

Projet de GDR 3MF

Mécanique Multi-échelle des Milieux Fibreux

Dossier scientifique

1 – Introduction

1.1 - Motivation

La thématique de la mécanique des milieux fibreux connaît actuellement un développement important, porté d'une part par de nouveaux moyens d'investigation expérimentaux et de simulation, et d'autre part par les besoins croissants de caractérisation exprimés du côté des applications. Dans ce contexte, le but d'un GDR Mécanique Multi-échelle des Milieux Fibreux est de fédérer et de structurer la communauté nationale travaillant sur cette thématique émergente, afin de renforcer les interactions entre les acteurs concernés - notamment entre les partenaires industriels et académiques - et de permettre une maturation des problématiques scientifiques attachées à cette thématique.

Ce projet de GDR Mécanique Multi-échelle des Milieux Fibreux est né au sein d'un premier regroupement entre partenaires académiques et industriels opéré à l'occasion du projet ANR Mécafibres, démarré en 2008. Des premières discussions préliminaires autour de ce projet ont été ouvertes depuis à d'autres partenaires.

1.2 - Périmètre d'intérêt

Pour cibler ses objectifs, le GDR se concentrera sur les milieux fibreux au sein desquels les interactions entre fibres souples, mettant en jeu des déplacements relatifs entre ces fibres, jouent un rôle prépondérant. Ce choix positionne d'emblée le champ de recherche du GDR dans le cadre de la mécanique non linéaire en grandes transformations. Les matériaux comportant des fibres se présentant sous la forme de structures figées ou solidifiées (les matériaux composites solides notamment), ne font pas partie du domaine d'intérêt du GDR.

1.3 - Applications et utilisations des milieux fibreux

De nombreux matériaux ou structures industriels intégrant des fibres naturelles ou synthétiques, nécessitent des caractérisations mécaniques pertinentes à différentes échelles, pour prédire leur comportement macroscopique global, qui s'avère la plupart du temps fortement non linéaire du fait des interactions entre leurs composants fibreux, tout en ayant des informations précises à l'échelle microscopique, afin de pouvoir appréhender les mécanismes responsables de l'endommagement des fibres élémentaires au niveau local. Parmi ces matériaux, on peut citer notamment les exemples suivants, sur lesquels travaillent un ou plusieurs partenaires du projet :

- les **câblés textiles** de différentes dimensions, torsadés ou tressés, utilisés pour la manutention (Fig. 1), ou comme renforts dans les pneumatiques, pour lesquels on cherche à identifier la configuration géométrique initiale et le comportement mécanique global, tout en

caractérisant les chargements subis localement à l'échelle des fibres élémentaires afin de prévoir leur endommagement,

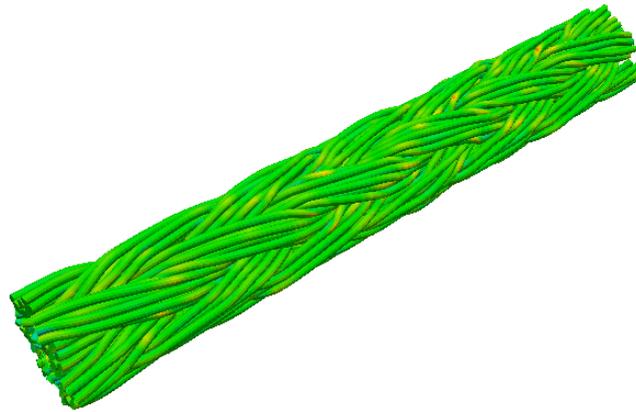


Fig. 1 : Modèle éléments finis de câble textile tressé (MSSMat/ECP)

- les **tissés** (2D classiques, ou interlocks, ou 3D), utilisés en particulier comme renforts pour la réalisation de pièces composites, et pour lesquels on s'intéresse d'une part à leur comportement mécanique pour prédire leur formabilité (Fig. 2) et les propriétés mécaniques du composite final, et d'autre part à la caractérisation géométrique de leur microstructure (parties fibreuse et poreuse) pour modéliser les écoulements et imprégnation de résines en leur sein ;

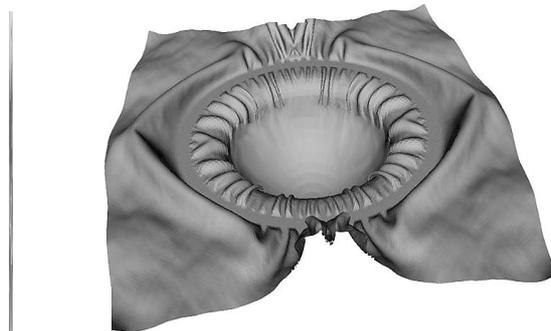


Fig. 2 : Mise en forme d'un renfort tissé par un poinçon hémisphérique : comparaison entre pièce réelle et simulation numérique après identification des propriétés mécaniques du tissé (LAMCOS / INSA Lyon)

- les **papiers** et les **filtres** ou autres **structures non-tissées**, pour lesquels la caractérisation de la microstructure (porosité et anisotropie de la partie poreuse en particulier) et l'apparition d'endommagement (Fig. 3) sont deux aspects importants ;

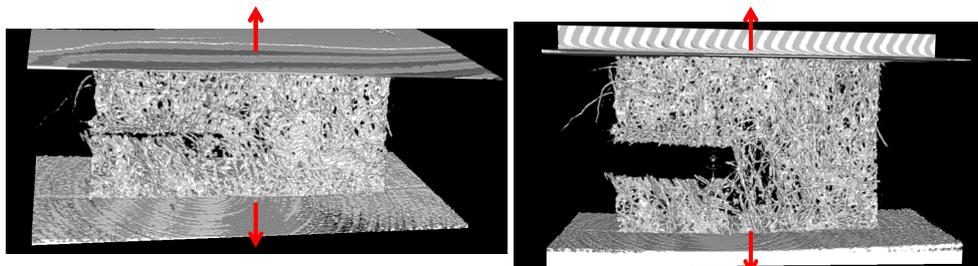


Fig. 3 : Fissuration d'un papier de faible grammage, analyse par microtomographie RX (3SR – LGP2 / Université Joseph Fourier, Grenoble)

- des **structures fibreuses fortement désordonnées** (Fig. 4), telles que la laine de verre, recherchées pour leurs propriétés vibro-acoustiques et leur capacité d'absorption de vibrations ; dans ce type de milieu présentant un squelette discontinu de fibres, les dissipations liées au comportement viscoélastique du squelette et aux frottements visqueux entre l'air et les fibres permettent une atténuation de l'énergie acoustique ;

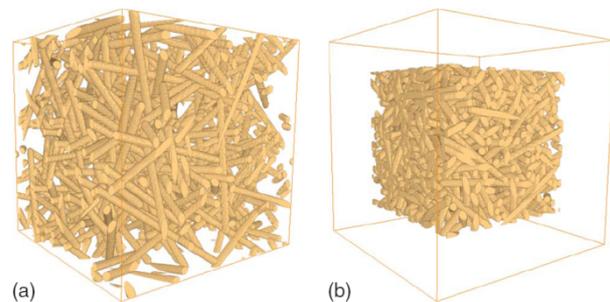
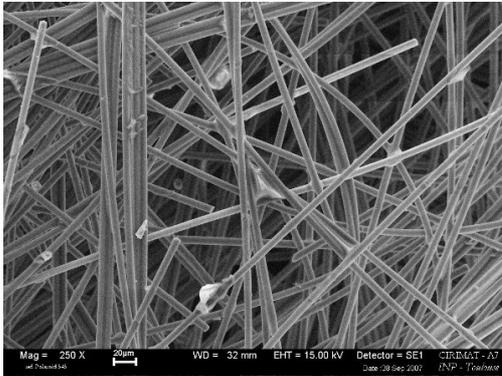


Fig. 4 : Micrographie d'un enchevêtrement de fibres de carbone réticulées (CIRIMAT / Université Paul Sabatier, Toulouse) - Simulation de la compression isostatique d'un ensemble aléatoire de fibre (SIMAP / Université Joseph Fourier, Grenoble)

- les **biomatériaux** pour des applications médicales, notamment des scaffolds textiles (tissés, tricotés, multicouches) pour la réalisation de prothèses ligamentaires par ingénierie tissulaire (Fig. 5), ou bien encore les endoprothèses et stents vasculaires. De même, les matériaux souples du vivant, tels que veines, artères, ligaments et tendons, ou encore la peau, présentent tous une microstructure fibreuse, qui conditionne l'anisotropie et les grandes transformations observées à l'échelle macroscopique. La similarité des mécanismes de déformation et d'interactions à l'échelle des fibres entre les structures fibreuses artificielles et naturelles (biologiques), justifie pleinement que ces dernières soient abordées dans le cadre de ce GDR.

