

Journées Thématiques des Groupes de Travail :
**Approches Probabilistes en Mécanique des Milieux Hétérogènes –
Rhéologie des Matériaux Hétérogènes – Traitements Thermomécaniques**

PROGRAMME

Jeudi 14 mai 2009

9h00-9h15 Accueil Bât A10, 1er étage, amphi de Licence Chimie

9h15-9h30 Introduction

HOMOGENEISATION – MODELES MULTI-EHELLES

9h30-10h30 : **J. M. AUGER**, **P. GOEURIOT**, **F. VALDIVIESO**, **F. MONTHEILLET**, Centre SMS/EMSE St Etienne : Lois d'homogénéisation pour des composites métal/céramique

10h30-11h00 : **C. CHATEAU**¹, **L. GELEBART**¹, **M. BORNERT**^{2,4}, **J. CREPIN**³, **D. CALDEMAISON**², ¹ SRMA/CEA Saclay, ² LMS Ecole Polytechnique, ³ Centre des Matériaux/ Mines ParisTech, ⁴ Ecole des Ponts ParisTech : Approche multi-échelle du comportement mécanique des matériaux composites SiC/SiC - Comportement élastique à l'échelle du toron

11h00-11h30 Pause café - - - - -

11h30-12h00 : **A. JEAN**^{1,2}, **D. JEULIN**^{1,2}, **F. WILLOT**², **S. FOREST**¹, ¹ Centre des Matériaux, ² CMM/ Mines ParisTech : Détermination numérique des propriétés physiques apparentes et effectives d'un élastomère chargé en noir de carbone

12h00-12h30 **F. WILLOT**, **D. JEULIN**, CMM/Mines ParisTech : Comportement élastique de milieux désordonnés multi-échelles à fort contraste

12h30-14h00 Repas Salle Badiane - - - - -

HOMOGENEISATION – MODELES MULTI-EHELLES - MICROTOMOGRAPHIE

14h00-14h30 : **C. BARBIER**, **R. DENDIEVEL**, **D. RODNEY**, SIMAP/GPM2, St Martin d'Hères : Modélisation de comportement mécanique de systèmes enchevêtrés

14h30-15h00 : **S. GUESSASMA**, INRA/BIA Nantes : Comportement mécanique des matériaux à base d'amidon

15h00-15h45 : **G. VIGNOLES**, LCTS Bordeaux : Transport de chaleur et infiltration chimique de gaz dans des milieux fibreux : méthodes numériques basées sur la microtomographie

15h45-16h30 Pause café - - - - -

CARACTERISATION 3D - MICROTOMOGRAPHIE

16h30-17h00 : **C. PEYREGA**¹, **D. JEULIN**¹, **C. DELISEE**², **J. MALVESTIO**², ¹ CMM/Mines ParisTech, ² US2B Bordeaux : Modèle booléen 3D de cylindres aléatoires renseigné par des images microtomographiques 3D de matériaux fibreux

17h00-17h30 : **C. DELISEE**¹, **E. BADEL**², **J. LUX**³, **J. MALVESTIO**¹, ¹ US2B Bordeaux, ² PIAF /INRA Clermont Ferrand, ³ LEPTIAB La Rochelle : Caractérisation microstructurale 3D et densification locale d'isolants fibreux cellulosiques sollicités en compression

Vendredi 15 mai 2009

CARACTERISATION 3D - MICROTOMOGRAPHIE

9h00-9h30 : **L. GELEBART**¹, **C. CHATEAU**^{1,2}, **M. BORNERT**², **J. CREPIN**³, **E. BOLLER**⁴,
¹ SRMA/CEA Saclay, ² LMS Ecole Polytechnique, ³ CDM/ENSMP, ⁴ ESRF Grenoble : Caractérisation par tomographie X de la macro porosité de composites SiC/SiC CVI-Effets sur le comportement thermo-mécanique

9h30-10h00 : **P. DUMONT**¹, **L. ORGEAS**², **S. ROLLAND DU ROSCOAT**², ¹ LGP2/INPG St Martin d'Hères, ² 3SR Grenoble : Analyse à partir de microtomographie RX de l'évolution microstructurale des composites GMT induite par leur mise en forme

10h00-10h30 : **H. NIANDOU**, **D. BREYSSE**, GHYMAC Bordeaux : Interaction sol-structure : déformation d'un radier sur un sol hétérogène en 3D

10h30-11h00 Pause café - - - - -

PROPRIETES MECANIQUES LOCALES

11h00-11h30 : **R. LACROIX**, PECM/EMSE St Etienne : Caractérisations mécaniques locales des points soudés THR pour la compréhension de leur tenue mécanique

11h30-12h00 : **P. DOUMALIN**, **A. GERMANEAU**, **J. C. DUPRE**, Laboratoire de Mécanique des Solides Poitiers : Mesures de champs cinématiques 3D par corrélation volumique et tomographie rayons X

12h00-13h45 Repas Château Castelterrefort - - - - -

ALLIAGES METALLIQUES

13h45-14h30 : **F. MONTHEILLET**, EMSE St Etienne : Estimation théorique de la mobilité des joints de grains au cours de la recristallisation dynamique des alliages métalliques

14h30-15h00 : **F. HANNA**, DEN/DANS/DM2S/SEMT/LTA/CEA Saclay : Modelling austenitisation of X10CrMoVNb9-1 martensitic steel

15h30-16h00 : **Conclusion des journées thématiques**

HOMOGENEISATION – MODELES MULTI-ECHELLES

Lois d'homogénéisation pour des composites métal-céramique

J-M. AUGER, P. GOEURIOT, F. VALDIVIESO, F. MONTHEILLET

École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne - UMR CNRS 5146 Centre SMS
Département MPE, 158 Cours Fauriel 42023 Saint Étienne cedex 2

auger@emse.fr

La problématique de la combinaison de propriétés différentes, voire opposées, dans un même matériau n'est pas nouvelle. Cependant, ces dernières années ont vu une augmentation du nombre d'études à ce sujet, pour des motifs environnementaux et économiques : il s'agit d'utiliser le minimum de matière dans une pièce et de la placer précisément à l'endroit utile (« le bon matériau au bon endroit »). Une approche possible pour cette idée est la réalisation de matériaux composites.

