

## Compression de fibres enchevêtrées calibrées en nylon et aluminium. Expériences et modélisations

Dominique Poquillon, Bernard Viguière, Eric Andrieu

INP Toulouse/ENSIACET  
CIRIMAT

118, route de Narbonne, 31077 Toulouse Cedex 4, France  
Dominique.Poquillon@ensiacet.fr

### Résumé :

*Les fibres enchevêtrées constituent une catégorie à part de matériaux. Leur faible densité relative les rend attractives pour certaines applications mécaniques spécifiques. Leurs utilisations actuelles restent cependant, actuellement limitées à des fonctions d'isolation thermique ou de filtration. Les propriétés des fibres mais aussi leur état de surface et la morphologie du réseau conditionnent les propriétés physiques et mécaniques des matériaux enchevêtrés, qu'ils soient naturels ou artificiels.*

*La compréhension des mécanismes en jeu lors d'un cycle compression décompression est encore imparfaite. L'étude en compression de fibres modèles (Nylon et Aluminium) permet d'étudier divers paramètres qui contrôlent les réarrangements, les glissements et les déformations des fibres enchevêtrées. Plusieurs diamètres de fibres, différents élançements et différentes vitesses de sollicitation ont été utilisés lors des essais. L'effet de l'anisotropie de l'enchevêtrement initial est aussi mis en évidence sur les courbes de comportement. Enfin, Les résultats expérimentaux sont confrontés aux modélisations existantes.*

### Abstract :

*Entangled fibres are a specific category of materials. Their low relative density makes them promising candidate for some mechanical applications. However, currently, they are mostly used as heat insulator or in the field of filtration. The properties of fibres but also their surface quality and the morphology of the network condition the physical and mechanical properties of these entangled materials.*

*The comprehension of the mechanisms involved during a cycle of loading unloading during a compression test is still imperfect. To get a better understanding, experiments are carried out to test the influence of different parameters such as the intrinsic mechanical properties of individual fibres but also the parameters such as the fibre length, the fibre diameter, the effect of geometrical position of fibres in the sample and the effect of fibre surface modifications. The effect of the anisotropy of the initial tangle is also highlighted. Lastly experimental results are compared with existing models.*

**Mots-clefs : Fibres ; Essai mécanique ; Modélisation**

### 1 Introduction

Les matériaux enchevêtrés, qu'ils soient naturels (coton, laine) ou artificiels (laine d'acier..) ont de nombreuses applications. Ils sont utilisés comme isolants thermiques ou dans le domaine de la filtration. Cette famille de matériaux est proche de celle des matériaux cellulaires (mousses et nids d'abeille) par deux points essentiels : une très faible densité relative et une morphologie du réseau qui conditionne les propriétés physiques et mécaniques. Or, peu d'études fondamentales portent sur les mécanismes mis en jeu lors de la compression des fibres et les paramètres physiques caractéristiques de leur comportement mécanique. Cette préoccupation concerne cependant la valorisation des matériaux à base de fibres cellulosiques [1,2] de laine minérale [3,4] ou de laine métallique [5]. La mise en œuvre des matériaux composites à fibres a généré un certain nombre d'études sur la réponse à la compaction d'un assemblage de fibre [6-10]. Une des difficultés majeures du problème reste l'identification de la morphologie de l'assemblage lors de la compaction. Que l'on utilise des images classiques ou la tomographie, la connaissance du nombre

de contacts par fibre reste une donnée difficilement accessible expérimentalement [11-14] contrairement à la distribution de la répartition des orientations des fibres.

Une étude antérieure [15] a mis en évidence un comportement type pour cette famille de matériau, tant lors de la charge (compression) que lors de la décharge. Les matériaux testés précédemment présentaient une grande dispersion des longueurs de fibres ainsi que de leur section. Pour mieux appréhender les phénomènes en jeu, il nous a semblé intéressant de travailler avec des fibres modèles parfaitement calibrées. Le but est de comprendre les mécanismes mis en jeu et les interactions entre les phénomènes. L'élanement des fibres, c'est-à-dire le rapport de leur longueur sur leur diamètre influe sur le comportement des fibres enchevêtrées, comme l'agencement spatial des fibres (enchevêtrement aléatoire, empilement de strates 2D..) mais aussi leur état de surface et les propriétés mécaniques de la fibre individuelle (Module d'Young, comportement élastique, élastoplastique...). Les modélisations proposées du comportement de l'assemblage des fibres partent de l'hypothèse de comportement élastique isotrope des fibres constitutives. La modélisation du comportement des matériaux enchevêtrés est initiée pour la laine de mouton par Van Wick en 1946 [16]. Il propose une répartition aléatoire des directions des fibres. Seul le comportement en flexion des fibres est pris en compte, l'énergie de torsion et les phénomènes de frottements sont négligés. Ces hypothèses conduisent à une relation simple entre la pression appliquée (P) et la densité relative  $\rho$  du matériau:

$$P = A E (\rho^3 - \rho_0^3) \quad (1)$$

E est le module d'Young de la fibre, A une constante et  $\rho_0$  la densité relative sous une pression nulle.

En 1998, Toll [17] repart de ces travaux et approfondit l'analyse de la répartition des fibres et en particulier des contacts entre fibres. Il introduit aussi, en plus d'une équipartition aléatoire 3D de la direction des fibres, le cas d'un empilement aléatoire 2D et celui de nappes des fibres alignées (1D). La relation qu'il propose dans le cas d'un empilement 3D est la même que celle de Van Wyk (1) mais dans le cas 2D, elle devient :

$$P = B E (\rho^5 - \rho_0^5) \quad (2)$$

Durville [18-20] a introduit les frottements entre fibres dans un modèle numérique mécanique spécifique dédié à des entrelacs de fibres. Les simulations conduisent à des résultats pour lesquels la pression est reliée à la densité relative avec un exposant 3/2 qui augmente jusqu'à 5 pour les forts taux de compaction c'est-à-dire quand l'orientation des fibres n'est plus aléatoire mais limitée à celles contenues dans un plan perpendiculaire à la direction de compaction.

Rodney [21-22] propose à partir d'une approche originale s'inspirant de la dynamique moléculaire de retrouver les relations entre pression de compaction, densité relative et nombre moyen de contacts par fibre. Un potentiel est défini, tenant compte de l'énergie de flexion et de torsion des fibres. Les frottements ne sont pas pris en compte mais la non-pénétration des fibres est intégrée. Les simulations numériques, dans le cas de fibres longues donnent des résultats en accord avec les équations (1) et (2).

Des essais sur des laines métalliques [5] ont confirmé les approches de Van Wyk (1) et Toll (2) avec des exposants entre 3,5 et 4,5 selon la morphologie initiale des assemblages. Ces exposants sont confirmés [23] pour les fibres des pâtes à papier. Dans [1], les essais sur les fibres de bois ont conduit les auteurs à proposer un modèle phénoménologique de la forme :

$$P = C \varepsilon \exp(D\varepsilon) \quad (3)$$

Avec C et D constantes,  $\varepsilon$  déformation de compression. Ce modèle est en bon accord ajuste correctement les résultats expérimentaux sur les fibres de bois.

Le but de cette étude est de vérifier l'influence des différences hypothèses sur la loi de comportement et de comparer les courbes obtenues avec les modèles proposés. Les effets de viscosité et la décharge seront aussi explorés.

## 2 Matériaux et méthodes.

Les fibres étudiées sont achetées auprès de Goodfellow. Il s'agit d'une part de fil de nylon 6.66 calibré de diamètre 250 et 500 $\mu\text{m}$  et d'autre part de fil d'aluminium pur à 99,5% de diamètre 125 et 500  $\mu\text{m}$ . La vérification du diamètre des fibres et de leur état de surface ont été réalisés par observations au microscope électronique à balayage (LEO VP450). Plus de 20 mesures de diamètres ont été réalisées sur chaque type de fibres. La dispersion des mesures reste toujours inférieure à 5%. Les fils sont coupés à la longueur voulue pour fabriquer des lots de fibres de même diamètre et de longueur calibrée. Chaque lot est pesé (balance Sartorius Genius +/-10 $\mu\text{g}$ ) ce qui permet de connaître le nombre de fibres de l'assemblage. Enfin, afin d'étudier l'influence de l'état de surface (rugosité) sur la courbe en compression, un lot de fibres d'aluminium de diamètre 125 $\mu\text{m}$  a été corrodé par un traitement dans la soude (100g/l) de 3 fois 3 minutes ce qui augmente la rugosité de la surface de la fibre sans modifier de manière notable le diamètre (figure 1).

