiliser une hypothèse adiabatique sur les premiers instants du chargement. Les champs d'énergie dissipée sont alors obtenus par soustraction des champs de température entre deux instants de configuration mécanique identiques, proches entre eux et au début de l'essai [6,7]. Soulignons ici que la résolution thermique est un point clef de ces mesures et que le soin apporté tant à la calibration de la caméra qu'aux conditions expérimentales est essentiel.

### 2.2 Génération de courbes d'auto-échauffement

Le principe d'un essai d'auto-échauffement est de soumettre une éprouvette à des blocs comprenant un chargement cyclique d'amplitude donnée (en effort ou déplacement) et un refroidissement en enregistrant la variation de température pour chaque bloc [18-20]. L'enchaînement des blocs se fait à amplitude croissante et le dernier bloc de sollicitation cyclique est mené jusqu'au critère de ruine (en initiation, ici). Ce dernier bloc de chargement permet de d'identifier la zone d'initiation. Une cartographie d'énergie dissipée est évaluée pour chaque bloc. Pour relier l'énergie dissipée au critère de ruine, l'analyse locale de ces cartographies dans la zone d'initiation permet alors de construire une courbe d'auto-échauffement et de relier l'énergie dissipée au critère de ruine [5].

### **3. Réponses aux attentes industrielles**

#### **3.1 Alimentation et validation de la chaîne de dimensionnement**

Les champs d'énergie dissipée offrent une base de validation précieuse pour les outils de modélisation. La première illustration concerne la validation de la chaîne numérique intégrant une modélisation phénoménologique élasto-visco-plastique du comportement d'un composite thermoplastique [6]. La seconde illustration vise l'identification d'un modèle d'auto-échauffement pour les matériaux élastomères [8]. Dans les 2 cas, une éprouvette complexe est considérée et l'analyse des champs de dissipation est essentielle.

#### **3.2 Identification rapide des propriétés en fatigue pour une approche paramétrique**

L'analyse de la courbe d'auto-échauffement permet d'identifier un critère énergétique de durée de vie. Dans les cas considérés ici, cette identification se fait sur la base d'une analyse à seuil, reliant la variation de la forme de la courbe à une durée de vie fixée arbitrairement. La validité de cette approche et les perspectives d'amélioration seront discutées dans le point 4. Cette approche pragmatique est néanmoins très efficace (1 éprouvette, 1 journée d'essai) et nous illustrons l'efficacité de cette approche pragmatique pour de très nombreux cas d'études :

- Multi-formulations [9] ;
- Multi-orientations [5-10] ;
- Multi-environnements (température, humidité) [5-10] ;
- Multi-rapport de charge [5].

#### **3.3 Diagnostic rapide sur démonstrateurs et pièces industrielles**

L'approche proposée permet d'analyser des champs de dissipation, ce qui ouvre son application à l'analyse des structures. Nous illustrons ici le potentiel de prédiction des propriétés en fatigue pour des éprouvettes à géométrie complexe [3,8-9], des éprouvettes technologiques visant la description d'un détail caractéristique de pièces réelles [5] et pour des pièces industrielles [10].

### **4. Limitations, verrous scientifiques et pistes de développement**

#### **4.1 Limitations et verrous scientifiques**

Comme illustré par le paragraphe précédent, la caractérisation des champs d'énergie dissipée et la prédiction rapide des propriétés en fatigue permettent de répondre à plusieurs attentes de l'ingénieur. Néanmoins l'approche proposée soulève plusieurs questions.

Un premier volet de questions concerne l'analyse empirique proposée : comment expliquer que cette prédiction soit aussi efficace ? Comment justifier une analyse à seuil pour ces matériaux ne présentant a priori pas de limite de fatigue ?