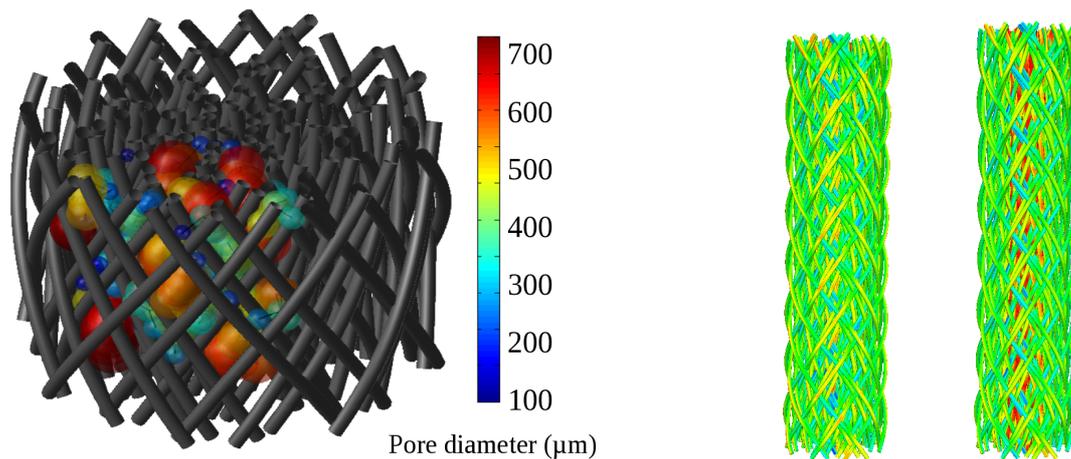


Fig. 5 : Calcul de porosité et simulation d'un test de traction pour un scaffold tressé pour la réalisation de prothèse ligamentaire par ingénierie tissulaire (LEMTA / INPL - MSSMat / ECP)

2 – Problématique scientifique de la mécanique des milieux fibreux

2.1 – Problématique scientifique

Le GDR se propose comme objet d'étude les milieux fibreux souples, caractérisés par des déplacements relatifs importants entre fibres, des non-linéarités fortes liées à leurs contacts et à la rhéologie des constituants (fils, fibres), avec comme but la caractérisation du comportement mécanique de ces milieux, au moyen de l'expérience, de la modélisation et de la simulation.

Les milieux fibreux cités précédemment rassemblent des caractéristiques qui rendent problématique la caractérisation de leur comportement mécanique :

- ils se présentent comme des assemblages discrets de structures continues filaires plus ou moins tortueuses (*i.e.* les fibres), ce qui place leur modélisation à l'intersection des milieux discrets et des milieux continus ;
- leur configuration géométrique, qui résulte de leur mode d'assemblage et de la géométrie même des fibres, n'est pas facilement caractérisable *a priori* ; ces assemblages de fibres sont complexes, ils peuvent être ordonnés ou désordonnés, enchevêtrés ou non.
- ils se présentent comme des milieux multi-échelles, les fibres les constituant pouvant être assemblées suivant plusieurs niveaux hiérarchiques, par exemple en mèches ou torons, puis en fils, puis en structure tissée ;
- leur réponse mécanique globale dépend en grande partie de la conformation des fibres et des interactions de contact-frottement développées à l'échelle microscopique entre elles ; elle apparaît de ce fait souvent fortement non linéaire, quelques fois instable (flambement locaux, bandes de localisation, formation d'amas, fissuration...), avec des couplages forts entre chargements et modes de déformation dans les différentes directions, et avec des évolutions de microstructures qu'il est difficile aujourd'hui d'appréhender.

- ils peuvent être sensibles à leur environnement (température, humidité) et modifier ainsi très fortement leur comportement mécanique et leur forme. C'est par exemple le cas des réseaux de fibres organiques (synthétiques ou naturelles) sensibles aux variations de température ou d'humidité (sorption, hygroexpansion, changement de phase), ou bien encore celui des réseaux progressivement imbibés de fluides (phénomènes d'élasto-capillarité).

2.2 - État de l'art

Ainsi, qu'elles soient tissées, tressées, tricotées ou désordonnées, sèches, partiellement ou totalement saturées par un fluide, la caractérisation et la modélisation de ces architectures fibreuses, de leur évolution au cours d'un chargement, et de leur comportement mécanique aux différentes échelles, posent un certain nombre de problèmes complexes et ont de fait suscité un certain nombre de travaux à caractère expérimental, théorique et numérique :

Analyse de la microstructure

Pendant longtemps, les microstructures de ces matériaux et leur évolution ont été caractérisées par des analyses 2D à partir d'imagerie (voir par exemple [Petrich *et al.* 2000, Yasuda *et al.* 2002] dans le cas des suspensions concentrées de fibres), restreignant ainsi fortement l'analyse des microstructures fibreuses de ces matériaux. Plus récemment, en couplant ces techniques avec des mesures de champs cinématiques 2D (ou 2.5D), les mécanismes de déformation aux échelles mésoscopiques (à l'échelle d'amas de fibres) et en surface des échantillons ont pu être appréhendés au cours de chargement mécaniques [Buet et Boisse 2001, Hild *et al.* 2002, Lomov *et al.* 2008] et ainsi renforcer la compréhension des mécanismes de déformation dans ces matériaux. L'utilisation de plus en plus courante des techniques d'imagerie 3D en science des matériaux, en particulier la microtomographie à rayons X [Maire *et al.* 2001], combinées à des techniques d'analyses d'images appropriées, ont permis dernièrement de faire des avancées substantielles sur la caractérisation 3D des matériaux fibreux [Délisée *et al.* 2001, Eberhardt and Clarke 2002, Masse *et al.* 2006, Rolland du Roscoat *et al.* 2007, Altendorf and Jeulin 2009, Badel *et al.* 2011]. Des progrès restent encore à faire pour enrichir ces caractérisations, et les équipes de recherche françaises travaillant sur ces aspects sont particulièrement actives. En couplant ces analyses 3D à des techniques de mesures de champs cinématiques 2D, 3D, continus ou discrets, tel que cela se fait dans les milieux granulaires ou d'autres matériaux denses, il est maintenant également possible, en adaptant les méthodes précédentes aux cas particuliers des structures fibreuses, d'envisager d'analyser finement les micro-mécanismes de déformation au sein même de ces milieux [Hild *et al.* 2009, Viguié *et al.* 2011, Latil *et al.* 2011], d'enrichir l'interprétation d'essais micro ou macro-mécaniques sur ces matériaux fibreux [Servais *et al.* 1999, Robitaille *et al.* 1998, Toll 1998, Poquillon *et al.* 2005] et d'apporter aux modélisations théoriques et/ou numériques de la littérature des fondements et constats expérimentaux précieux.

Modèles de comportement de milieux fibreux désordonnés

La littérature portant quant à elle sur la modélisation du comportement de milieux fibreux désordonnés est relativement vaste et ancienne (par exemple [van Wick 1946]). Au-delà des approches purement macroscopiques et phénoménologiques, un certain nombre de travaux a porté sur la modélisation de ces milieux par des approches multi-échelles, en faisant descendre à une échelle inférieure le caractère phénoménologique des mécanismes mis en jeu et en enrichissant le comportement macroscopique par des descripteurs microstructuraux pertinents :

- Le plus souvent, les micromécaniques envisagées sont simples, que ce soit pour les comportements des fibres (barres ou poutres le plus souvent élastiques) que pour les lois de contacts (contacts parfaits, de Coulomb, hydrodynamiques, par exemple [Servais *et al.* 1999]). Peu de travaux se sont penchés sur la prise en compte d'autres types de comportement locaux pourtant présents dans bien des milieux fibreux : lois de contact complexes, fibres élasto-visco-et/ou-plastiques, hyperélastiques, superélastiques, hygro-expansives....
- Le changement d'échelles est souvent réalisé en supposant *a priori* qu'il existe un continuum équivalent « standard ». Quelques études théoriques montrent pourtant que dans certaines conditions (milieux fibreux confinés, fort gradients de sollicitations ou de microstructures), des longueurs internes locales interviennent et les continua équivalents doivent s'enrichir [Tollenaere and Caillerie 1998, Pradel 1998, Gibson and Toll 1999, Boutin and Hans 2003, Le Corre *et al.* 2004, 2005].
- Le calcul des propriétés effectives est réalisé soit analytiquement, soit numériquement. Dans le premier cas, des hypothèses fortes sont faites sur les champs cinématiques et sur les microstructures [van Wick 1946, Toll and Manson 1994, Toll 1998, Baudequin *et al.* 1999, Servais *et al.* 1999, Alkhagen and Toll 2007, Ferec *et al.* 2009]. Dans le deuxième cas, méthodes des éléments finis, discrets ou schémas de types dynamiques moléculaires sont utilisés [Yamane *et al.* 1995, Switzer and Klingenberg 2003, Durville 2005, Rodney *et al.* 2005, Le Corre *et al.* 2005, Ausias *et al.* 2006, Bertails *et al.* 2006, Stoop *et al.* 2011]. Dans les deux cas, ces estimations souffrent d'un manque cruel de confrontation avec des données expérimentales, notamment concernant les micro-mécanismes locaux mis en jeu et sur les évolutions de microstructures.

