

Modélisation multi-échelle de composites très fortement chargés (propergols solides, composites à copeaux de bois lamellés)

Carole NADOT-MARTIN, Damien HALM, André DRAGON, Mikael GUEGUEN

Contacts : carole.nadot@ensma.fr ; damien.halm@ensma.fr ; andre.dragon@ensma.fr ;
mikael.gueguen@ensma.fr

Partenariats : CEA (Centre d'Etudes de Gramat), DGA, Mines-ParisTech (CMM), Université de Colombie Britannique, Université Technologique de Sydney.

Contexte et historique des travaux : L'objectif général de cette opération est de développer une modélisation apte à fournir la réponse mécanique homogénéisée d'un composite énergétique, et simultanément, une estimation des champs locaux, de la dissipation mécanique locale, des caractéristiques microstructurales de l'endommagement (morphologie et position des défauts d'interface), qui permette à terme de mieux appréhender les mécanismes d'initiation et d'alimenter les modèles réactifs (allumage et cinétiques de propagation).

En tant que milieu à la fois élastomères et granulaires, les **propergols solides** présentent un comportement très complexe couplant de nombreuses non linéarités (viscoélasticité, transformations finies, endommagement par décohérence matrice-charge,...) dont l'activation dépend des conditions de sollicitation. Ces matériaux présentent par ailleurs un très fort taux de charges (> 60 % en volume, mais inférieurs à ceux des explosifs comprimés) à l'origine d'interactions complexes entre les particules et par suite d'une forte hétérogénéité de champ dans la matrice. La prise en compte d'une telle hétérogénéité s'avère essentielle pour l'estimation du comportement global mais aussi pour son influence sur les mécanismes d'endommagement. Elle constitue en soi une difficulté qui s'ajoute aux enjeux liés à la nature et au couplage des non linéarités des constituants. L'homogénéisation du comportement de ce type de matériaux est encore largement ouverte sur le plan international. Dans ce contexte et étant donné l'exigence supplémentaire d'accès à une estimation des champs locaux, nous développons une **approche spécifique, qualifiée d'« Approche Morphologique » (AM)**.

L'AM est le fruit d'extensions non linéaires successives des travaux antérieurs de Christoffersen (1983) pour des composites fortement chargés élastiques linéaires. Dans le cadre des Petites Perturbations, la **viscoélasticité** de la matrice a tout d'abord été incorporée [1], puis **l'endommagement des interfaces** [2,4,5]. L'AM a ensuite été étendue en **transformations finies** (sans endommagement) en considérant la phase élastomère hyperélastique, puis viscohyperélastique [3,5]. Les estimations aux deux échelles obtenues dans ce cadre ont été confrontées avec succès aux solutions de référence issues de simulations en champs complets sur microstructures artificielles [5] et réelle. Enfin, les travaux les plus récents concernant les propergols solides ont permis de démontrer les aptitudes de l'AM (version HPP) à restituer les **effets de taille et d'interaction de particules sur la chronologie des décohérences interfaciales** observée expérimentalement [6], et enfin de coupler les grandes déformations de la matrice et l'endommagement.

Nouvelles applications : L'AM a été adaptée pour pouvoir traiter des **composites à copeaux de bois lamellés**. En considérant la matrice viscoélastique linéaire isotrope (séries de Prony) et les copeaux élastiques linéaires orthotropes, l'AM permet de restituer les propriétés viscoélastiques effectives avec **moins de 1% d'erreur** par rapport aux solutions en champs complets et ce, pour différentes fractions volumiques de résine (1-7%) et valeurs de contraste. Au-delà de l'intérêt de l'AM pour ces composites, ce travail récent a permis de franchir une étape supplémentaire dans l'évaluation de l'AM en démontrant son efficacité en viscoélasticité dans le cas où les **renforts ne sont plus isotropes** [7].

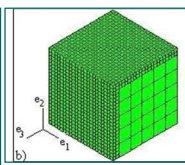
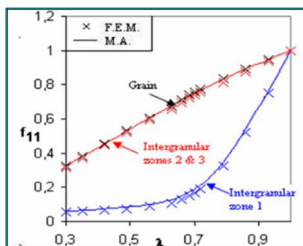
Spécificités et points forts de l'AM : Outre le fait d'être exclusivement réservée aux microstructures fortement chargées, la principale spécificité de l'AM réside dans son caractère *direct*, manifesté sous trois formes :

