
Relations structure-propriétés des matériaux à base de bois. Apport de la microtomographie X

Christine DELISEE – ENITAB, UMR I2M GCE

Plan de la présentation

- Cadre institutionnel
- Contextes et objectifs des travaux
- Matériaux à base de bois étudiés
- Outils pour l'observation, la caractérisation et la modélisation
- Etude des relations structure – propriétés
- Conclusion - Travaux prioritaires et perspectives

Cadre institutionnel des travaux

- Le laboratoire I2M Institut Mécanique et Ingénierie Bx
(UMR UBx (UB1, IPB) / CNRS / Arts et Métiers ParisTech / USC INRA)

01/01/2011, regroupement des laboratoires de mécanique de Bx

- . **GCE Génie Civil et Environnemental** : 20EC + 1C + 1IR
- . **APY** Acoustique Physique : 7EC + 6C
- . **TREFLE** Fluides/Transferts : 28EC + 4C + 2IR
- . **MPI** Matériaux Procédés Interactions : 13,5EC
- . **IMC** Ingénierie Mécanique et Conception : 16,5EC
- . **DUMAS** Durabilité Matériaux Assemblages : 16,5EC + 1C + 1IR

Actions transverses

- . **Ingénierie du matériau Bois**
- . Interactions procédés/tenue en service des matériaux et structures
- . Evaluation/Contrôle Non Destructif

Cadre institutionnel des travaux

■ Le département GCE Génie Civil et Environnemental

01/01/2007 : fusion LRBB + LCSV → US2B (méca / chimie)

01/01/2011 : fusion US2B méca + GHYMAC → GCE

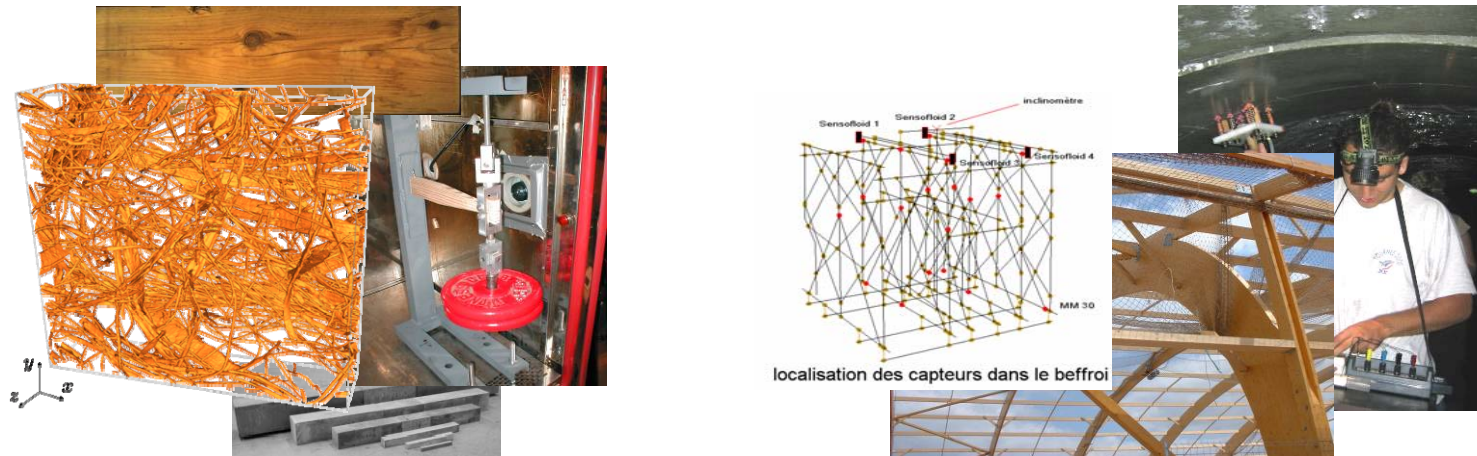
Sites INRA Pierroton + Capforest Talence → **regroupement sur site Capforest (fin 2011)**

3 axes

Axe 1 Rhéologie du bois, des roches et des matériaux de construction

Axe 2 Interaction des sites et des ouvrages avec leur environnement

Axe 3 Reconnaissance et évaluation des sites et des ouvrages



Cadre institutionnel des travaux

■ Le département GCE : le Bois

Des compétences fortes

- . Mécanique de l'endommagement et de la rupture
- . Durabilité, préservation, fonctionnalisation du bois
- . Imagerie 3D des matériaux à base de bois (micro-CT)
- . Fluage, durée de vie (fatigue statique), assemblages
- . Diagnostic des ouvrages (dont anciens)
- . Modélisation, calcul scientifique
- . Conception, éco-conception et assemblage de connaissances