Comportement multiéchelle des matériaux tissés

L'analyse des déformations et de la mise en forme des tissés est un thème d'actualité, compte tenu de l'étendue très vaste des applications de ces structures dans des secteurs à haute valeur ajoutée, tels que les renforts tissés pour les composites dans l'industrie aéronautique, ainsi que dans un contexte d'ingénierie tissulaire (structures tissées, tressées ou tricotées employées comme scaffold, vocable anglais pouvant être traduit par treillis). Le mouvement et le comportement mécanique du tissu à l'état sec (avant imprégnation par de la résine) sont très spécifiques, en raison de la mobilité aisée des fils au sein de la structure ; cette dernière détermine la capacité de mise en forme de la structure [Gasser *et al.* 2000; Kawabata *et al.* 1973; Kawabata 1989]. Il y a par conséquent un besoin important d'outils de simulation prédictifs du comportement mécanique de composites textiles, prenant en considération les informations relatives aux orientations des fibres (fils) et leur densité, qui déterminent fortement le comportement macroscopique du composite résultant de l'association des fils, en terme de rigidité, endommagement, fatigue, rupture [Potluri *et al.* 2006; Liu *et al.* 2007, Mattsson *et al.* 2007]. Le comportement de tissés est à l'évidence un problème multiéchelles, dans la mesure où le comportement macroscopique (échelle structurale) est conditionné par l'architecture de la maille élémentaire (toile, sergé, satin, armure complexe 2D, 2.5D, 3D, monocouche ou multicouches), les interactions entre fils au sein du tissage (échelle dite mésoscopique) et leurs propriétés mécaniques (modules de flexion, traction, torsion). Malgré l'importante littérature relative aux stratégies de modélisation multiéchelles, un modèle unitaire fait encore défaut [Hamila and Boisse 2008]; les familles de modèles peuvent être appréhendées selon la classification suivante :

- Le comportement mécanique de la mésostructure peut être homogénéisé en supposant que le tissé se comporte comme un continuum anisotrope [Dong *et al.* 2001; Peng and Cao 2005; Boisse *et al.* 2005, Akkerman et Lamers, 2007]. Ces modèles peuvent ensuite être incorporés dans des analyses par éléments finis dans un contexte de grandes transformations en décrivant le tissé par des éléments de type coque ou membrane. L'inconvénient de cette classe de modèle tient au fait qu'elle ignore la nature discrète des tissés (la notion même de mesure continue de déformation et de contrainte est questionnable ; les interactions entre fils, dont le frottement, ne sont pas prises en compte). De même, l'anisotropie évolutive liée aux changements d'orientations des fibres matérielles et des fils dans la durée d'utilisation de la structure n'est pas prise en compte.
- Des approches discrètes prenant en compte le caractère multiéchelles du tissé, dans lesquelles chaque fibre ou fil est modélisé individuellement constituent une seconde stratégie de modélisation [Durville 2011; Sze and Liu 2005; Duhovic and Bhattacharyya 2006]. L'inconvénient de ces approches tient au grand nombre de fibres présentes, conduisant à une simplification exagérée dans la représentation de la mésostructure pour ne pas pénaliser la performance des simulations. Ces dernières sont souvent restreintes à un petit domaine d'analyse (une ou quelques mailles), et s'appuient sur des modèles rhéologiques simples (réseau de barres ou de poutres).
- Les approches semi-discrètes réalisent un compromis entre les deux premières stratégies [Hamila and Boisse 2008; Boisse *et al.* 2005]: les composants à l'échelle microscopique ou mésoscopique sont ici considérés comme des éléments finis. Leur cinématique (fils, fibres) est décrite par les déplacements au sein de l'élément, conduisant à la continuité des fils chaîne et trame qui restent en contact si tel était le cas dans la configuration initiale. Ces modèles prennent en compte les propriétés mécaniques les plus significatives, telles que les rigidités en tension et en cisaillement plan.

Le comportement mécanique du tissé sec (avant imprégnation par de la résine) est très spécifique ; pour des fils complexes constitués de milliers de fibres, en dépit du glissement relatif entre fibres, la rigidité en tension dans la direction du fil est très supérieure à celle mesurée dans les autres directions. En raison du faible diamètre des fils, la rigidité en flexion est au moins un ordre de grandeur plus petite que la rigidité en tension, car le moment quadratique est très petit. Ceci signifie que la flexion des fils et leur changement d'ondulation est le mécanisme de déformation dominant, qui est responsable des grandes déformations résultantes à l'échelle macroscopique. Cette non-linéarité géométrique à l'échelle mésoscopique de l'armure est rendue complexe par les interactions de contact entre fils (transfert d'ondulations entre fils chaîne et trame), ainsi que la compressibilité transverse (de la section) qui est induite. L'assemblage des fils au sein de l'armure élémentaire du tissé conduit à un comportement macroscopique effectif anisotrope, fortement conditionné par l'organisation géométrique des fils au sein de l'armure de base. Très peu de modèles dans la littérature s'attachent à décrire ces interactions inter fils, et leur impact sur le comportement structural. Ces interactions incluent les transferts d'ondulation (élongation du tissé dans une direction, accompagnée d'une contraction dans la direction transverse), le phénomène de locking (résistance à la déformation) et la résistance à la rotation relative des fils lorsque le comportement en cisaillement devient important [King *et al.* 2005 ; Ben Nadler *et al.* 2006 ; Ben Boubaker *et al.* 2007 ; Assidi *et al.*, 2011]. Cette problématique reste un verrou scientifique majeur dans le domaine de la modélisation mécanique des tissés.

3 – Champs d’investigation du GDR

Pour aborder la problématique du comportement des milieux fibreux, les acteurs partenaires du GDR proposent en particulier comme pistes d’investigation les champs suivants.

3.1 - Caractérisation géométrique des micro-structures des milieux fibreux et de leurs évolutions

La détermination de la géométrie de ces milieux, en particulier par une identification et le suivi des lignes moyennes des fibres, de leur courbure, et des multiples contacts fibre-fibre est essentielle d'une part pour prédire les propriétés mécaniques qui dépendent par exemple des variations de courbures, des orientations locales des fibres et de leurs contacts, et d'autre part pour caractériser la microstructure et ses porosités qui conditionnent les imprégnations du milieu par différents substrats. Au niveau expérimental, le développement des dispositifs d’imagerie par microtomographie à rayons X (tomographes de laboratoire, grands instruments) et d'outils de traitement d'images pour aller identifier, caractériser fibres et contacts et suivre leurs évolutions (mesure de champs cinématiques discrets) doit permettre de mieux appréhender les micro-mécanismes de déformations au sein de ces réseaux. Des approches de simulation peuvent être menées en parallèle pour aider à reconstruire ces milieux. Des modèles théoriques seront nécessaires pour caractériser ces géométries et aider à comparer et à valider les résultats issus des approches expérimentales et de simulation.

3.2 - Caractérisation des propriétés mécaniques aux différentes échelles

De nombreuses difficultés apparaissent relativement à l'identification expérimentale du comportement d'échantillons de matériaux fibreux. Le choix des échantillons représentatifs à tester vis-à-vis des problématiques que posent ces structures élancées, la mise en place d'un pilotage adapté sur les bords de l'échantillon, ainsi que l'application de chargements combinés pertinents figurent parmi ces difficultés. Le développement de mesures de champs permettant d'identifier les déplacements hétérogènes voire les coulages thermomécaniques au sein de la structure apparaît nécessaires pour ne pas limiter les résultats expérimentaux à des grandeurs globales. Enfin, la mise en place de procédures et d'essais micromécaniques pour permettre des identifications aux échelles microscopiques sont nécessaires pour explorer les problématiques d'interactions de contact-frottement à l'échelle des fibres.