Le dispositif expérimental permet de comprimer à l'intérieur d'un cylindre en plexiglas les fibres enchevêtrées. Le diamètre interne du cylindre est de 59,9 mm. Les fibres sont introduites dans le cylindre en plexiglas, mélangées pour obtenir une orientation aléatoire 3D, certaines sont repiquées verticalement dans l'assemblage. La morphologie initiale est photographiée sous deux points de vue orthogonaux.

Pour les orientations aléatoires 2D, on procède par nappes. Le nombre de fibres introduites dans chaque assemblage est noté.

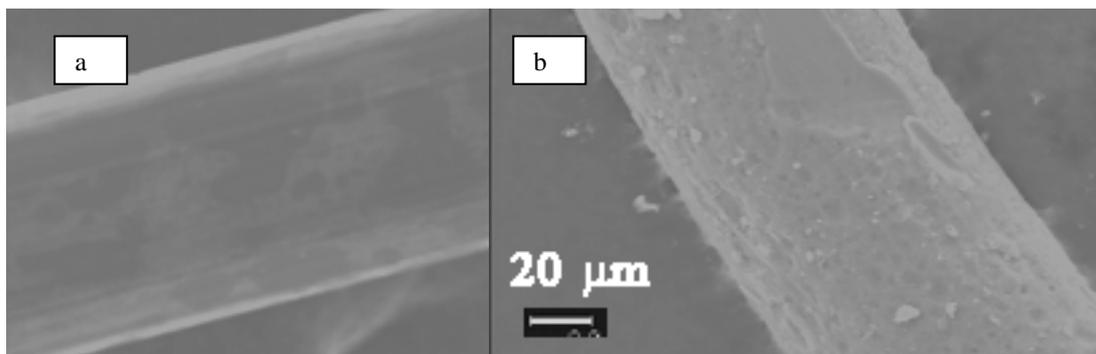


Figure 1 : Micrographies MEB de fibre Al de 125 $\mu\text{m}$  de diamètre a) non corrodée b) corrodée

A la fin de la mise en place des fibres, on descend la partie mobile du dispositif de compression jusqu'à avoir une force de 2N ( $7 \cdot 10^{-4}$  MPa) qui assure un contact correct entre le matériau et la tête de compression, puis l'essai à vitesse de déplacement imposée est lancé immédiatement. La hauteur de l'échantillon sous une charge de 2N est prise comme hauteur initiale. Les vitesses de déplacement de la traverse imposent des vitesses de déformation de l'ordre de  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  pour 6mm/min. La vitesse de décharge est égale à celle utilisée pour la charge. La décharge est considérée comme terminée lorsque l'effort de compression revient à 2N.

## 3 Résultats

Un lot de fibres de longueur 50 mm et de diamètre 0,5 mm (rapport d'élongement  $r=100$ ) a été soumis à différentes compressions depuis une disposition initiale aléatoire 3D. Entre chaque compression, les fibres sont sorties du dispositif, cardées puis remises en place.

La figure 2 montre les résultats de ces essais. On constate une excellente reproductibilité de la charge dans la partie commune. Plus le niveau de compression est important, plus la déformation résiduelle est forte (densité relative finale plus importante). Pour les fibres de Nylon 250 et 500  $\mu\text{m}$  de diamètre, différentes longueurs ont été utilisées (15, 30, 50, 100 mm). Tant que la longueur des fibres reste inférieure au diamètre du dispositif, il n'y a pas d'effet de celle-ci sur les courbes obtenues. Un très léger effet du diamètre de fibres est noté mais difficile à séparer de la dispersion expérimentale pour les fibres de nylon. Cet effet est plus marqué pour les fibres métalliques (125 $\mu\text{m}$

et 500 $\mu$ m). Les fibres les plus fines sont plus compressibles : pour une même pression de compaction, la densité relative atteinte est plus forte. Cet effet est vérifié pour des longueurs de 50 et 100mm.