Des projets

- . Morphomécanique du bois de structure (post-doc CNRS, thèse Région)
- . ANR Mat&Pro Projet SILENT WALL
- . **EquipEx XyloForest : Xyloplate (UBx), XyloMat (UPPA)**

Cadre institutionnel des travaux

■ L'axe transversal Ingénierie du Bois

Sa vocation

- . **Fédérer** plusieurs départements de l'I2M sur des thèmes pluridisciplinaires touchant à l'ingénierie du bois
- . **Nouer des collaborations** avec des disciplines extérieures comme la biologie ou la chimie des polymères organiques
- . **Contribuer à l'assemblage de connaissances** dans ce domaine
- . **Maintenir une forte lisibilité** des recherches sur le bois en Aquitaine

Ses axes thématiques prioritaires

- . Biologie de l'arbre et rhéologie du bois
- . Innover par l'éco-ingénierie
- . Ingénierie de la construction bois

Contextes économique et sociétal

- Développement et valorisation d'une ressource renouvelable : la biomasse forestière
- Valorisation de l'utilisation de fibres naturelles
panneaux structuraux dans le cas de la construction, l'ameublement, l'automobile...
panneaux isolants thermiques et/ou acoustiques
- Partenariat soutenu avec les industries de la filière bois
- Optimisation des matières premières : réduction de la quantité de matière, optimisation des assemblages (microstructure), conception mono-matériau, ...
- Diversification possible de la matière première et des procédés

Contexte scientifique

- Etude des relations Procédés/Structure/Propriétés des matériaux poreux hétérogènes : fibres enchevêtrées, fibres naturelles, fibres de bois

Complexité et hétérogénéité des structures végétales (≠ échelles)

Thème de recherche innovant (LRBB 1998, US2B 2007, I2M 2011)

Positionnement national et international

- . Fibres végétales : LGP2 (Fr.), ITWM (De), U. Lund (Sw), U. Maine (USA), ...
- . Fibres organiques / métalliques : LCTS, SIMAP, ENSIACET, LEMTA, ...
- . Projets de GDR (CNRS)
 - « Milieux Fibreux » (EC Paris, 3S-R Grenoble, LEMTA Nancy)
 - « Bois » (J. Gril, LMGC Montpellier)

Contexte scientifique

- Utilisation de techniques d'imagerie non destructives

Développement des travaux liés à la microtomographie (3D) et à la stéréovision (2,5D)

- . Nanotom Phoenix X-Ray (Projet RA : ICMCB, US2B, TREFLE, LCTS, TOMOMAT)
- . **Microtomographe transportable** Skyscan 1174 (EquipEx Xylomat)
- . **Caractérisation statique et/ou dynamique**
- . GDR CNRS « Mesures de champs » (LMGC), 3 GT : Stéréocorrél., Mesures 3D

Potentiel important de la mesure quantitative au cœur des matériaux

- . Caractérisation de la disposition spatiale des phases
- . Création de modèles théoriques de structures
- . Modélisation de propriétés et de process (expérimentation *in situ*)
- . Optimisation des structures en relation avec les propriétés

Objectifs

- Etude des relations procédés - structure – propriétés

Propriétés contrôlées par les procédés d'élaboration

Propriétés contrôlées par les architectures des réseaux

- Optimisation couplée procédés – propriétés

Optimisation des propriétés de la matière première

Optimisation des assemblages de fibres (liaisons)