3.3 - Recherche de modèles rhéologiques aux différentes échelles

La formulation de modèles mécaniques aux différentes échelles capables de rendre compte des mécanismes de déformations complexes au sein de ces milieux demeure un sujet problématique. Ces modèles sont nécessaires pour aborder la simulation mécanique des milieux fibreux aux échelles mésoscopique et macroscopique. Quatre aspects peuvent être envisagés :

- formulation de modèles pertinents à l'échelle microscopique, pour rendre compte du comportement individuel des fibres (effets d'anisotropie et comportements non-linéaires) et caractériser les interactions de frottement entre elles ;
- élaboration d'un cadre théorique pour un changement d'échelle permettant de dire si un milieu continu équivalent existe, et de donner le cas échéant sa nature (Cosserat, Cauchy....) et les propriétés fondamentales de la loi de comportement effective (hyperélasticité, etc.) ;

- calcul des propriétés effectives soit par méthode analytiques (quand le VER est simple), soit par résolution numérique par des méthodes multi-échelles de type FE2 ;
- formulation et identifications des lois constitutives à l'échelle supérieure capables de rendre compte des phénomènes et mécanismes aux échelles inférieures (frottements, endommagements, localisations). Les approches développées dans le cadre de la mécanique des milieux granulaires pour modéliser leurs comportements non-linéaires et couplés méritent d'être étudiées pour déterminer ce qui peut être transposable aux problématiques des milieux fibreux.

3.4 – Interactions des milieux fibreux avec leur environnement : acoustique et fluides

Cette prise en compte constitue un autre aspect incontournable : il s'agit de se concentrer sur les sources « extérieures » capables de modifier foncièrement le comportement mécanique des milieux fibreux aux différentes échelles. On s'intéressera par exemple aux différents types de couplages :

- couplage hygro-mécanique : hygro-expansion et stabilité dimensionnelle des milieux fibreux organiques, évolutions de leurs propriétés mécaniques avec le degré d'humidité ;
- couplage thermomécanique : thermo-expansion, changement de phase et mécanique (cas par exemple de fibres en alliages à mémoire de forme) ;
- couplage hydro-mécanique : cas des milieux partiellement saturés, analyse des interactions fluide-microstructures : élasto-capillarité, fluides complexes, filtration. Ces problématiques sont cruciales dans beaucoup de secteurs (mise en forme des composites, ingénierie des biomatériaux,...). Par exemple, le cas des scaffolds utilisés à des fins médicales (substitut d'un ligament endommagé), la porosité joue un rôle important sur la capacité d'ensemencement des cellules souches dont la croissance attendue permettra de reconstituer le tissu biologique d'origine ;
- couplage mécano-acoustique : étude des interactions vibratoires entre l'air et les milieux fibreux utilisés pour leurs propriétés acoustiques. S'atteler à la caractérisation de ces couplages et à leur modélisation, toutes deux encore peu abordées dans le cas de structures fibreuses, fera partie des préoccupations du GDR.

4 – Présentation des différents partenaires

4.1 - Partenaires industriels

4.1.1 - SNECMA

SNECMA utilise des procédés de tissage 3D pour réaliser des préformes d'aubes de turbine destinées à être imprégnées pour constituer la pièce composite. La connaissance de l'organisation des fibres au des torons tissés, et notamment les porosités entre ces fibres, sont déterminantes pour prédire la formabilité et l'imprégnabilité de ces structures. Les comportements transverses des torons de fibres utilisés ces tissages déterminent leurs conditions de réalisation et la qualité de la pièce finale obtenue.

Participants : François Charleux, Stéphane Otin

4.1.2 - IFREMER

L'Ifremer, en collaboration avec un consortium d'industriels travaillant dans l'exploitation off-shore, s'intéresse à la prédiction de la durée de vie de câbles synthétiques tressés utilisés pour la manutention en grande profondeur, et notamment à leur endommagement lors de leur passage sur des poulies de treuil. Afin de pouvoir quantifier et analyser les interactions de contact-frottement développées lors de la flexion sur la poulie entre les constituants élémentaires de ces câblés, une connaissance fine de leur comportement mécanique est nécessaire. Les approches multi-échelles permettant de décrire le comportement mécanique d'un ensemble de fibres sont très utiles dans cette perspective.

L'Ifremer dispose de nombreux moyens d'essais permettant de tester le comportement de câbles textiles.

Participant : Peter Davies, Thanh Do Vu

[Davies et al. 2010 ; Le Digou et al. 2010]]

4.1.3 - Michelin

Des câblés textiles, constitués de plusieurs dizaines de milliers de filaments sont utilisés comme renforts pour constituer la structure radiale des pneumatiques, en particulier pour les véhicules de tourisme. Le comportement non linéaire de ces câblés doit être identifié pour affiner la prédiction du comportement des pneumatiques sous divers chargements. La connaissance des sollicitations subies à l'échelle locale par les fibres élémentaires constituant ces câblés est nécessaire pour étudier l'endommagement et l'usure de ces structures. Une description fine de l'arrangement géométrique de ces fibres au sein d'un câblé, ainsi qu'une approche multi-échelle permettant de représenter le comportement d'assemblages de fibres, sont nécessaires pour aboutir à de tels résultats.

Participants : Rémi Bruant, Marc Romero de la Osa, Houda Attia

4.1.4 - Saint-Gobain Recherche

Saint-Gobain développe des matériaux d'isolation constitués de laines de verre ou de roches. La caractérisation mécanique de ces matériaux, qui présentent des mécanismes de déformation complexes à différentes échelles, est déterminante pour prédire leurs propriétés structurales. Les couplages vibroacoustiques à l'échelle des fibres élémentaires sont par ailleurs essentiels vis-à-vis des propriétés d'isolation phonique de ces matériaux.

4.2 - Partenaires académiques

4.2.1 - CIRIMAT (Centre Interuniversitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux - UMR 5085 / Université Paul Sabatier / INP Toulouse) – Équipe Mécanique, Microstructure, Oxydation

L'équipe travaille notamment sur la réalisation de milieux enchevêtrés 3D aléatoires à forte porosité et sur l'étude et l'analyse du comportement mécanique de ces milieux enchevêtrés.

Participant : Dominique Poquillon

[Mezeix et al. 2009 ; Shahdin et al. 2009]

4.2.2 - Institut Jean le Rond d'Alembert (UMR 7190 / Université Pierre et Marie Curie) - Équipe MISES (Modélisation et Ingénierie des Solides et des Structures)

Cette équipe s'intéresse d'un point de vue théorique au comportement mécanique des fibres, notamment aux phénomènes d'instabilité et d'élasto-capillarité.

Participant : Sébastien Neukirch.

[Clauvelin *et al.* 2009]

4.2.3 - Laboratoire 3SR (Laboratoire Sols, Solides, Structures – Risques - UMR 5521 / Université Joseph Fourier / INPG) – Équipe Mécanique et Couplages Multiphysiques des Milieux Hétérogènes

L'équipe travaille sur la mécanique des milieux fibreux : rhéologie des suspensions fibreuses très concentrées et des milieux fibreux secs ; les couplages multiphysiques : transferts (chaleur, électricité, humidité), écoulements de fluides (non-Newtoniens) en milieux fibreux, couplage fluide-solide / poromécanique, phénomènes thermo-hygro-mécaniques, changements de phase dans les milieux de fibres en AMF ; et la caractérisation 3D des microstructures par microtomographie à rayons X.

Elle possède des compétences en élaboration et caractérisation de milieux fibreux architecturés ; rhéométrie aux différentes échelles ; microtomographie à rayons X, analyse d'images et rhéométrie avec observations *in situ* ; mesures de champs cinématiques par corrélation d'images ou par corrélation discrète ; changement d'échelles par homogénéisation continue ou discrète ; calculs sur microstructures par FEM ou DEM.

Moyens à disposition : machines de traction universelles de 0.5kN, 20kN, 100kN ; microtomographe à rayons X + logiciels d'analyse d'images ; micropresses pour microtomographes 5N, 50N, 500N ; rhéomètres de grandes dimensions pour milieux fibreux centimétriques ; systèmes de caméras CCD pour stéréocorrélation et de corrélation d'images + logiciels ; plateforme de calculs et logiciels dédiés aux calculs de microstructures fibreuses.

Participants : Caillerie Denis (Pr), Chagnon Grégory (Mcf), Favier Denis (Pr), Geindreau Christian (Pr), Orgéas Laurent (CR CNRS), Peyroux Robert (CR CNRS), Richefeu Vincent (Mcf), Rolland du Roscoat Sabine (Mcf).