L'importance de la géométrie initiale (aléatoire 3 D (fibres mélangées + repiquage vertical ; aléatoire 2D ; nappe 1D) est mise en évidence au cours d'essais sur les fibres de nylon pour lesquels la géométrie de l'empilement initial est de trois types (Figure 3) Un empilement aléatoire 3D présente une densité relative plus faible qu'en empilement aléatoire 2D lui-même derrière un empilement de fibres alignées (Figure 4). Ces résultats, intuitifs, sont à relier aux modélisations proposées dans la littérature et en particulier aux exposants liant la densité relative à la pression.

Les essais comparés sur fibres d'Al corrodées ou non corrodées (figure 5) montrent systématiquement que la contrainte pour atteindre une même densité relative augmente avec la rugosité des fibres. Cependant, l'énergie dissipée lors d'un cycle de compression décharge est du même ordre de grandeur si on travaille à contrainte maximale fixée mais supérieure pour les fibres corrodées si on travaille à déformation maximale imposée. Des essais sur le nylon montre que l'augmentation de l'énergie dissipée sur un cycle de compression décharge peut atteindre 30% pour les fibres de 250 $\mu$ m de diamètre et 30mm de longueur dont la surface est rendue rugueuse par abrasion.

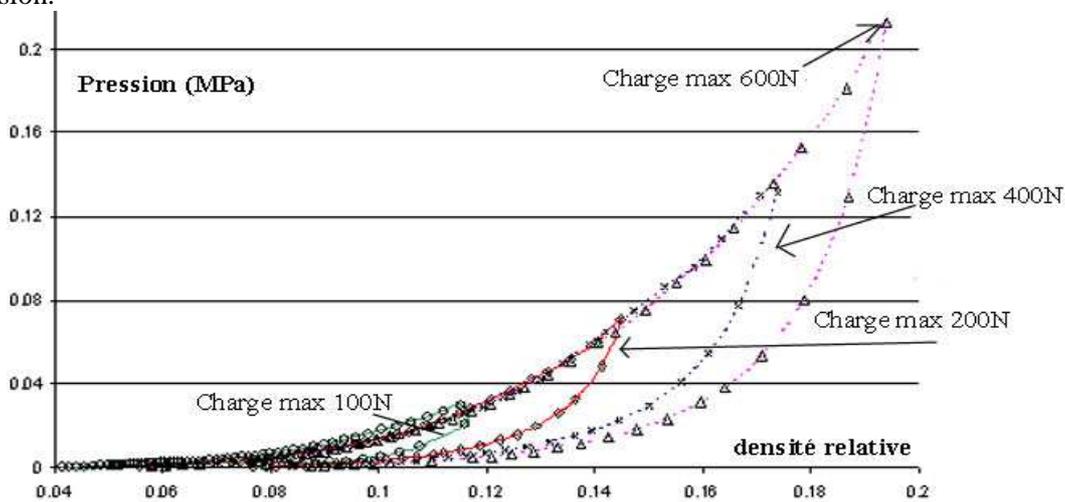


Figure 2 : Nylon6.66, fibres de diamètre 0.5mm de longueur 50mm compressées à 0.6mm/min (vitesse de déformation de  $10^{-4}s^{-1}$ ). Empilement initial aléatoire 3D. Effet du niveau de compression.

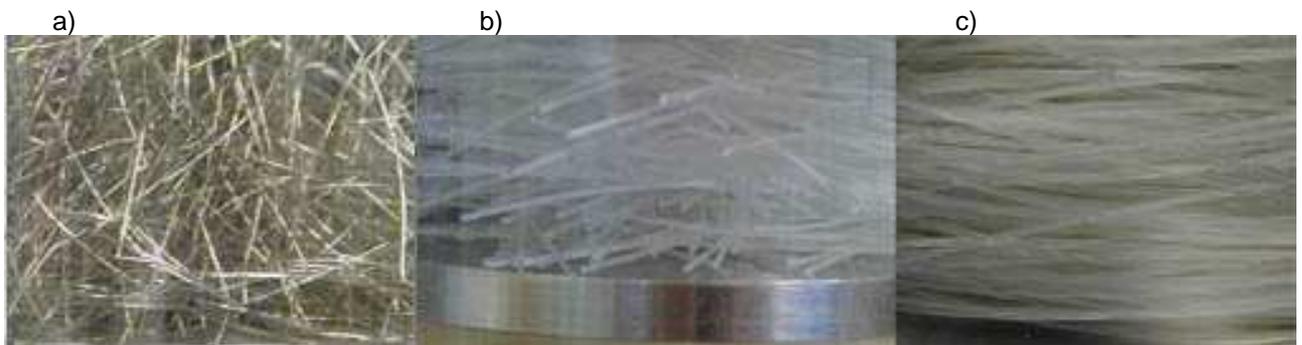


Figure 3: Morphologie des 3 empilements testés a) aléatoire 3 D b) aléatoire 2D c) en nappe 1D).