L'étude présentée se concentre sur la modélisation de lois de comportement mécanique, pour des composites dispersés acier inoxydable / alumine, obtenus par procédé de métallurgie des poudres. Ce procédé conduisant à la formation de porosité dans le matériau, les constantes (particulièrement élastiques) utilisées ont été modifiées pour prendre en compte les pores, plutôt que de les considérer comme une troisième phase. L'approche proposée est de type analytique, ce qui permet des calculs simplifiés et directs. Cependant, il convient de noter qu'il n'existe aucune garantie que les résultats obtenus soient des bornes ou même se rapprochent du comportement réel du composite.

Différentes hypothèses d'homogénéisation ont été testées, par analogie avec celles faites en déformation purement élastique :

- type Reuss (égalité des contraintes dans les deux phases)
- type pseudo-Voigt (égalité des déformations élastiques dans les deux phases)
- type pseudo Iso-W (égalité des énergies de déformation élastique dans les deux phases)
- type Eshelby avec inclusions métalliques (champs de contraintes supposé similaire à une inclusion élastique dans une matrice élastique)
- type Eshelby avec inclusions céramiques

Les résultats de ces modèles ont été comparés entre eux et avec des essais de compression uniaxiale, pour différentes compositions de composite recouvrant toute la gamme possible (de métal pur à céramique pure).

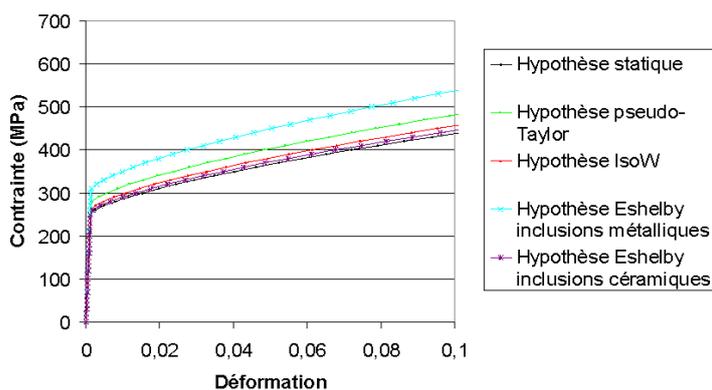


Figure 1 : Lois de comportement obtenues par différentes hypothèses

Approche multi-échelle du comportement mécanique des matériaux composites SiC/SiC : comportement élastique à l'échelle du toron

Chateau C.¹, Gélébart L.¹, Bornert M.^{2,4}, Crépin J.³, Caldemaison D.²

¹ CEA Saclay, SRMA, BP49, 91191 Gif/Yvette Cedex, France

² LMS Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex, France

³ Mines ParisTech, Centre des matériaux, CNRS UMR 7633, BP 87 91003 Evry Cedex, France

⁴ Ecole des Ponts Paristech, Unité de recherche Navier,

6-8, Avenue Blaise Pascal, Champs-sur-Marne, 77455 Marne-la-Vallée Cedex

camille.chateau@cea.fr

Les matériaux composites SiC_r/SiC_m, notamment grâce à leur bon comportement sous hautes températures et sous irradiations, sont envisagés pour réaliser le gainage du combustible dans les réacteurs nucléaires du futur (génération IV). Une approche multi-échelle a été entreprise au CEA afin de maîtriser les relations entre la structure microscopique hétérogène du matériau, qui résulte du procédé de fabrication, et son comportement macroscopique complexe [1]. La démarche s'appuie sur un double changement d'échelle (de la microstructure au toron et du toron au composite). L'étude se limite ici au premier changement d'échelle et à la modélisation du comportement linéaire du toron à température ambiante. Une attention particulière est portée à l'effet de la porosité résiduelle issue du procédé de fabrication CVI (Chemical Vapor Infiltration) et à l'anisotropie créée par la répartition des constituants au sein de la microstructure. Des observations au MEB d'un composite 2D SiC/SiC ont permis d'étudier, par analyse d'images, un nombre de torons suffisant pour obtenir des données statistiques sur les paramètres caractéristiques de la microstructure (diamètres de fibres, porosité résiduelle, ...). Ces données ont ensuite été utilisées dans une procédure numérique pour générer des microstructures représentatives. Enfin, la résolution du problème élastique d'homogénéisation a été réalisée par un calcul mécanique par éléments finis (CAST3M), en appliquant des conditions aux limites mixtes ou en déformations homogènes sur ces microstructures poreuses et aléatoires [2]. Les simulations de volumes de différentes tailles montrent des fluctuations du comportement apparent, le critère de séparabilité des échelles n'est donc pas satisfait. Néanmoins, ce problème est négligé en première approximation et le comportement homogène équivalent du toron est évalué en effectuant la moyenne des comportements apparents de plusieurs volumes plus petits que le Volume Élémentaire Représentatif (VER). On parle alors de Volumes Élémentaires Statistiques (VES) [3]. Les effets de la fraction volumique de porosité et de la morphologie des pores sur le comportement homogène équivalent estimé ont été caractérisés.

[1] Gélébart L., Colin C., "Effects of porosity on the elastic behaviour of CVI SiC/SiC composites", Accepté pour publication 2008, Journal of Nuclear Materials

[2] Pahr D., Zysset P., "Influence of boundary conditions on computed apparent elastic properties of cancellous bone", 2007, Biomechanics and Modeling in Mechanobiology 7, 463-476

[3] Ostoja-Starzewski M., "Material spatial randomness: From statistical to representative volume element", 2006, Probabilistic Engineering Mechanics 21, 112-132

Détermination numériques des propriétés physiques apparentes et effectives d'un élastomère chargé en noir de carbone.