[Latil *et al.* 2011 ; Rolland du Roscoat *et al.* 2007]

4.2.4 - LAMCOS (Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures - UMR 5259 / INSA Lyon) - Équipe Mécanique des Solides et des Endommagements

L'équipe est spécialisée dans l'analyse et la simulation du comportement mécanique des renforts fibreux de composites à l'échelle macroscopique et à l'échelle mésoscopique.

L'équipe rassemble des compétences en simulation de la mise en forme de tissés, et en simulation de différents essais de bias extension test, flexion, tension, à température variable, tomographie X, corrélation d'images.

Elle travaille notamment sur les renforts fibreux tissés, interlocks, NCF, pré-imprégnés.

Participants : Philippe Boisse, Nahiene Hamila, Emmanuelle Vidal-Salle.

[Badel *et al.* 2008 ; Hamila *et al.* 2009 ; Boisse *et al.* 2011]

4.2.5 – Laboratoire MATEIS (Matériaux : Ingénierie et Science - UMR 5510 / INSA Lyon) - Équipe Métaux et Alliages

L'équipe est spécialisée dans l'élaboration et la caractérisation de matériaux fibreux monofilamentaires, la caractérisation expérimentale par microtomographie de l'architecture fibreuse, et dans l'analyse d'image 3D.

Elle développe des compétences en tomographie aux rayons X et en analyse d'image 3D pour l'analyse des propriétés mécaniques des matériaux cellulaires.

Elle dispose d'un tomographe expérimental équipé pour des essais in situ.

Participants : Éric Maire (DR CNRS), Jérôme Adrien (IR CNRS), Loïc Courtois (thésard).

[Badel *et al.* 2008 ; Hild *et al.* 2009]

4.2.6 - LAUM (Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine - UMR 6613 / Université du Maine) – Équipe Acoustique et Mécanique des Matériaux Poreux

L'équipe travaille sur l'acoustique et mécanique des milieux poreux (notamment de type fibreux, mousses polyuréthanes etc...), théorie de Biot, acoustique non linéaire (activités menées au sein de l'opération de recherche "acoustique et mécanique des milieux poreux"). Elle s'intéresse à la caractérisation des propriétés acoustiques, mécaniques et vibro-acoustiques des matériaux poreux, incluant les milieux fibreux, et développe des modèles de propagation et des outils de simulation (EF, matrices de transfert). Elle développe des matériaux acoustiques "naturels" ou "écologiques" pour l'atténuation du son.

Participants : Vincent Tournat (CR-HDR), Nikolay Chigarev (IGE), Guy Plantier (PR-ESEO), Jean-Michel Genevaux (PR), Yves Auregan (DR)

[Chigarev *et al.* 2009 ; Zakrzewski *et al.* 2010]

4.2.7 - LEMTA (Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée - UMR 7563 / INPL / UHP) : Équipe Mécanique du Solide

L'équipe travaille sur la caractérisation thermomécanique : mesures de champs mécaniques et thermiques, suivi in situ de la microstructure par interaction rayonnement / matière, interaction matériau / procédé de mise en forme.

Elle développe des méthodes novatrices de simulation numérique, des méthodes d'analyse inverse et d'optimisation, ainsi que d'éléments finis spécifiques. Elle dispose de moyens d'essais et de mesures de champs cinématiques et thermiques.

Participants : Jean-François Ganghoffer, Rachid Rahouadj

[Assidi *et al.* 2011 ; Ben Boubaker *et al.* 2007]

4.2.8 - Laboratoire GeM (Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique - UMR 6183 / ECN / Université de Nantes) : Polymères, Dynamique et Procédés

Comportement des suspensions fibreuses dans un plan, homogénéisation de renforts aléatoires en 2D, simulation de fibres dans un écoulement.

Participant : Steven Le Corre.

[Le Corre *et al.* 2004 ; Vassal *et al.* 2008]

4.2.9 - Laboratoire LGP2 (Laboratoire de Génie des Procédés Papetiers – UMR 5518 / INPG Pagora) – Équipe Physique des Structures Fibreuses

L'équipe travaille sur les problématiques liées aux papiers, notamment sur la caractérisation 3D des microstructures fibreuses par microtomographie à rayons X, la rhéologie des suspensions fibreuses et des milieux fibreux secs et imprégnation de milieux fibreux, le comportement thermo-hygro-mécanique et les mécanismes de fissuration des milieux fibreux.

Elle possède des compétences pour l'élaboration et la caractérisation des milieux fibreux, la rhéométrie aux différentes échelles, la microtomographie à rayons X, analyse d'images et rhéométrie avec observations in situ et les mesures de champs cinématiques par corrélation d'images ou par corrélation discrète.

Elle développe des techniques de changement d'échelles par homogénéisation continue ou discrète, de calculs sur microstructures par FEM ou DEM, et de modélisation par approche multi-échelles.

Participants : Bloch Jean-François (Mcf), Dumont Pierre (Mcf), Mauret Evelyne (Pr), Passas Raphaël (Mcf), Dufresne Alain (Pr), Bras Julien (Mcf)

[Latil *et al.* 2011 ; Viguié *et al.* 2011]

4.2.10 - Laboratoire MSSMat (Mécanique des Sols, Structures et Matériaux – UMR 8579 / École Centrale Paris) - Équipe Sciences Numériques pour la Mécanique

L'équipe développe un outil de simulation numérique par éléments finis du comportement mécanique de milieux fibreux à l'échelle microscopique des fibres, et travaille dans ce cadre sur la modélisation des câblés textiles.

Une activité expérimentale et de modélisation s'intéresse aux phénomènes de capillarité et d'élasto-capillarité dans les réseaux fibreux.

Participants : Elsa Vennat (MdC), Damien Durville (CNRS CR1).

[Durville 2005 ; Durville 2011 ; Vennat *et al.* 2010]

4.2.11 - LMT (Laboratoire de Mécanique et Technologie : UMR 8535 / ENS Cachan / Université Pierre et Marie Curie) - Équipe Mécanique et Matériaux

L'équipe s'intéresse aux mesures de champs par corrélation d'image et à la mécanique des matériaux hétérogènes, et développe des modèles de comportement de milieux fibreux aléatoires.

Participants : François Hild, Stéphane Roux.

[Baudequin *et al.* 1999 ; Hild *et al.* 2002 ; Hild *et al.* 2009]

4.2.12 - LPMT (Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles EAC 7189 / ENSISA / Université Haute Alsace) - Équipe Mécanique des Milieux Fibreux

L'équipe s'intéresse à l'identification des propriétés mécaniques des matériaux fibreux et textiles, de la fibre individuelle au tissé, en passant par l'identification du comportement des mèches. Elle dispose de moyens d'essais et de mesure permettant d'effectuer différents types de tests sur les fibres, les mèches et les tissés.

Participants : Artan Sinoeimeri, Christiane Wagner, Selsabil El-Ghezal Jeguirim, Marie-Ange Bueno, Frédéric Heim

[Stamoulis *et al.* 2007 ; Sinoimeri 2009 ; El-Ghezal Jeguirim *et al.* 2011]

4.2.13 - Laboratoire SIMAP (Science et Ingénierie des Matériaux et Procédés) (UMR 5521 / Université Joseph Fourier / INPG) – Équipe Mécanique et Couplages Multiphysiques des Milieux Hétérogènes

L'équipe GPM2 du laboratoire SIMAP concentre l'essentiel de ses activités sur l'élaboration, la mise en forme et les propriétés d'usage des matériaux de structure en conjuguant des approches expérimentales, des modélisations physiques et mécaniques et des simulations numériques.

Un code d'Eléments Discrets a été développé pour l'étude de la mécanique des milieux fibreux. Il permet de simuler la déformation d'ensembles de fibres en tenant compte du comportement mécanique des fibres individuelles ainsi que de leur interaction par contact et frottement. Ce code a été appliqué à l'étude de la mécanique de milieux aléatoires de fibres en relation avec des mesures expérimentales sur des laines d'acier. Dans le cadre du programme blanc AniM de l'ANR, la structure et la mécanique de laines constituées d'alliage à mémoire de forme est actuellement à l'étude.

Participants : Rémy Dendievel, David Rodney

[Barbier *et al.* 2009 ; Masse *et al.* 2006 ; Rodney *et al.* 2005]

4.2.14 - I2M (Institut de Mécanique et Ingénierie de Bordeaux - UMR 5295 / Université de Bordeaux (UB1, IPB) / Arts et Métiers – ParisTech / USC 927 INRA) – Département Génie Civil et Environnemental

Les travaux de l'équipe portent sur l'étude de la chaîne Procédés-Structures-Architectures-Propriétés de matériaux à structure enchevêtrée élaborés à partir de fibres naturelles, fibres de bois en particulier. L'objectif à terme est de coupler l'optimisation des procédés d'élaboration à celle des propriétés de service, via des outils de modélisation du comportement effectif.