En utilisant ces résultats et ceux d'une étude antérieure [15], il apparaît les paramètres pertinents à modifier pour utiliser ces matériaux comme absorbeurs d'énergie sont la tortuosité des fibres et la rugosité de surface des fibres. D'autre part, l'arrangement initial des fibres de type aléatoires 3D donne pour une même déformation imposée une meilleure capacité d'absorption.

**Comparaison des résultats aux différents modèles :** 50 essais ont été réalisés lors de cette étude. La vitesse de sollicitation la plus utilisée (0,6mm/min) concerne 12 essais sur fibres de nylon partant d'un empilement aléatoire 3D avec la surface initiale c'est-à-dire lisse. Pour ces essais, un ajustement de la courbe de compression sur le modèle de Van Wyk a été systématiquement effectué. Les exposants obtenus varient de 3,77 à 4,22. Pour l'essai sur fibres alignées 1D l'exposant obtenu est de 5,61 et pour l'empilement aléatoire 2D : 5,08.

Les essais (empilement 3D) sur les fibres d'aluminium de diamètre 0,5 mm et de longueur 150 ou 50mm ne suivent pas ce modèle. En revanche ceux pour les fibres de 0,125 mm donnent un exposant 3,1 (longueur 150 mm) et 2,3 (longueur 50 mm). Pour des fibres d'acier de 125  $\mu\text{m}$ , et de longueur 30 mm, des valeurs entre 3,9 et 4,1 avaient été trouvées précédemment.

La pression est très bien ajustée par une courbe en loi puissance de la densité relative comme l'illustre la figure 5 représentative des résultats obtenus sur l'ensemble des essais.

#### 4 Perspectives et conclusion

Des essais de compression sur fibres modèles, essentiellement nylon 6.66 mais aussi d'aluminium ont été réalisés. Ces essais mettent en évidence un léger effet du diamètre des fibres dans le comportement en compression, un effet notable de la rugosité de surface des fibres mais surtout un fort effet de la morphologie initiale de l'assemblage.

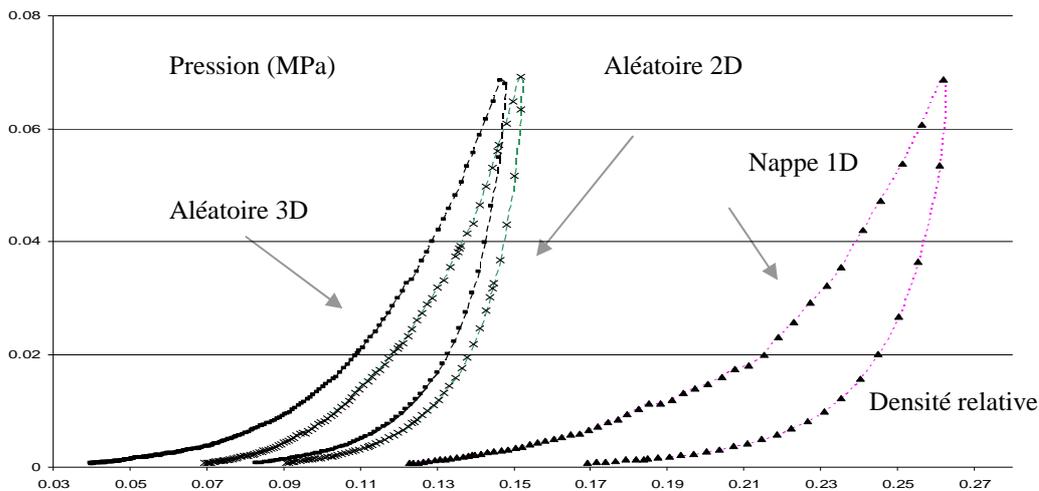


Figure 4 : Nylon6.66, fibres de diamètre 0,25mm de longueur 30mm compressées à 0,6mm/min (vitesse de déformation de  $10^{-4}\text{s}^{-1}$ ). Effet de la morphologie initiale de l'assemblage (voir figure 3).