- Tout d'abord dans ses fondations, par une représentation *explicite* de la microstructure dans laquelle chaque grain et zone de matrice intergranulaire est schématisé, labellisé et caractérisé via des paramètres morphologiques. Cet aspect distingue l'AM des méthodes de type Eshelby (versions classiques) et par là même, la rapproche (toute proportion gardée) des approches en champs complets. Il contribue à l'accès aux champs

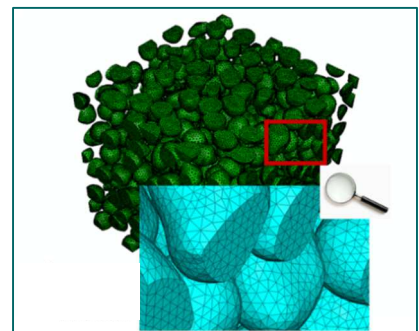
dans les zones intergranulaires, aux caractéristiques de la décohésion (position et morphologie) et permet d'intégrer dans les estimations aux deux échelles une information microstructurale riche.

- En second lieu, l'AM permet une résolution directe du problème hétérogène, *sans linéarisation* préalable des lois constitutives locales. Cela facilite la prise en compte de non linéarités couplées et évite les questionnements sur le choix d'une procédure de linéarisation. Une autre manifestation du caractère direct s'apprécie en viscoélasticité au travers d'une résolution dans *l'espace-temps réel* sans recours aux Transformées de Laplace. Ainsi, l'AM répond (dans sa catégorie) à l'enjeu de simplifier le traitement des comportements dépendant du temps. La qualité des estimations témoigne en outre d'une gestion efficace du couplage espace-temps au sein du milieu hétérogène et de l'effet mémoire longue conséquent à l'échelle macroscopique.

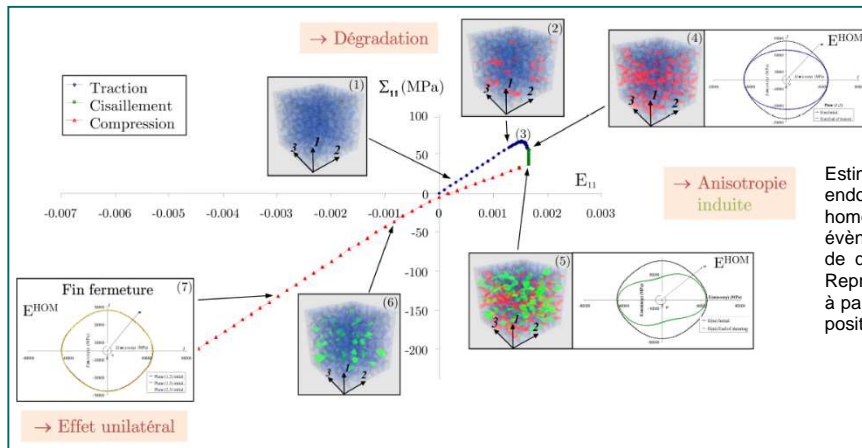
- Enfin, l'aspect direct de l'AM se manifeste par l'accès à une estimation des champs locaux, avec une *hétérogénéité dans la matrice fonction de la morphologie locale de la zone intergranulaire considérée*. Les interactions entre deux particules opposées et par suite la déformation d'une zone intergranulaire, prévues par l'AM, dépendent de l'épaisseur et de l'orientation de la zone intergranulaire et impliquent un indicateur de la taille des particules en regard. C'est cet atout qui permet de restituer les effets de taille de particules sur la chronologie des décohésions au sein de composites énergétiques.



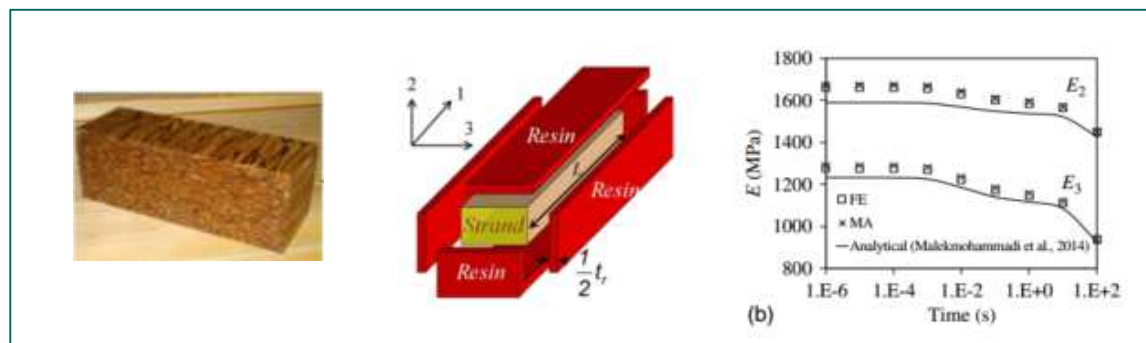
Comparaisons AM (version en transformations finies sans endommagement) / EF. Microstructure périodique soumise à une compression oedométrique selon l'axe e_1 . Matrice viscohyperélastique. Maillage EF d'1/8 de la cellule de base et dilatations axiales dans le grain et les 3 zones intergranulaires [3].