Parmi les matériaux fibreux cellulotiques, les matériaux isolants, thermiques et/ou acoustiques, qui peuvent présenter de très fortes porosités, sont plus spécifiquement étudiés. Ces structures fibreuses présentent une architecture complexe, accentuée par les fortes hétérogénéité et variabilité de la matière première : la fibre de bois.

Différents travaux complémentaires sont abordés : caractérisation morphologique des structures fibreuses à partir d'images 3D acquises par microtomographie X ; développement de modèles 3D de réseaux de fibres enchevêtrées ; modélisation des propriétés physiques et mécaniques des milieux fibreux (panneaux de fibres, matériaux isolants) ; caractérisation expérimentale aux différentes échelles des propriétés physiques et mécaniques et validation des résultats théoriques ; identification des mécanismes de déformation des structures fibreuses sous sollicitation de compression ; suivi des modifications de structure à partir d'images microtomographiques ; identification des lois de comportement à partir de méthodes de corrélation d'images 3D.

Participants : Christine Delisée, Jérôme Melvestio

[Delisée *et al.* 2001 ; Delisée *et al.* 2010, Peyrega *et al.* 2010]

4.2.15 - Institut PRISME (Institut Pluridisciplinaire de Recherche en Ingénierie des Systèmes, Mécanique et Energétique : Université d'Orléans) - Équipe Mécanique des Matériaux Hétérogènes

L'équipe travaille sur la détermination des modèles de comportement des renforts textiles pour les composites.

Elle développe des modèles géométriques pour la représentation de la structure des tissés, et la simulation de leur comportement à l'échelle mésoscopique.

Participants : Gilles Hivet, Damien Soulat

[Hivet and Boisse 2008 ; De Bilbao *et al.* 2010 ; Hivet *et al.* 2010]

4.2.16 - GEMTEX (Laboratoire de Génie et Matériaux Textiles : ENSAIT) - Équipe Matériaux Avancés

L'équipe GEMTEX travaille sur la caractérisation de la structure des milieux fibreux à différentes échelles (nano, micro, méso, macro) via les technologies de mise en œuvre : tissés, tricotés, tressés, non-tissés.

Elle s'intéresse à la mise en forme des structures fibreuses pour applications composites, filtration, séparation, isolation, biomatériaux et à la modélisation du comportement des matériaux fibreux (prop. mécaniques, hydrauliques, thermiques, acoustiques...).

Participants : Xavier Legrand, Philippe Vroman, Damien Soulat, François Boussu, Anne Perwuelz

[Legrand *et al.* 2006 ; Legrand *et al.* 2009 ; Nawab *et al.* 2010]

4.2.17 Centre de Morphologie Mathématique, Mines ParisTech – Mathématiques et Systèmes

L'équipe travaille sur l'analyse morphologique 3D d'images, la modélisation probabiliste (microstructure, homogénéisation, rupture) et la simulation numérique de la microstructure de milieux fibreux et du comportement (homogénéisation numérique par FFT).

[Altendorf and Jeulin 2009 ; Altendorf and Jeulin 2011]

5 – Fonctionnement et organisation

5.1 – Genèse du projet

Le projet de GDR est né à la suite de rencontres, suscitées notamment au départ dans le cadre du projet ANR Mécafibres. Une première réunion, rassemblant 15 participants, représentant trois partenaires industriels et six équipes universitaires, a eu lieu en février 2010 au Laboratoire MSSMat de l'ECP. Cette réunion a permis de confirmer l'intérêt des participants pour un tel GDR, et de dégager des axes de recherche.

Le montage du projet a été ensuite assuré par une équipe constituée de Damien Durville (LMSSMat / ECP), Jean-François Ganghoffer (LEMTA / INPL) et Laurent Orgéas (3SR / Université Joseph Fourier Grenoble). Un pré-projet a été diffusé aux équipes de notre connaissance susceptibles d'être intéressées, ce qui a permis d'élargir la liste des partenaires.

5.2 – Structuration en thématiques

Les premières réflexions et échanges entre partenaires ont conduit à distinguer quatre thématiques suivantes :

- caractérisation géométrique des micro-structures des milieux fibreux et de leurs évolutions ;
- caractérisation des propriétés mécaniques aux différentes échelles ;
- recherche de modèles rhéologiques aux différentes échelles ;
- interactions des milieux fibreux avec leur environnement : acoustique et fluides.

5.3 - Structuration de la gouvernance au démarrage du GDR

Une première réunion générale au démarrage du groupement sera consacrée à la mise en place de la gouvernance du projet. Un comité directeur sera constitué, et un binôme de coordinateurs sera choisi pour chacune des thématiques. Le comité directeur aura en charge l'animation du GDR et se réunira deux fois par an.

5.4 - Organisation de rencontres annuelles sur chaque thématique

Le GDR se propose d'organiser chaque année au moins deux journées de rencontres abordant ses quatre thématiques.

Il sera demandé aux animateurs de chaque thématique de proposer pour chacune de ces rencontres de se concentrer sur une problématique particulière en relation avec la thématique. Une démarche de type “benchmark” sera encouragée, afin de proposer aux partenaires de travailler sur une problématique commune entre les rencontres annuelles, afin de pouvoir comparer les approches.

Les partenaires industriels seront sollicités pour proposer des benchmarks en correspondance avec les produits qu'ils développent ou qu'ils utilisent.

5.5 - Liens avec le GDR 3371 MIC

Le GDR CNRS 3371 MIC (Mise en Œuvre des Composites et Propriétés Induites), démarré en 2010, a des intérêts communs avec le présent projet de GDR, notamment à travers ses thématiques “Mise en forme des renforts” et “Écoulements”, et certains partenaires participent à ces deux projets. Si les deux GDR se rejoignent au niveau des applications sur la mise en forme des composites, ils ont cependant des objectifs distincts. Le présent projet de GDR 3MF se concentre sur l'analyse et la modélisation des mécanismes impliqués dans le comportement des milieux fibreux souples, mettant en jeu les interactions de contact-frottement entre fibres. Bien que les composites soient composés de fibres, le comportement de ces fibres au sein d'une matrice solidifiée sort du périmètre défini pour le présent GDR. La mise en forme de renforts textiles pour les matériaux composites constitue une application particulière et intéressante de la mécanique des milieux fibreux. Des contacts déjà existants entre animateurs des deux GDR devront permettre d'organiser des rencontres communes sur l'application de la mécanique des milieux fibreux à la mise en forme de renforts textiles.

5.6 - Organisation d'une école d'été

Une école d'été sera organisée au bout de deux ans. Elle permettra de faire le point et de formaliser les bases théoriques acquises par rapport aux quatre thématiques du GDR.

5.7 – Organisation d'une conférence internationale

Une conférence internationale de type Euromech ou Eccomas sera proposée avant la fin du GdR. La thématique de la modélisation mécanique des milieux fibreux et textiles commence à apparaître dans les conférences avec la proposition de mini-symposia dans diverses conférences (ESMC 12 - 8th European Solid Mechanics Conference, Graz (Autriche), ECCOMAS 2012 - 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Vienne (Autriche)), témoignant de l'intérêt croissant pour le sujet. Une conférence entièrement dédiée à la mécanique des milieux fibreux doit trouver sa place et son public.

5.8 – Mise en place d'un site web

Un site web dédié au GDR sera mis en place et hébergé par les services de l'ECP. Ce site web devra permettre de partager les programmes d'activités, les communications effectuées lors des rencontres.

6 – Budget

6.1 – Organisation des rencontres annuelles

5 k€ sont prévus chaque année pour l'organisation des rencontres annuelles, afin notamment de financer les déplacements des membres, d'inviter des intervenants extérieurs, et de proposer des repas aux participants.

6.2 – Aide à la mobilité des doctorants

Un budget de 5 k€ par an sera réservé pour encourager les échanges d'étudiants entre équipes, et financer leurs déplacements et leurs hébergements.

6.3 – Organisation d'une école d'été

Un budget de 20 k€ est prévu pour organiser une école d'été.