A. Jean^{1,2}, D. Jeulin^{1,2}, F. Willot², S. Forest¹

¹Centre des Matériaux, MINES ParisTech - CNRS UMR 7633 - BP 87 Evry cedex

²Centre de Morphologie Mathématique, Mathématiques et Systèmes, MINES ParisTech,
35 rue St Honoré F77305 FONTAINEBLEAU

aurelie.jean@ensmp.fr

Mots clés : microstructure, morphologie, maillage, calcul parallèle

En mécanique des matériaux, la volonté actuelle est de chercher à mieux comprendre certains phénomènes macroscopiques en étudiant la microstructure et les phénomènes physiques à l'échelle microscopique. Cette approche est rendue possible par les nombreux développements dans les techniques d'homogénéisation en mécanique multi-échelles.

Au cours de cette présentation, on choisit de se pencher sur les élastomères chargés pour lesquels de nombreuses propriétés mécaniques sont étroitement liées à l'arrangement des particules et agrégats de noir de carbone dans la matrice élastomère, à l'échelle microscopique.

La démarche adoptée s'articule autour de deux objectifs principaux. Le premier consiste à modéliser la morphologie de la microstructure du matériau en utilisant un modèle aléatoire de morphologie mathématique [Jeulin and Le Coënt, 1995], [Savary, 1998] [Savary et al., 1999] [Delarue, 2001] [Moreaud and Jeulin, 2005], [Jean, 2009]. Ce dernier est identifié sur des images de microscopie à transmission via l'exploitation de mesures de moments statistiques confrontées à celles obtenues sur les simulations de microstructures [Jean et al., 2007].

Le second objectif consiste, à partir des microstructures ainsi simulées, à déterminer les propriétés effectives du matériau par le calcul par éléments finis et par le calcul de champ par FFT (Fast Fourier Transform) [Willot and Jeulin, 2008] à travers la notion de Volume Élémentaire Représentatif (VER). L'idée est de déterminer la taille du VER par une méthode numérique et statistique [Kanit et al., 2003] en cherchant à estimer les propriétés effectives par moyenne des grandeurs apparentes sur plusieurs réalisations, pour des simulations de microstructures de tailles croissantes. La détermination du VER porte sur les modules élastiques et la conductivité électrique.

La présente communication portera principalement sur ce deuxième point. On insistera également sur l'approche et les outils tels que le maillage par éléments finis ou encore le calcul parallèle appliqué aux matériaux fortement contrastés, qui ont été jugés nécessaires pour mener à bien ce second objectif.

[Delarue, 2001] Delarue, A. (2001). Préviation du comportement électromagnétique de matériaux composites à partir de leur mode d'élaboration et de leur morphologie. PhD thesis, École des Mines de Paris.

[Jean, 2009] Jean, A. (2009). Etude d'un élastomère chargé : de la nanostructure au macro-comportement. PhD thesis, Ecole des Mines de Paris - PariTech.

[Jean et al., 2007] Jean, A., Jeulin, D., Forest, S., Cantournet, S., Mounoury, V., and N'Guyen, F. (2007). Rubber with carbon black fillers: parameters identification of a multiscale nanostructure model. pages 141_146, Paris, France. Constitutive models for rubber V.

[Jeulin and Le Coënt, 1995] Jeulin, D. and Le Coënt, A., editors (1995). Morphological Modeling of random composites in Continuum Models Discrete System, Varna, Bulgarie. 8th International Symposium.

[Kanit et al., 2003] Kanit, T., Forest, S., Galliet, I., Mounoury, V., and Jeulin, D. (2003). Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach. International Journal of Solids and Structures, 40 :3647_3679.

[Moreaud and Jeulin, 2005] Moreaud, M. and Jeulin, D. (2005). Multi-scale simulation of random spheres aggregates : Application to nanocomposites. pages 341_348, Zakopane, Pologne. 9 ECS.

[Savary, 1998] Savary, L. (1998). Préviation du Comportement Electromagnétique de Matériaux Composites à partir de leur Morphologie. École des Mines de Paris.

[Savary et al., 1999] Savary, L., Jeulin, D., and Thorel, A. (1999). Morphological analysis of carbon-polymer composite materials from thick section. Acta Stereologica, 18(3) :297_303.

[Willot and Jeulin, 2008] Willot, F. and Jeulin, D. (2008). Elastic behavior of composites containing boolean random sets of inhomogeneities. International Journal of Engineering Science.

Comportement élastique de milieux désordonnés multi-échelles à fort contraste

François Willot, Dominique Jeulin

Centre de Morphologie Mathématique, Mathématiques et Systèmes,
MINES ParisTech, 35 rue St Honoré F77305 FONTAINEBLEAU

francois.willot@ensmp.fr

Ce travail s'inscrit dans la thématique classique en mécanique de l'homogénéisation de milieux hétérogènes, dans le cadre notoirement problématique d'un contraste infini entre les phases. Nous nous intéressons en particulier aux effets induits par une distribution non uniforme d'inclusions rigides ou de pores sur le comportement mécanique effectif. Plus précisément, nous considérons différents types de microstructures à deux échelles construites à l'aide de modèles Booléens de sphères (Jean et al., 2007). La dispersion spatiale des inclusions est contrôlée par le rapport entre les deux longueurs caractéristiques du matériau.

Les modules élastiques effectifs ainsi que les champs locaux en déformation et en contrainte sont calculés numériquement sur des systèmes de grande taille, grâce à la méthode par transformée de Fourier rapide (Moulinec et Suquet, 1994, Michel et al., 2000).

Comparé à un modèle de microstructure à une échelle (Willot et Jeulin, 2009), la dispersion des hétérogénéités sur de grandes échelles de longueur permet un renforcement appréciable du matériau dans le cas rigide, et inversement dans le cas poreux. Le comportement macroscopique reste cependant très éloigné de celui prédit par les bornes de Hashin-Shtrikman ou des bornes du "troisième ordre". Les distributions statistiques des champs de déformation et de contrainte, ainsi que leurs volumes élémentaires représentatifs sont calculés pour toute la gamme de fraction volumique en inclusion jusqu'à la percolation, et pour différents rapports d'échelle.