- Amélioration / développement de nouveaux procédés et/ou produits

Eco-conception préliminaire

Recyclage des produits en fin de vie

Matériaux étudiés

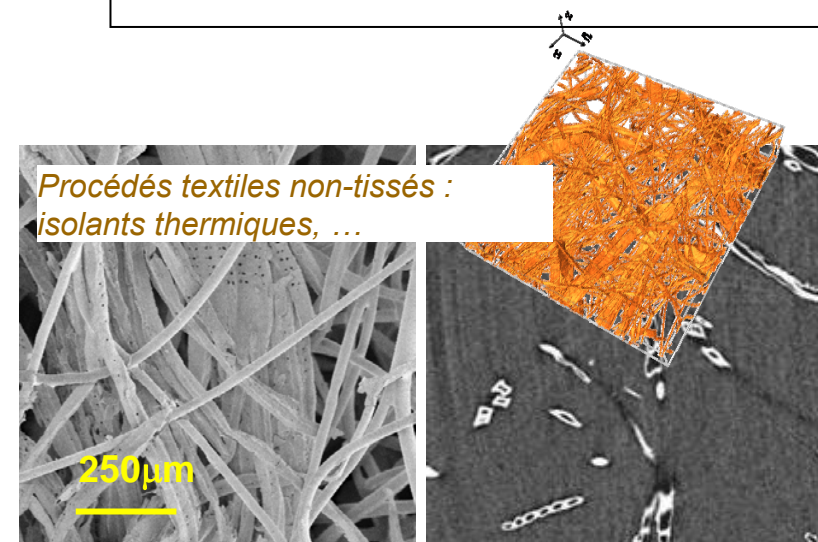
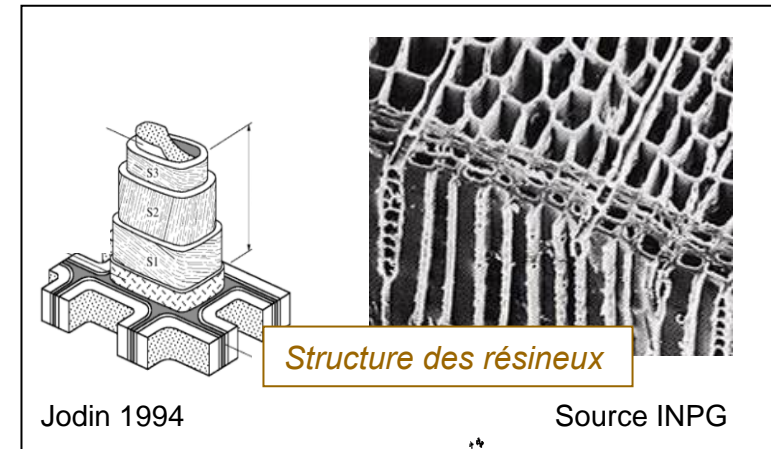
■ Produits d'origine végétale (fibres de bois)

Matériaux d'usage courant

- . Classiques ou innovants, optimisables
- . Matériaux isolants, matériaux structuraux

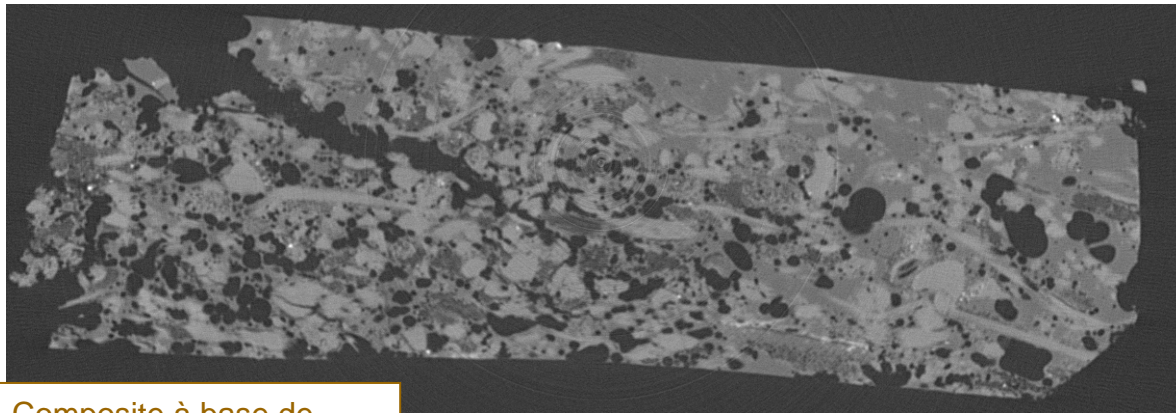
Variabilité aux différentes échelles

Structures à architecture complexe



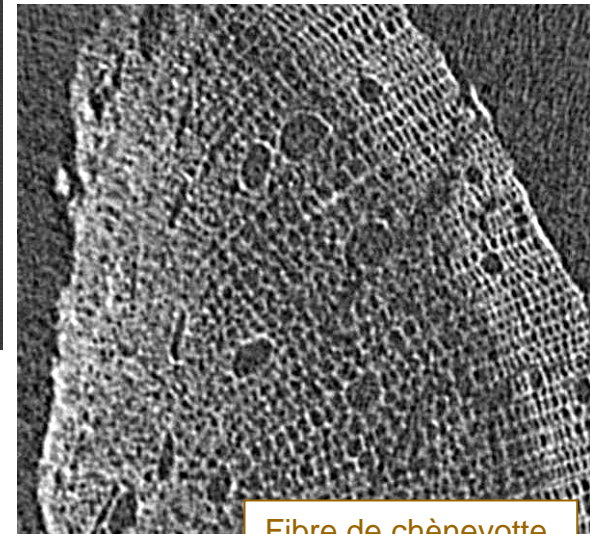
Matériaux étudiés

- Produits d'origine végétale : bois, bambou, chanvre, ...