Un deuxième volet de questions concerne l'unification du critère en énergie dissipée, dont nous avons illustré la pertinence au cas par cas pour de nombreuses situations. En effet, les études réalisées illustrent également les limites d'une approche basée uniquement sur l'énergie dissipée. Première illustration, le critère énergétique en énergie dissipée est pertinent et peut être unifié dans de nombreux cas mais cela n'est pas systématique. Ce n'est pas le cas par exemple lorsque les rapports de charge sont très différents ( $R=0$  et  $R=-1$ ) ou que les conditions d'essais se placent de part et d'autre de la transition vitreuse. Une dépendance au type de signal (sinus ou trapèze) est également observée. Par ailleurs, les cartographies d'énergie dissipée ne donnent pas d'accès direct

à une cartographie de durée de vie [5]. Enfin, certaines études illustrent qu'un chargement préalable de fluage ou de fatigue à un niveau élevé modifie la courbe d'auto-échauffement, ce qui est très intéressant, mais que le critère énergétique identifié sur éprouvettes vierges est alors conservatif [5]. Enfin, la prédiction des propriétés en fatigue pour ces matériaux, est limitée pour l'instant à la courbe moyenne de fatigue : comment prédire également la dispersion ?

Pour répondre à ces questions et lever ces limitations, il est nécessaire de mieux relier l'énergie dissipée avec les mécanismes de fatigue et ce, pour différents cas de conditionnement (température, humidité), de chargement local et d'anisotropie. Pour cela, les deux pistes principales sont de se baser sur une modélisation fine et riche du comportement pour analyser la réponse en auto-échauffement et/ou de décrire l'évolution de l'endommagement en termes de population de défauts et de dissipation à l'échelle des défauts. Les paragraphes suivants évoquent certaines de ces pistes qui seront présentées dans l'exposé.

#### **4.2 Analyse basée sur une modélisation du comportement**

Une première possibilité est de se baser sur un modèle de comportement et de décrire la courbe d'auto-échauffement comme la signature d'une population de défauts. La dissipation des sites est alors évaluée et une loi de distribution d'activation peut être postulée. C'est par exemple la démarche adoptée – avec succès – par des études récentes sur les matériaux métalliques [15]. Dans le cas de ces matériaux, la source de dissipation – la micro-plasticité – est directement représentative de la tenue en fatigue. La forme de la courbe d'auto-échauffement est alors utilisée pour évaluer la courbe moyenne de fatigue mais aussi la dispersion. Dans le cas des matériaux considérés ici, cette approche reste compliquée du fait des très nombreuses sources de dissipation et des liens encore mal compris avec les mécanismes menant à la fatigue.

Nous illustrerons une première tentative d'approche pour les composites thermoplastiques pour un modèle de comportement déjà complexe [6] mais, pour les deux classes de matériaux investigués, il reste très difficile de dissocier les sources de dissipation et de décrire finement la boucle d'hystérèse, qui est un facteur clef de cette analyse.

#### **4.3 Analyse basée sur une description des populations de défauts**

Une autre alternative est de se baser sur une description expérimentale de la population de défauts et de combiner l'évolution de ces défauts avec la courbe d'auto-échauffement, de manière à évaluer – empiriquement – la part d'énergie dissipée liée au scénario de ruine. Ces approches ont été testées pour deux types de matrices élastomères (CR et NR), en se basant sur des mesures par micro-tomographie, ou par MEB dans le cas d'une initiation en surface. Que la population de sites activés soit stabilisée au bout de quelques milliers de cycles ou qu'elle évolue au long de l'essai en fatigue, ces deux approches ont permis d'obtenir une très bonne description de la courbe de fatigue, en utilisant un critère énergétique à un seul paramètre et sans analyse à seuil de la courbe d'auto-échauffement [3,8]. La courbe d'auto-échauffement étant très répétable, il a même été possible d'évaluer de manière raisonnable la dispersion de la courbe de fatigue à partir de celle sur la population de défauts. Cette approche se révèle donc très intéressante pour lever certaines limitations de l'approche proposée au paragraphe 3 mais les campagnes longues d'investigation des populations de défaut font irrémédiablement perdre l'aspect rapide de la caractérisation.