Modélisation du comportement mécanique de systèmes enchevêtrés

Carine Barbier, Rémy Dendievel, David Rodney

SIMAP – Grenoble INP – BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères cedex

Remy.Dendievel@simap.grenoble-inp.fr

On présente une simulation discrète dédiée à l'étude du comportement mécanique d'ensembles de fibres enchevêtrées. Pour limiter le nombre de degrés de libertés, les fibres sont discrétisées en segment. L'évolution de l'ensemble est calculée à partir d'algorithmes de type dynamique moléculaire. Le modèle permet de prendre en compte des paramètres géométriques (facteur de forme, fraction volumique, distribution d'orientation, ...) et des paramètres matériaux (flexibilité). Le comportement d'ensembles de fibres soumis à des compressions isostatiques est identifié en fonction de ces paramètres et fait ressortir quelques grandeurs caractéristiques telles que seuil de percolation, nombre de contacts par fibres, exposant de la loi puissance au-delà du seuil ... Le frottement entre fibres est également introduit et son influence est mise en évidence lors de cycles de compression / décharge. Une hystérésis est mise en évidence au cours de ces cycles et est reliée directement à la valeur du coefficient de frottement entre fibres. On montre également que la valeur du coefficient de frottement influe sur le seuil de percolation et sur le nombre de contacts, mais pas sur la valeur de l'exposant de la loi puissance.

Par ailleurs, les informations microscopiques telles que le nombre de contacts entre fibres en cours de compression permettent de valider des techniques d'analyse d'images dédiées à la détection des contacts. Ces techniques ont également été appliquées à des images de tomographie aux rayons X de laines d'acier.

Comportement mécanique des matériaux alvéolaires à base d'amidon

S. Guessasma, M. Chiad, G. Della Valle

U.R. Biopolymères, Interactions et Assemblages (BIA), INRA, rue de la géraudière, 44316 Nantes

Sofiane.guessasma@nantes.inra.fr

Les propriétés mécaniques des mousses solides à base d'amidon revêtent un intérêt tant pour leur possible application comme matériaux que pour prévoir les propriétés sensorielles et nutritionnelles d'aliments à base de céréales. Leur prédiction est toutefois ardue, notamment en raison de la diversité, caractéristique des produits alimentaires, des microstructures rencontrées. Ce travail propose une démarche d'identification basée sur la génération de solides cellulaires ayant des caractéristiques microstructurales communes aux solides cellulaires à base d'amidon. Le matériau cellulaire est obtenu expérimentalement par extrusion en faisant varier la teneur en eau, la vitesse de cisaillement locale ainsi que la température d'extrusion et le type d'amidon, et ses caractéristiques microstructurales sont déterminées par microtomographie RX (ESRF- Grenoble) [1]. Deux méthodes de génération sont testées : la Tessellation Voronoi Modifiée (TVM) et l'Empilement Aléatoires de Bulles (EAB) [2]. La TVM est modifiée pour prendre en compte la connexité des cellules et l'unique paramètre de contrôle est le nombre de bulles. Pour l'EAB, le contrôle de la structure est assuré par la distribution de taille des cellules, le critère de recouvrement et le facteur de forme des cellules.

L'analyse par tomographie RX révèle que la densité relative (ρ) et la distribution de la taille des parois $d(x)$, où d est la fraction volumique de parois de taille x , varient de façon très importante selon les conditions d'extrusion. Ces deux paramètres ($\rho, d(x)$) sont les points d'entrée d'une fonction d'erreur G construite à partir de la comparaison entre les structures 3D réelles et générées :

$$G = \left(\frac{\rho_{\text{exp}} - \rho_{\text{num}}}{\rho_{\text{exp}}} \right)^2 \sum \left(d(x)_{\text{exp}} - d(x)_{\text{num}} \right)^2$$

Les structures qui satisfont la minimisation de G sont converties en un modèle éléments finis afin de calculer le module de Young effectif. Le calcul linéaire élastique montre que les structures sélectionnées suivent une loi de puissance du type $E^* = C\rho^n$ où la valeur de l'exposant n est sensible à la méthode de génération. Les résultats numériques montrent que les deux méthodes de génération encadrent la réponse expérimentale avec :

$$n_{\text{TVM}} = 1.58 < n_{\text{EXP}} = 2.81 < n_{\text{EAB}} = 3.43$$

Pour la TVM, un faible exposant démontre une contribution significative de la déformation uniaxiale. Cette contribution est à relier à la présence de parois rectilignes inhérentes à la méthode TVM. Pour l'EAB, un mécanisme de flexion des parois est plus prépondérant à cause de la courbure des parois.

En conclusion, les deux démarches suggérées donnent un encadrement du comportement des matériaux étudiés mais ne représentent pas fidèlement ce comportement en élasticité. Afin de palier à ce problème, l'approche va être enrichie en intégrant explicitement la distribution de la courbure dans le matériau cellulaire. L'identification du rôle des caractéristiques structurales permettra ensuite d'anticiper sur les propriétés élastiques en suggérant des structures optimales au sens mécanique.

Références

[1] P. Babin, G. Della Valle, R. Dendievel, D. Lourdin, L. Salvo. X-ray tomography study of the cellular structure of extruded starches and its relations with expansion phenomenon and foam mechanical properties. *Carb. Polymers*, 68, 329–340, 2007.

[2] Guessasma S, Babin P, Della Valle G, Dendievel R. Relating cellular structure of open solid food foams to their Young's modulus : finite element calculation. *International Journal of Solids and Structures* 2008; 45:2881.

Transport de chaleur et infiltration chimique de gaz dans des milieux fibreux : méthodes numériques basées sur la microtomographie

G. L. Vignoles

Université Bordeaux 1,
LCTS : Laboratoire des Composites ThermoStructuraux
UMR 5801 CNRS-UB1-CEA-Snecma Propulsion Solide

vinhola@lcts.u-bordeaux1.fr

On présente des techniques de simulation destinées à la représentation du transport et de la réaction de gaz dans de grands blocs 3D décrivant des milieux fibreux dont la géométrie peut évoluer sous l'effet des réactions de dépôt gaz/solide.