7 - Références

- [Akkerman and Lamers 2007] Akkerman R, Lamers E.A.D., 2007. Constitutive modelling for composite forming. In: Composite Forming Technologies. Woodhead Publishing. 22–45, Chapter 2.
- [Assidi *et al.* 2011] Assidi, M., Ben Boubaker, B. Ganghoffer, J.F., 2011. Equivalent properties of monolayer fabric from mesoscopic modelling strategies. *Int. J. Solids Struct.* Sous presse.
- [Alkhagen and Toll 2007] Alkhagen, M., and S. Toll, “Micromechanics of a Compressed Fiber Mass” *J Appl Mech* **74** 723-731 (2007).

- [Altendorf and Jeulin 2009] H. Altendorf, D. Jeulin, “3D Directional mathematical morphology for the analysis of fiber orientations” *Image Anal Stereol* **28** 143-53 (2009)
- [Altendorf and Jeulin 2011] Altendorf H., Jeulin D. “Random-walk-based stochastic modeling of three-dimensional fiber systems” *Physical Review E* **83**, 041804 (2011).
- [Ausias *et al.* 2006] Ausias, G., X. Fan, and R. Tanner, “Direct Simulation for Concentrated Fibre Suspensions in Transient and Steady State Shear Flows” *J. Non-Newtonian Fluid Mech* **135** 46-57 (2006).
- [Badel *et al.* 2008] Badel, P., E. Vidal-Salle, E. Maire, and P. Boisse, “Simulation and tomography analysis of textile composite reinforcement deformation at the mesoscopic scale”, *Compos Sci Technol* **68** 2433-2440 (2008).
- [Barbier *et al.* 2009] Barbier C., Dendievel R., Rodney D. “Role of friction in the mechanics of nonbonded fibrous materials” *Physical Review E* **80** 016115.1-5 (2009). [Baudequin *et al.* 1999] M. Baudequin, G. Ryschenkow, and S. Roux “Non-linear elastic behavior of light fibrous materials” *Eur. Phys. J. B* **12** 157-162 (1999)
- [Ben Boubaker *et al.* 2007] Ben Boubaker, B. Haussy, H., Ganghoffer, J.F., 2007. Consideration of the yarn-yarn interactions in meso/macro discrete model of fabric. Part I: single yarn behaviour. *Mech. Res. Comm.* **34**, Issue 4, 359-370. Part II: Woven fabric under uniaxial and biaxial extension. *Mech. Res. Comm.* **34**, Issue 4, 371-379.
- [Bertails *et al.* 2006] Bertails F, Audoly B, Cani MP, Querleux B, Leroy F, Leveque JL, “Super-helices for predicting the dynamics of natural hair”, *ACM Trans Graphics*, **25** 1180-87 (2006).
- [Boisse *et al.* 2005] Boisse P, Gasser A, Hagege B, Billoet JL, 2005. Analysis of the mechanical behaviour of woven fibrous material using virtual tests at the unit cell level. *International journal of Materials Sciences*, **40**, 5955–62.
- [Boisse *et al.* 2011] P. Boisse, N. Hamila, E. Vidal-Sallé and F. Dumont “Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses” *Composites Science and Technology* **71** 683–692 (2011).
- [Boutin and Hans 2003] Boutin, C., and S. Hans, “Homogenisation of periodic discrete medium: Application to dynamics framed structures,” *Comput. Geotech.* **30**, 303–320 2003.
- [Buet and Boisse 2001] Buet-Gautier K, Boisse P. “Experimental analysis and modeling of biaxial mechanical behavior of woven composite reinforcements” *Exp Mech* **41** 260–9 (2001).
- [Chigarev *et al.* 2009] N. Chigarev, J. Zakrzewski, V. Tournat and V.E. Gusev “Nonlinear frequency-mixing photo-acoustic imaging of a crack” *J. Appl. Phys.* **106** 036101 (2009).
- [Clauvelin *et al.* 2009] N. Clauvelin, B. Audoly and S. Neukirch, “Matched asymptotic expansions for twisted elastic knots: a self-contact problem with non-trivial contact topology”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **57** #9 1623—1656 (2009)
- [Davies *et al.* 2010] Davies P, Bunsell A, Chailleux E, “Tensile fatigue of PBO fibres” *Journal of Materials Science* **45**, 6395-6400 (2010)
- [De Bilbao *et al.* 2010] E. De Bilbao, D. Soulat, G. Hivet, A. Gasser, “Experimental Study of Bending Behaviour of Reinforcements” *Experimental Mechanics* **50** 333-351 (2010).
- [Delisée *et al.* 2001] C. Délisée, D. Jeulin, F. Michaud « Caractérisation morphologique et porosité en 3D de matériaux fibreux cellulosiques », *CRAS* **329** 179-85 (2001).
- [Delisée *et al.* 2010] C. Delisée, J. Lux, J. Malvestio, “3D Morphology and Permeability of Highly Porous Cellulosic Fibrous Material” *Transp Porous Med* **83** 623–636 (2010).

- [Durville 2005] Durville D. “Numerical simulation of entangled materials mechanical Properties” *J Mater Sci* **40** 5941–8 (2005)
- [Durville 2011] Durville D. “Simulation of the mechanical behaviour of woven fabrics at the scale of fibers” *Int J of Mater Forming* **3** 1241-1251 (2011)
- [Eberhardt and Clarke 2002] CN Eberhardt, AR Clarke “Automated reconstruction of curvilinear fibre from 3D datasets acquired by X-ray microtomography” *J Microscopy* **206** 41-53 (2002)
- [El-Ghezal Jeguirim *et al.* 2011] S. El-Ghezal Jeguirim, S. Fontaine, Ch. Wagner-Kocher, N. Moustaghfir, D. Durville, “Transverse compression behaviors of polyamide 6. 6 rovings: experimental studies” *Textile Research Journal* accepté (2011).
- [Ferec *et al.* 2009] Férec, J., G. Ausias, M. C. Heuzey, and P. J. Carreau, “Modeling fiber interactions in semiconcentrated fiber suspension” *J Rheol* **53** 49-72 (2009).
- [Gasser *et al.* 2000] Gasser, A., Boisse, P., Hanklar, S., 2000. Analysis of the mechanical behaviour of dry fabric reinforcements. 3D simulations versus biaxial tests. *Computational Material Science* , **17**, 1, 7-2.
- [Hamila and Boisse 2008] Hamila, N., Boisse, P., 2008. Simulations of textile composite reinforcement draping using a new semi-discrete three node finite element. *Composite Part B*, **39**, 999-1010.
- [Hamila *et al.* 2009] N. Hamila, P. Boisse, F. Sabourin, M. Brunet “A semi-discrete shell finite element for textile composite reinforcement forming simulation” *Int. J. Numerical Methods in Engineering* **79** 1443–1466 (2009).
- [Hild *et al.* 2002] Hild F, Raka B, Baudequin M, Roux S, Cantelaube F,” Multiscale displacement field measurements of compressed mineral-wool samples by digital image correlation” *Applied Optic* **41** (2002) 6815-28.
- [Hild *et al.* 2009] F Hild, E Maire, S Roux, J-F Witz, “Three-dimensional analysis of a compression test on stone wool” *Acta Mater* **57** (2009) 3310–3320
- [Hivet *et al.* 2010] G. Hivet, A. Wendling, E. Vidal-Salle, B. Laine, P. Boisse, “Modelling strategies for fabrics unit cell geometry application to permeability simulations” *Int J Mater Forming* **3** 727-730, (2010).
- [Hivet and Boisse 2008] G. Hivet, P. Boisse, “Consistent mesoscopic mechanical behavior model for woven composites reinforcements in biaxial tension” *Composites Part B: Engineering* **39** Issue 2, pp. 345-361, (2008).
- [Kawabata *et al.* 1973] Kawabata, S., Niwa, M., Kawai, H., 1973. *Journal of the Textile Institute*, **64**, N° 21.
- [Kawabata 1989] Kawabata, S., 1989. Nonlinear mechanics of woven and knitted materials, in : T.W. Chou, F.K. Ko (Eds.), *Textile Structural Composites*, **3**, Elsevier, Amsterdam, 67-116.
- [King *et al.* 2005] King, M.J., Jearanaisilawong, P., Socrate, S., 2005. A continuum constitutive model for the mechanical behavior of woven fabrics. *Int. J. Solids Struct.*, **42**, 3867-3896.
- [Latil *et al.* 2011] Latil P., L. Orgéas, C. Geindreau, P. J. J. Dumont, and S. Rolland du Roscoat, “Towards the 3D in situ characterisation of deformation micro-mechanisms within a compressed bundle of fibres” *Compos Sci Technol* **71** 480-488 (2011).
- [Le Corre *et al.* 2004] Le Corre, S., D. Caillerie, L. Orgéas, and D. Favier, “Behavior of a Net of Fibers Linked by Viscous Interactions: Theory and Mechanical Properties” *J. Mech. Phys. Solids* **52** 395-421 (2004).