#### **4.4 Analyse basée sur un bilan énergétique à l'échelle de la microstructure**

Une dernière alternative est de viser la description de la dissipation à l'échelle de la microstructure, afin de mieux identifier la réponse dissipative liée aux mécanismes de fatigue. Nous proposons ici

deux illustrations, à deux échelles différentes. La première vise la description des composites thermoplastiques, en se plaçant à l'échelle des champs d'orientation des fibres. Des mesures de champs thermiques sont effectuées pour des cas de géométries complexes et combinant donc une microstructure induite par l'injection et des champs mécaniques complexes. Une deuxième illustration est proposée pour les matériaux élastomères avec une description des champs d'énergie dissipée effectuée cette fois à l'échelle des inclusions [3]. Au-delà de la compréhension des mécanismes, les résultats obtenus doivent encore alimenter une modélisation à cette échelle afin de permettre la transition d'échelle visée et la proposition d'un critère unifié.

## 5. Conclusion

La caractérisation des champs d'énergie dissipée constitue un outil précieux pour le dimensionnement des pièces composites et élastomères. L'approche de prédiction rapide par auto-échauffement offre une réponse de diagnostic rapide très efficace, à l'échelle des éprouvettes comme des structures (facteur 7 à 20 en délais et coûts). L'amélioration de l'analyse en termes de sens physique et de prédiction de la dispersion, à efficacité égale, nécessite une meilleure compréhension des bilans énergétiques et du lien avec les mécanismes de fatigue. L'appui sur une modélisation probabiliste et la caractérisation thermomécanique à faibles échelles doivent en permettre l'accès.

## Remerciements

Les résultats présentés ici sont issus de collaborations précieuses avec des collègues (V. Le Saux, C. Doudard, S. Calloch, H. Maitournam), des étudiants et ex-étudiants (A. Launay, L. Jégou, I. Masquelier, L. Serrano, C. Champy, L. Leveuf, Th. Glanowski) et aussi et surtout des partenaires industriels précieux (P. Charrier, I. Raoult, G. Robert) : merci à eux. Les financeurs des projets Région FEMEM, ANR PROFEM et FUI DURAFIP sont également à créditer.

## Références

- [1] A. Launay, *et al.* International Journal of Fatigue 47 (2013a): 382-389.
- [2] A. Krairi, I. Doghri. Int. J. Plasticity. 60 (2014): 163-181.
- [3] I. Masquelier. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale. 2014.
- [4] A. Chrysochoos, H. Louche. International Journal of Engineering Science 38 (2000) 1759–1788.
- [5] L. Serrano. Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale, 2015.
- [6] Y. Marco, *et al.* International Journal of Fatigue, 67(0):142 – 150, 2014.
- [7] I. Masquelier, *et al.* Mechanics of Materials, 80, Part A(0):113 – 123, 2015
- [8] V. Le Saux. Thèse de doctorat. Université de Bretagne Occ. 2010.
- [9] Y. Marco *et al.* Sous presse. Rubber Chemistry and Technology, 2016.
- [10] L. Jégou. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 2012.
- [11] A. Launay, *et al.* International Journal of Fatigue 47 (2013b): 390-406.
- [12] B. Klimkeit. Thèse de doctorat, ENSMA, 2009.
- [13] Y. Marco *et al.* Sous presse. Rubber Chemistry and Technology, 2016.
- [14] H. Nouri, F. Meraghni, P. Lory. International Journal of Fatigue, 31: 934–942, (2009).
- [15] C. Doudard, S. Calloch, P. Cugy, A. Galtier, F. Hild. Fatigue Fract Eng Mater Struct, 28:279, 2005.
- [16] H. Rolland, N. Saintier, G. Robert, Composites Part B 90 (2016) 365-377.
- [17] M.F. Arif, *et al.* Composites: Part B 61 (2014): 55-65.
- [18] Luong MP. Mech Mater 1998;28:155–63.
- [19] LaRosa G, Risitano Int J Fatigue 2000;22:65–73.
- [20] G. Meneghetti. International Journal of Fatigue 29 (2007) 81–94.