Le cas d'application est l'élaboration de composites Carbone/Carbone par Infiltration Chimique depuis la Phase Vapeur (ICPV ou CVI) d'une matrice de pyrocarbone, à l'intérieur d'un arrangement complexe de fibres de carbone : à basse pression, des hydrocarbures diffusent à l'intérieur de l'espace poral et réagissent avec la phase solide pour donner lieu à un dépôt de carbone. Une modélisation de ce procédé doit prendre en compte le transfert de gaz, éventuellement raréfiés, des réactions chimiques hétérogènes, et l'évolution structurale du milieu poreux. De plus, des gradients thermiques sont susceptibles d'être employés, ce qui est une motivation pour développer des modélisations de transfert thermique.

Des images à haute résolution de composites C/C sont obtenues par Micro-tomographie X synchrotron en mode « contraste de phase », suivies d'un traitement d'images adapté pour la segmentation des domaines fluide, matrice et fibres. La modélisation du transport de gaz, est traitée par une méthode de Monte-Carlo/Marches Aléatoires, avec une discrétisation de l'interface fluide/solide par Marching Cube Simplifié et une technique « pseudo-VOF » pour la gestion de l'avancée de cette interface sous l'effet du dépôt chimique.

Dans des images à moindre résolution également obtenues en tomographie X, le transfert de chaleur est calculé par une technique de prise de moyenne volumique couplée à la détection locale de l'orientation des fibres dans chaque région de l'image.

Des résultats sont présentés et discutés vis-à-vis de données expérimentales et de précédents calculs faits sur des milieux idéaux.

CARACTERISATION 3D - MICROTOMOGRAPHIE

Modèle booléen 3D de cylindres aléatoires renseigné par des images microtomographiques de matériaux fibreux

Charles Peyrega* - Dominique Jeulin* - Christine Delisée** - Jérôme Malvestio**

* Centre de Morphologie Mathématique, Mathématiques et Systèmes, Mines ParisTech
35, rue Saint Honoré 77300 Fontainebleau, France

** Université Bordeaux 1, Unité des Sciences du Bois et des Biopolymères
351, cours de la Libération, 33405 Talence Cedex, France

charles.peyrega@mines-paristech.fr

In the framework of the Silent Wall ANR project, the CMM and the US2B are associated in order to characterize and to model fibrous media studying 3D images acquired with an X-Ray tomograph used by the US2B. The device can make 3D images of maximal 23043 voxels with resolutions in the range of 2 μm to 15 μm . Using mathematical morphology, measurements on the 3D X-Ray CT images are used to characterize materials. For example measuring the covariance on these images of an acoustic insulating material made of wooden fibres highlights the isotropy of the fibres orientations in the longitudinal planes which are perpendicular to the compression Oz axis. Moreover, it is possible to extract other morphological properties from these image processing methods such as the size distribution either of the fibres or of the pores by estimating the morphological opening granulometry of the considered medium. Using the theory of random sets introduced by Georges Matheron in the early 1970's, the aim of this work is to model such a fibrous material by parametric random media in 3D according to the prior knowledge of its morphological properties (covariance, porosity, size distributions, etc.). A Boolean model of random cylinders in 3D stacked in planes parallel to each other and perpendicular to the Oz compression axis is first considered. The granulometry results show gamma distributions for the radius of the fibres. In addition, a uniform distribution of the orientations is chosen, according to the experimental isotropy measurements in the longitudinal planes. Finally the third statistical factor is the length distribution of the fibres which can be fitted by an exponential distribution. Thus it is possible to estimate the validity of this model by trying to fit the experimental transverse and longitudinal covariances of the pores with the theoretical ones taking into account the statistical distributions of the dimensions of the random cylinders.

Keywords: 3D X-Ray CT images, fibrous media, mathematical morphology, random media.

Caractérisation microstructurale 3D et densification locale d'isolants fibreux cellulosiques sollicités en compression

C. DELISEE¹, E. BADEL², J. LUX³, J. MALVESTIO¹,

¹Université Bordeaux 1- US2B - 351 cours de la Libération, 33405 Talence Cedex

²INRA - UMR PIAF -234 av du Brezet, 63100 Clermont-Fd Cedex 01, France

³LEPTIAB - Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle Cedex 1

delisee@us2b.pierroton.inra.fr

On s'intéresse au comportement mécanique en compression d'isolants thermiques à base de fibres de bois utilisés dans le bâtiment, de très forte porosité (supérieure à 90%), élaborés par un procédé textile non tissé. Les états de la structure d'un panneau soumis à une sollicitation de compression transverse (33% et 73%) ont été suivis en 3D par microtomographie X à l'ESRF, Grenoble.

Nous avons émis l'hypothèse, compte tenu du dispositif expérimental mis en oeuvre, d'un déplacement 1 D des particules contenues dans le volume, sans transfert de matière selon les axes transversaux à la direction de compression. De plus, dans ce milieu particulier, dont l'essentiel du volume est occupé par de l'air, la déformation de compression macroscopique de l'échantillon ne se fait microscopiquement que par le déplacement des points matériels constituant les fibres de bois.

Afin de mettre en évidence le processus de densification du matériau, le concept de base que nous avons choisi d'adopter, pour ce matériau discontinu, est celui de la conservation de la masse, correspondant ici au nombre de points matériels [1].

Le comportement particulier mis en lumière par l'accès à la densification locale est relié à la très faible densité du matériau. En particulier, les fibres de bois, qui présentent une porosité interne, ne sont pas individuellement mécaniquement comprimées et la déformation macroscopique du matériau n'engendre que leur réorganisation spatiale au sein du volume, et plus particulièrement dans les zones de faible densité. Ces résultats sont mis en relation avec des mesures morphologiques des structures aux différents états de compression, évaluées par analyse d'image 3D [2,3] à l'aide d'outils issus de la morphologie mathématique [4,5].