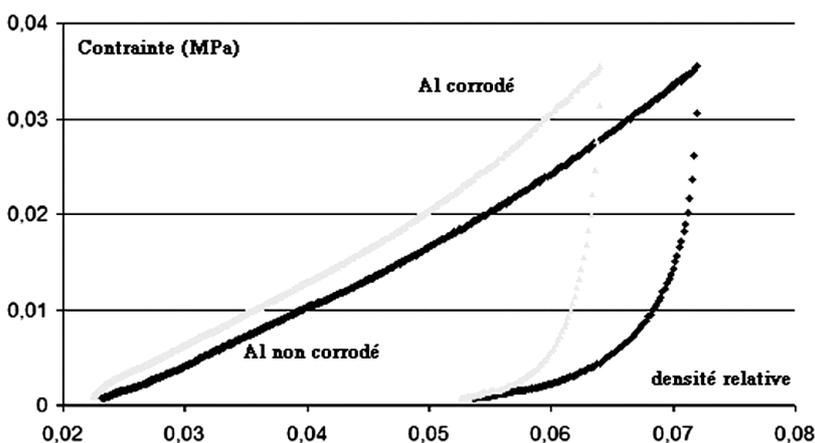
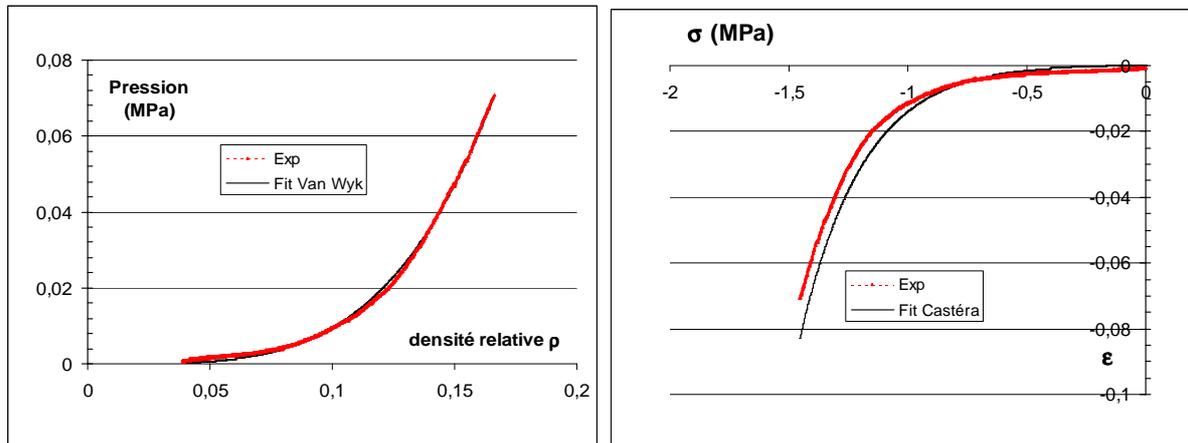


Figure 5: Aluminium, fibres de diamètre 0,125mm de longueur 50mm compressées à 0,6mm/min (vitesse de déformation de  $10^{-4}\text{s}^{-1}$ ).

Les résultats expérimentaux lors de la phase de mise en charge sont conformes aux modélisations de Van Wyk et de Toll pour les empilements aléatoires 3D, 2D et alignés (1D). L'augmentation de la rugosité de surface des fibres augmente les phénomènes dissipatifs et les effets de la vitesse de la sollicitation ainsi que l'énergie dépensée lors d'un cycle charge-décharge.

Les photographies réalisées donnent de bonne indication des orientations initiales des fibres mais une identification automatique et exhaustive des directions des fibres n'a pas pu être réalisée. Des essais complémentaires sont en cours pour mieux quantifier les phénomènes.