- [Le Digou et al. 2010] Le Duigou A, Davies P, Baley C, “Macroscopic analysis of interfacial properties of flax/PLLA biocomposites” *Composites Science and Technology* **70** 1612–1620 (2010)
- [Legrand et al. 2006] X. Legrand, D. Kelly, A. Crosky, D. Crépin, “Optimisation of fibre steering in composite laminates using a genetic algorithm” *Composite Structures* **75** 524 - 531 (2006).
- [Legrand et al. 2009] X. Legrand, F. Boussu, P. Blot, D. Guitard, “A new technique of weaving 3d surface application to carbon/epoxy corner fitting plies” *International Journal of Material Forming* **2** 185-187 (2009).
- [Lomov et al. 2008] Lomov S, Boisse P, Deluycker E, Morestin F, Vanclooster K, Vandepitte D, et al. Full-field strain measurements in textile deformability studies. *Compos Part A* **39** 1232–4 (2008).
- [Liu et al. 2007] Liu W, Drzal L, Mohanty A, Misra M., 2007. Influence of processing methods and fiber length on physical properties of kenaf fiber reinforced soy based biocomposites. *Composites Part B*, **38**, 352–9.
- [Maire et al. 2001] Maire E, Buffières J-Y, Salvo L, Blandin J-J, Ludwig W, Létang J-M « On the application of x-ray microtomography in the field of material science” *Adv Eng Mater* **3** 539–46 (2001).
- [Masse et al. 2006] J.P. Masse, L. Salvo, D. Rodney, Y. Bréchet, O. Bouaziz “Influence of relative density on the architecture and mechanical behaviour of a steel metallic wool” *Scripta Mater* **54** (2006) 1379–1383
- [Mattson et al. 2007] Mattsson D, Joffe R, Varna J., 2007. Methodology for characterization of internal structure parameters governing performance in NCF composites. *Composites Part B*. **38**, 44–57.
- [Mezeix et al. 2009] Mezeix L., Bouvet C., Huez J., Poquillon D., “Mechanical behavior of entangled fibers and entangled cross-linked fibers during compression” *J. of Mater. Sci.* **44**(14) 3652-3661 (2009).
- [Nadler et al. 2006] Nadler, B., Papadopoulos, P., Steigmann, D.J., 2006. Multiscale constitutive modeling and numerical simulation of fabric material. *Int. J. Solids Struct.*, **43**, 206-221.
- [Nawab et al. 2010] Y. Nawab, X. Legrand, V. Koncar, “Study of structural changes occurring in 3D woven multilayer interlock fabric preforms while forming”, *Composite Structures*, soumise (2010).
- [Peng and Cao 2005] Peng X, Cao J., 2005. A continuum mechanics-based non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics. *Composites Part A*, **36**, 859–74.
- [Petrich et al. 2000] Petrich, M. P., D. L. Koch, and C. Cohen, “An experimental determination of the stressmicrostructure relationship in semi-concentrated fiber suspensions” *J. Non-Newtonian Fluid Mech* **95** 101-133 (2000).
- [Peyrega et al. 2010] Peyrega C., Jeulin D., Delisée C., Malvestio J. “3D morphological characterization of fibrous media” *Advanced Engineering Materials* (2010).
- [Poquillon et al 2005] D. Poquillon B. Viguier E Andrieu « Experimental data about mechanical behaviour during compression tests for various matted fibres” *J Mater Sci* (2005)
- [Potluri et al. 2006] Potluri P, Parlak I, Ramgulam R, Sagar TV., 2006. Analysis of tow deformations in textile preforms subjected to forming forces. *Composites Science and Technology*, **66**, 297–305.

- [Pradel 1998] Pradel, F., 1998. Homogénéisation Des Milieux Continus et Discrets Périodiques Orientés. Une Application Aux Mousses. Ph.D. Thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- [Robitaille and Gauvin 1998] Robitaille F, Gauvin R. “Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. i: Review of experimental results” *Polym Compos* **19** 198–216 (1998).
- [Rodney *et al.* 2005] D. Rodney, M. Fivel, R. Dendievel “Discrete Modeling of the Mechanics of Entangled Materials” *Phys Rev Letters* **95**, 108004 (2005)
- [Rolland du Roscoat *et al.* 2007] Rolland du Roscoat, S., M. Decain, X. Thibault, C. Geindreau, and J.-F. Bloch, “Estimation of Microstructural Properties from Synchrotron X-Ray Microtomography and Determination of the REV in Paper Materials” *Acta Mater* **55** 2841-2850 (2007).
- [Servais *et al.* 1999] Servais, C., J. Manson, and S. Toll, “Fiber-fiber interaction in concentrated suspensions: disperse Fibers.” *J Rheol* **43** 991-1004 (1999b).
- [Shahdin *et al.* 2009] Shahdin A., Mezeix L., Bouvet C., Morlier J., Gourinat Y., “Monitoring the effects of impact damages on modal parameters in carbon fiber entangled sandwich beams” *Eng. Struct.* 31(12):2833-2841 (2009).
- [Sinoimeri 2009] A. Sinoimeri, "Friction in Textile Fibers and its role in fiber processing."- *Wear* **267**: 1619-1624 (2009).
- [Stamoulis *et al.* 2007] G. Stamoulis, C. Wagner-Kocher, M. Renner, “Experimental study of transverse mechanical properties of polyamide 6.6 monofilaments”, *Journal of Materials Sci.* **42**, 4441-4450 (2007).
- [Stoop *et al.* 2011] N. Stoop, J. Najafi, F. K. Wittel, M. Habibi, and H. J. Herrmann, Packing of Elastic Wires in Spherical Cavities, *Phys Rev Letters* **106** 214102 (2011)
- [Switzer and Klingenberg 2003] Switzer, L. H., and D. J. Klingenberg, “Rheology of Sheared Flexible Fiber Suspensions Via Fiber Level Simulations” *J. Rheol* **47** 759-778 (2003).
- [Sze and Liu 2005] Sze KY, Liu XH, 2005. A new skeletal model for fabric drapes. *International Journal of Mechanics and Materials in Design.* **2**, 225–43.
- [Toll 1998] Toll S., “Packing Mechanics of Fiber Reinforcements” *Polym Eng Sci* **38** 1337-1350 (1998).
- [Toll and Månson 1994] Toll S., and J.-A. E. Månson, “Dynamics of a Planar Concentrated Suspension with Non- Hydrodynamic Interaction” *J Rheol* **38** 985-997 (1994).
- [Tollenaere and Caillerie 1998] Tollenaere, H., Caillerie, D., 1998. Continuous modeling of lattice structures by homogenization. *Adv. Eng. Software* (special issue) 29 (7), 699–705.
- [van Wyk 1946] van Wyk., C., “Note on the Compressibility of Wool” *J Text Inst* **37** 285U292. (1946).
- [Vassal *et al.* 2008] Vassal J.-P., Orgéas L., Favier D., Auriault J.-L., Le Corre S., “Upscaling the diffusion equations in particulate media made of highly conductive particles. I. Theoretical aspects” *Phys Rev E* **77** 011302 (2008)
- [Vennat *et al.* 2010] E. Vennat, D. Aubry and M. Degrange, “Collagen Fiber Network Infiltration: Permeability and Capillary Infiltration”, *Transp Porous Med* **84** 717-733 (2010).
- [Viguié *et al.* 2011] J. Viguié, P.J.J. Dumont, E. Mauret, S. Rolland du Roscoat, P. Vacher, I. Desloges, J.-F. Bloch, “Analysis of the hygroexpansion of a lignocellulosic fibrous material by digital correlation of images obtained by X-ray synchrotron microtomography: application to a folding box board” *J Mater Sci* (2011), online.

- [Yamane *et al* 1995] Yamane, Y., Y. Kaneda, and M. Doi, “The effect of interaction of rodlike particles in semi-dilute suspensions under shear flow”, *J. Phys. Soc. of Japan* **64**, 3265-3274 (1995).
- [Yasuda *et al.* 2002] Yasuda, K., N. Mori, and K. Nakamura, “A New Visualization Technique for Short Fibers in a Slit Flow of Fiber Suspensions” *Int. J. Eng. Sc.* **40** 1037-1052 (2002).
- [Zakrzewski *et al.* 2010] J. Zakrzewski, N. Chigarev, V. Tournat, V. Gusev, “Combined photoacoustic-acoustic technique for crack imaging” *Int. J. Thermophys.* **31** 199-207 (2010).