Mots clés : bois, compression, densification locale, fibres, isolation thermique, microstructure, microtomographie rayons X, morphologie.

[1] BADEL, E., LETANG, J.M., BABOT, D. (2003). Quantitative microtomography : measurement of density distribution in glass wool and local evolution during a one-dimensional compressive load. *Meas Sci Technol* 14, 410-420.

[2] LUX, J., DELISEE, C., THIBAUT, X. (2006). 3D characterization of wood based fibrous materials: an application. *Image Anal Stereol* 25, 25-35.

[3] BADELI E., DELISEE C., LUX J. (2008). 3D structural characterisation, deformation measurements and modelling of low-density wood fibreboard under compression. The use of microtomography. *Composites Science and Technology*, 68, pp 1654-1663.

[4] MATHERON G. (1967). *Eléments pour une théorie des milieux poreux*. Paris, Masson.

[5] SERRA, J. (1982). *Image analysis and Mathematical Morphology*. New-York, Academic Press.

X-ray tomographic characterization of the macroscopic porosity of CVI SiC/SiC composites. Effects on the thermo-mechanical behaviour

L. Gélébart (1), C. Château (1-2), M. Bornert (2), J. Crépin (3), E. Boller (4)

(1) CEA Saclay, SRMA, France
(2) LMS-Ecole Polytechnique, France
(3) CDM-ENSMP, France
(4) ESRF Grenoble, ID19, France

lionel.gelebart@cea.fr

In the context of the development of the next generation of nuclear reactors, SiC/SiC composites are candidate for structural application. Because of their complex thermo-mechanical behaviour, due to their complex microstructure, a multi-scale approach is under development. An important microstructural parameter of the CVI composite is the complex distribution of the porosity which can be described at two different scales: the micro-porosity is observed within the tows between the fibres, the macro-porosity is observed between the tows. The effect of the microporosity has already been evaluated on the elastic behaviour of the tow: its complex geometry that results in the CVI process induces a highly anisotropic behaviour of the tow and a high level of stress concentrations.

This paper focuses on the characterization of the macroporosity and on its effect on the thermo-mechanical behaviour. The experimental characterization of the macroporosity is performed using an X-ray tomography technique on the beamline ID19 at the ESRF synchrotron (France).

The numerical 3D images are used to obtain a statistical description of the macro porosity and then to perform numerical simulations in order to evaluate its effect on the overall thermo-mechanical behaviour of the composite.

Analyse de microstructures fibreuse à partir de microtomographie RX des composites GMT induite par leur mise en forme

Pierre Dumont⁽¹⁾, Laurent Orgéas⁽²⁾, Sabine Rolland du Roscoat⁽²⁾

⁽¹⁾ CNRS / Institut polytechnique de Grenoble (Grenoble INP), Laboratoire de Génie des Procédés Papetiers (LGP2), 461, rue de la papeterie, BP 65, 38402 Saint-Martin-d'Hères cedex 9, France

⁽²⁾ CNRS / Universités de Grenoble, Laboratoire Sols, Solides, Structures-Risques (3S-R), BP 53, 38041 Grenoble cedex 9, France

sabine.rolland@hmg.inpg.fr

L'utilisation des matériaux composites à matrice polymère renforcée par des fibres non-tissées est en pleine expansion et concernent de nombreux secteurs : industrie automobile, aéronautique, électrique, domaines de la santé, du sport... Les étapes d'imprégnation et de mise en forme de ces matériaux induisent des variations importantes de l'architecture de ces réseaux fibreux. Au cours de ces étapes, la matrice polymère liquide et le milieu fibreux se comportent comme des suspensions fibreuses fortement concentrées; le polymère se comporte comme un fluide non-newtonien qui s'écoule au travers de la microstructure fibreuse fortement anisotrope. L'observation macroscopique de composites GMT fabriqués à différentes vitesse de compression montre systématiquement une séparation de la matrice polymère et du matelas fibreux. Cette séparation est d'autant plus marquée que la vitesse de déformation est faible. Le but de cette étude est de quantifier cette séparation fibre/matrice à l'échelle microscopique par microtomographie à rayons X. On s'intéresse plus particulièrement aux changements microstructuraux induits par la mise en forme : fraction volumique des fibres, de pores, de matrice, orientation générale de la structure fibreuse.

Interaction sol-structure : déformation d'un radier sur un sol hétérogène en 3D

H. Niandou, D. Breyse

Université Bordeaux 1, GHyMaC, France

h.niandou@ghymac.u-bordeaux1.fr

Mots clés : interaction sol-structure, hétérogénéité de sol, longueur de corrélation, tassement différentiel, variabilité spatiale.

La variabilité spatiale des propriétés des sols engendre des contraintes et/ou des déplacements imprévisibles dans l'hypothèse d'un sol homogène. Ainsi, une analyse de la fiabilité des ouvrages nécessite un modèle tenant compte à la fois de l'interaction sol structure et de la distribution spatiale des propriétés du sol.

D'autre part, on sait que l'ampleur des effets sur les ouvrages dépend de trois facteurs :

- (a) l'importance de la variabilité,
- (b) le rapport des rigidités du sol et de la structure,
- (c) le rapport dimensionnel sol-structure, qui combine l'échelle de fluctuation du sol ou longueur de corrélation et une dimension caractéristique de l'ouvrage.

Nous étudions la sensibilité du tassement différentiel et des contraintes induites dans un radier. La variabilité spatiale des propriétés du sol est modélisée dans le cadre de la théorie des champs stochastiques. La méthode des bandes tournantes est utilisée pour représenter la variabilité spatiale des modules d'Young et les simulations numériques tridimensionnelles sont effectuées à l'aide de la méthode de Monte-Carlo.

Le rôle important, joué par les caractéristiques géométriques et l'échelle de fluctuation horizontale, est souligné. Le risque d'atteindre des valeurs importantes de tassements différentiels, de moments fléchissants et de contraintes est quantifié.