**Figure 6: Nylon 6.66, fibres de diamètre 0,25mm de longueur 50 mm compressées à 0,6mm/min. Empilement initial aléatoire 3D. Comparaison des données expérimentales est des modèles pour la mise en charge. a) fit en  $P=167 \rho^{3,77}$  b) fit en  $\sigma= 0,0022 \epsilon \exp(-2,49 \epsilon)$ .**

**Remerciements :** Ces travaux ont été réalisés avec l'aide d'Amin Janghorban, de Tristan MAZET et d'Aurélien MARIE et soutenus financièrement par BQR INPT-UPS-INSA.

### Références

- HAEFFELIN, J.-M., BOS, F. & CASTÉRA, P. 2002 Modélisation du comportement d'un matelas de fibres cellulosiques au cours de sa consolidation. IN UTBM (Ed.) Matériaux 2002. Tours, France.
- CASTÉRA, P. 2002 Comportement physico-mécanique de matériaux fibreux cellulosique considérés comme des milieux aléatoires. IN UTBM (Ed.) Matériaux 2002. Tours, France.
- BAUDEQUIN, M., RYSCHENKOW, G. & ROUX, S. 1999. The European Physical Journal B, **12**, 157-162.
- BAUDEQUIN, M. 2002. 'Identification des mécanismes physiques mis en jeux lors de la reprise d'épaisseur de la laine de verre', Thèse de doctorat, Paris IV
- MASSE, J. P., SALVO, L., RODNEY, D., BRECHET, Y. & BOUAZIZ, O. 2006 Scripta Materialia, **54**, 1379-1386.
- CHEN, B. & CHOU, T.-W. 2000 Comp. Sci and Tech, **60**, 2223-2231.
- SERVAIS, C., MICHAUD, V. & MANSON, J. A. 2001 Polymer composites, **22**, 298-311.
- MICHAUD, V. & MANSON, J. A., 2001 J of Comp. Mat, **35**, 1150-1173.
- MICHAUD, V. & MANSON, J. A. 2001 Journal of Composite Materials, **35**, 1174-1199.
- BATCH, G. L., CUMISKEY, S. & MACOSKO, C. 2002 Polymer composites, **23**, 307-318.
- BERGONNIER, S., HILD, F. & ROUX, S. 2005 J. of strain analysis, **40**, 185-197.
- HILD, F., RAKA, B., BAUDEQUIN, M., ROUX, S. & CANTELAUBE, F. 2002 Applied optics, **41**, 6815-6828.
- FAESSEL, M., DELISÉE, C., CASTÉRA, P. & LUX, J. 2002 Caractérisation et modélisation 3D de matériaux fibreux cellulosiques à partir d'imagerie par micro-tomographie X. IN UTBM (Ed.) Matériaux 2002 Tours, France.
- DELISÉE, C., JEULIN, D. & MICHAUD, F. 2001 C.R. Acad. Sci. Paris, **329**, 179-185.
- POQUILLON, D., VIGUIER, B. & ANDRIEU, E. 2005 J. of Materials Science, **40**, 22, 5963 – 5970
- VAN WYK, C. M. 1946 J. Textile Institute, **37**, 285-289.
- TOLL, S. 1998 Polymer Engineering and Science, **38**, 1337-1350.
- DURVILLE, D. 2004 Finite element modelling of the nonlinear behaviour of fibrous materials considering internal contact-friction interactions. IN AL, P. N. E. (Ed.) Proceeding of the European Congress on Computational Method in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS 2004. Jyväskylä.
- DURVILLE, D. 2004 Modelling of contact-friction in entangled fibrous materials. IN SPRINGER-VERLAG, T. U. P. A. (Ed.) Proceeding of Computational Mechanics WCCM VI. Beijing, China.
- DURVILLE, D. 2005 J. of Materials Science, **40**, 5941-5948.
- RODNEY, D., FIVEL, M. & DENDIEVEL, R. 2004 Discrete modeling of mechanics of entangled materials. EUROMECH Colloquium 459 'Mechanical behaviour of cellular solids'. Nancy, France.
- RODNEY, D., FIVEL, M. & DENDIEVEL, R. 2004 Discrete modeling of the mechanics of entangled materials. Physical Review Letters, **95**, 1-4.
- LUNDQUIST 2004 Compression behavior of pulp fiber networks. Polymer Engineering and Science, **44**, 45-55.