Maillage EF volumique d'une microstructure propergol monomodale obtenue par microtomographie RX.



Estimations de l'AM (version HPP avec endommagement). Evolution de la réponse homogénéisée et de son anisotropie en fonction des événements discrets locaux (nucléations et fermetures de défauts) se produisant en cours de chargement. Représentations 3D de la microstructure (reconstruites à partir des sorties de l'AM) permettant de visualiser la position des défauts [4].



Echantillon de composite à copeaux de bois lamellés (PSL), cellule élémentaire pour l'AM et comparaison AM (version HPP en viscoélasticité) / EF pour les modules de relaxation transverses [7]. Les estimations AM (croix) sont meilleures que celles des travaux antérieurs (ligne).

Thèses soutenues :

- 1999 Carole Martin : Contribution à l'homogénéisation du comportement viscoélastique et de la détérioration d'une classe d'élastomères fortement chargés.
- 2005 Boris Guiot : Contribution à la transition d'échelles en (visco)-hyperélasticité pour une classe d'élastomères fortement chargés.
- 2007 Marion Touboul : Approche multi-échelles morphologique et directe pour une classe de composites particuliers fortement chargés hyperélastiques et viscohyperélastiques.
- 2008 Sophie Dartois : Prise en compte de l'évolution de l'endommagement anisotrope dans une modélisation par transition d'échelle pour des composites particuliers.
- 2015 Marion Trombini : Couplage endommagement - grandes déformations dans une modélisation multi-échelle pour composites particuliers fortement chargés.

Publications sélectionnées :

- [1] C. Nadot-Martin, H. Trumel and A. Dragon. Morphology-based homogenization for viscoelastic particulate composites: Part I: Viscoelasticity sole, *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol. 22(1), pp. 89-106, [https://doi.org/10.1016/S0997-7538\(02\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S0997-7538(02)00003-7), (2003).
- [2] C. Nadot, A. Dragon, H. Trumel and A. Fanget. Damage modelling framework for viscoelastic particulate composites via a scale transition approach, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 44(3), pp. 553-583, <http://www.ptmts.org.pl/jtam/index.php/jtam/article/view/v44n3p553>, (2006).
- [3] C. Nadot-Martin, M. Touboul, A. Dragon and A. Fanget. Direct scale transition approach for highly-filled viscohyperelastic particulate composites: computational study, Chapitre 12 [dans] *Multiscale Modeling of Heterogeneous Materials: From Microstructure to Macro-scale Properties*, O. Cazacu ed., Wiley-ISTE, pp. 218-237, <http://dx.doi.org/10.1002/9780470611364.ch12>, (2008).
- [4] S. Dartois, C. Nadot-Martin, D. Halm, A. Dragon and A. Fanget. Micromechanical modeling of damage evolution in highly-filled particulate composites - Induced effects at different scales, *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 22(7), pp. 927-966, <https://doi.org/10.1177/1056789512468916>, (2013).
- [5] C. Nadot-Martin, D. Halm, S. Dartois, M. Touboul, A. Dragon and A. Fanget. Direct Multiscale "Morphological Approach" for non linear highly-filled particulate composites: theory and applications, *International Journal of Materials and Structural Integrity*, Vol. 7(1-3), pp. 109-130, <https://doi.org/10.1504/IJMSI.2013.055108>, (2013).
- [6] M. Trombini, C. Nadot-Martin, D. Halm, M. Gueguen, G. Contesse, A. Fanget. Multiscale damage modeling with the "Morphological Approach" to highlight particle size and interaction effects in highly-filled particulate composites, *European Journal of Mechanics A-Solids*, Vol. 53, pp. 163-174, <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2015.04.004>, (2015).
- [7] S. Malek, C. Nadot-Martin, B. Tressou, C. Day, R. Vaziri. *Micromechanical Modeling of Effective Orthotropic Elastic and Viscoelastic Properties of Parallel Strand Lumber Using the Morphological Approach*. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 145(9), Article number 04019066, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001631](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001631), (2019).