Le comportement de l'interface dans le domaine élastique et plastique a été étudié.

L'importance de la modélisation 3D de la variabilité du sol a été montrée.

Finalement, des conclusions sont tirées, telles que tenir compte des conséquences principales (désordres) sur les ouvrages de la variabilité spatiale du sol en phase conception.

Références :

1. H. Niandou, D. Breyse (2005): Consequences of soil variability and soil-structure interaction on the reliability of a piled raft. ICOSAR2005, G. Augusti, G.I. Schuëller, M. Ciampoli (eds). Millpress, Rotterdam, 917-924.
2. H. Niandou, D. Breyse (2007): Reliability analysis of a piled raft accounting for soil horizontal variability. Computers and Geotechnics 34 (2007) 71-80

PROPRIETES MECANIQUES LOCALES

Approche locale de l'analyse de la tenue mécanique de points soudés

Rémi Lacroix^a, Arnaud Lens^b, Guillaume Kermouche^c, Jean Michel Bergheau^c, Helmut Klöcker^a

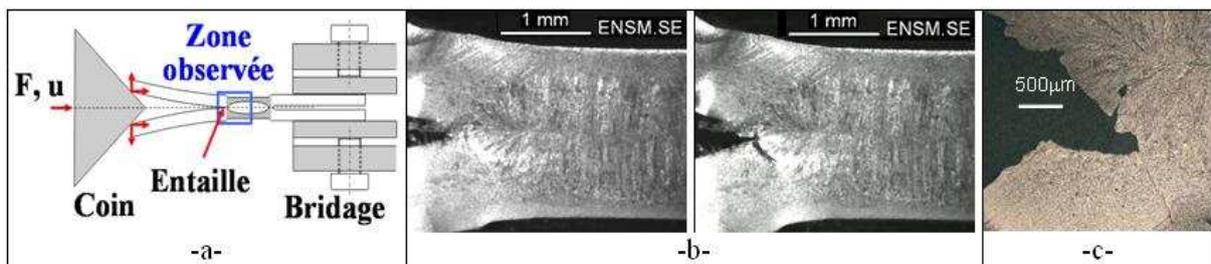
a. Ecole des Mines de Saint Etienne, 158 cours Fauriel, 42023 Saint Etienne

b. ArcelorMittal Maizières Voie Romaine, BP30320, 57283 Maizières-les-Metz,

c. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint Etienne, 58 rue Jean Parot, 42100 Saint Etienne

lacroix@emse.fr

L'évaluation de la tenue mécanique de points soudés est communément évaluée par l'essai de traction en croix. La courbe F-U de l'essai est grandement contrôlée par la déformation des tôles, qui est indépendante de la rupture du point soudé. Ces informations ne permettent pas une compréhension suffisante de la contribution de la rupture des différentes zones du point soudé dans sa tenue mécanique globale. Cette compréhension est requise afin d'expliquer la tenue mécanique de points soudés d'aciers à Très Hautes Résistance (THR). L'observation *in situ* de la rupture d'un point soudé (figure 1), ainsi que des essais de caractérisation locale sont mis en place. La quantification du comportement et de la rupture des différentes zones d'un point soudé est recherchée afin d'apporter une meilleure compréhension de la tenue mécanique des points soudés



d'aciers THR.

Figure 1 -L'essai d'enfoncement de coin. a) Principe. b) Exemple de propagation de fissure enregistrée durant la charge d'un point soudé d'acier Dual Phase DP780, la surface observée est attaquée au Nital. c) Observation optique de la fissuration après essai.

Objectifs industriels

Une meilleure compréhension de la tenue mécanique de points soudés nécessite le développement d'un essai permettant l'observation *in situ* de la rupture d'un point soudé, ainsi qu'une méthode d'interprétation de l'essai permettant de quantifier précisément sa résistance locale à la fissuration.

Objectifs scientifiques

Un point soudé comporte plusieurs zones, ayant subi un chargement thermique différent lors de l'opération de soudage : la zone fondue, les zones affectées thermiquement (ZAT), et le métal de base. Les modèles de rupture de points soudés en traction en croix existant dans la littérature n'incluent pas de données physiques de l'endommagement local. Dans ces modèles, les paramètres d'endommagement sont généralement ajustés afin de reproduire la courbe force-déplacement. Or, des courbes forces déplacement identiques peuvent être observées pour des mécanismes de rupture très différents. La pertinence des paramètres d'endommagement obtenus par méthode inverse est donc faible. L'objectif de ce projet est la mesure des états de chargement locaux à rupture dans les différentes zones d'un point soudé.

Mesures de champs cinématiques 3D par corrélation volumique et tomographie rayons X

Pascal Doumalin, Arnaud Germaneau, Jean-Christophe Dupré

Université de Poitiers
Laboratoire de Mécanique des Solides, UMR 6610
Téléport 2, Boulevard Pierre et Marie CURIE, 86960 Futuroscope Chasseneuil

pascal.doumalin@lms.univ-poitiers.fr

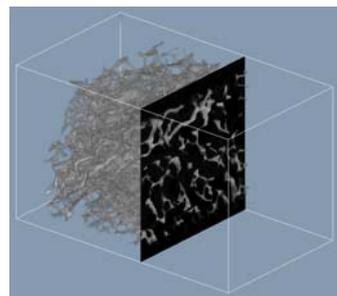
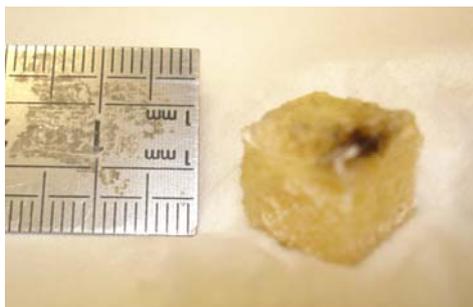
L'équipe Photomécanique et Rhéologie du Laboratoire de Mécanique des Solides de Poitiers développe des techniques de mesure optique de grandeurs mécaniques pour étudier le comportement mécanique des matériaux.

La plupart de ces techniques effectue des mesures en surface et permettent donc d'étudier le comportement mécanique sous certaines hypothèses. Avec l'essor des techniques d'imagerie tridimensionnelle comme la tomographie rayons X, il est possible de réaliser des mesures au cœur de la matière. C'est pour cela que nous avons développé la corrélation d'images volumiques, l'extension de la corrélation d'images numériques au cas tridimensionnel [1,2].

Cette technique nous permet aussi bien d'étudier le comportement mécanique d'une structure par tomographie optique par balayage laser [3] que celui d'un matériau hétérogène à microstructure tridimensionnelle par tomographie rayons X [4].

Dans ce contexte, nous avons été amenés à étudier l'influence de la source d'images sur la précision de mesure des grandeurs cinématiques. On présente ici les résultats des investigations menées sur la tomographie rayons X à partir d'un appareil de laboratoire. Ainsi, on montre l'évaluation de la précision pour la mesure de champs de déplacements et de déformations 3D à partir d'essais expérimentaux de déplacement et de déformation homogène.

Les performances obtenues sont illustrées par une application sur l'étude du comportement mécanique de l'os spongieux prélevé sur une tête de fémur humaine arthrosique. On montre alors l'évolution de la répartition des déformations en fonction de l'intensité du chargement de compression imposé et en relation avec la microstructure.



Analyse du comportement mécanique d'un échantillon d'os spongieux

- [1] Germaneau, A., Doumalin, P., Dupré, J.C., *Experimental Mechanics*, 47 (4), p. 523-532, 2007.
- [2] Germaneau, A., Doumalin, P., Dupré, J.C., *NDT&E International*, 41 (6), p. 407-415, 2008.
- [3] Germaneau, A., Peyruseigt, F., Mistou, S., Doumalin, P., Dupré, J.C., *Photomechanics 2008*, 7-9 juillet 2008, Loughborough, UK.
- [4] Brémand, F., Germaneau, A., Doumalin, P., Dupré, J.C., *SEM XI International Congress & Exposition on Experimental and Applied Mechanics*, 2-5 juin 2008, Orlando, Floride, USA.

Estimation théorique de la mobilité des joints de grains au cours de la recristallisation dynamique des alliages métalliques

F. Montheillet¹, D. Piot¹ et G. Damamme²

¹Ecole des Mines de Saint-Etienne (Centre SMS), CNRS UMR 5146, 158 cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne Cedex 2

²CEA-DAM, Centre Île de France, BP 12, 91680 Bruyères-le-Châtel Cedex

montheil@emse.fr

La migration des joints de grains joue un rôle essentiel au cours de la recristallisation dynamique (et métadynamique), car elle détermine la taille finale des grains du matériau soumis à un traitement thermomécanique. Dans les alliages métalliques, la mobilité des joints de grains M est modifiée par rapport à celle du métal pur, à la fois par la présence d'atomes en solution solide (*solute drag* ou traînage des solutés) et par la présence de particules de seconde phase (*Zener pinning* ou épinglage de Zener). Alors que M décroît de manière continue lorsque la teneur en solutés augmente, l'effet *local* des précipités est discontinu : suivant que la force motrice agissant sur le joint est plus faible ou plus grande que la pression de Zener P_Z , la vitesse du joint ou bien s'annule, ou bien demeure celle du métal pur. Un tel comportement ne peut pas être intégré de manière simple dans un modèle de recristallisation dynamique.

Dans ce contexte, une valeur *moyenne* de M a été estimée analytiquement, susceptible de s'appliquer à un grain tout au long de son existence (depuis sa germination jusqu'à sa disparition). Pour cela, un modèle de recristallisation dynamique *discontinue* (*i.e.* se produisant par germination et croissance) récemment développé a été utilisé, en considérant le régime stationnaire de la recristallisation dynamique. L'écroissance et la restauration dynamique sont décrits à l'échelle des densités de dislocations au moyen d'une simple loi puissance. L'épinglage de Zener est alors considéré comme une perturbation (éventuellement forte) du système.

Pour les pressions de Zener modérées, la dépendance de M vis-à-vis de P_Z peut être considérée comme linéaire (Fig. 1). Dans ce cas, en utilisant l'expression classique de P_Z ainsi que l'équation décrivant la conservation des atomes de l'élément d'alliage, on a établi une expression analytique simple $M(d, C_M)$, où d désigne le diamètre des particules et C_M caractérise la teneur en solutés. Les résultats sont illustrés par quelques applications utilisant les données numériques relatives à une série d'alliages binaires nickel-niobium (Fig. 2).

Références

F. Montheillet, D. Piot, G. Damamme et S.L. Semiatin. Modeling grain boundary mobility during dynamic recrystallization of metallic alloys. *Thermec'2007*, Berlin (2009), à paraître.

F. Montheillet, O. Lurdos et G. Damamme. A grain scale approach for modeling steady state discontinuous dynamic recrystallization. *Acta Mater.* 57, 1602-1612 (2009).

Modelling austenitisation of X10CrMoVNb9-1 martensitic steel

Farah HANNA

LMT/ENS-Cachan
CEA/DEN/DANS/DM2S/SEMT/LTA
CEA-Saclay
DEN/DANS/DM2S/SEMT/LTA Bât 611 Pièce 109A
91191 Gif sur Yvette Cedex, France

Tel: +33 (0) 169 08 57 28
Fax: +33 (0) 169 08 90 23

farah.hanna@cea.fr

Three different approaches that may be used to model phase transformations by diffusion during heating are presented in details. These approaches are applied to model the austenitisation of a X10CrMoVNb9-1 martensitic steel tempered at 757°C for 5h30. The corresponding models are identified from standard dilatometry tests performed over a large range of heating rates, viz. [0.1°C/s, 100°C/s]. Finally, the response of these models, and therefore, their predicting capabilities, are compared to the experimental evidence for various complex heating-cooling loadings that have been designed to be representative of the temperature history in different points of a multi-pass welding Heat Affected Zone.