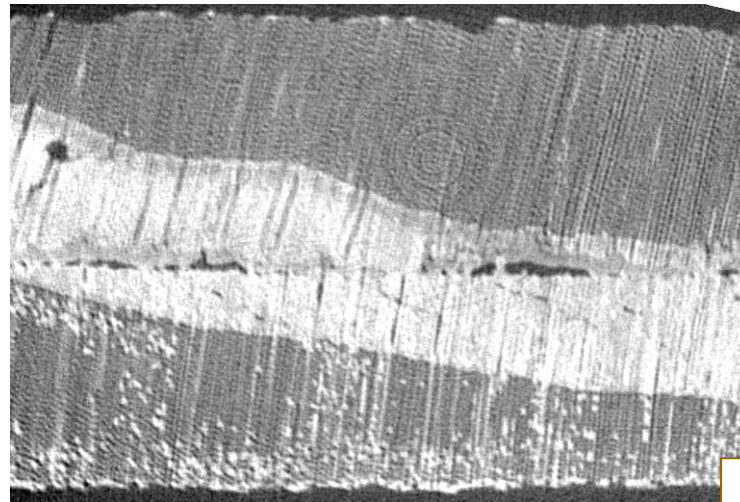
Composite à base de bambou

Conception Bamboo Fiber Technology Bamfitech



Fibre de chènevotte

Coll. UMR FARE Reims

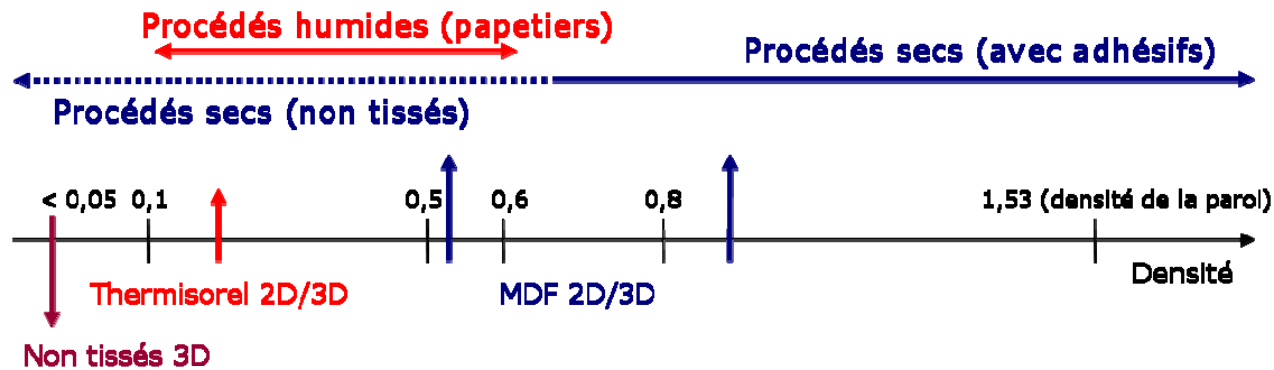


Composite bois "vert"

Thèse Lavalette I2M/Dubourdieu

Matériaux étudiés

- Des procédés d'élaboration pour des fonctions diverses

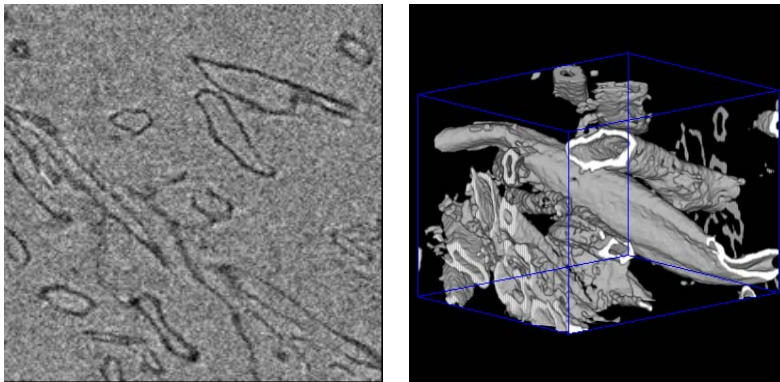


- Et des propriétés liées aux procédés ...

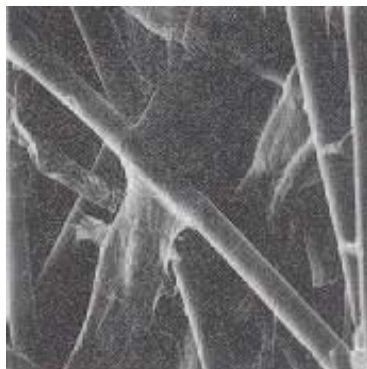
- . Densités macroscopiques ($0,04 \rightarrow 1,53$)
- . Propriétés intrinsèques des fibres
- . Non homogénéité de densité - Anisotropie
- . Architecture : orientation, tortuosité des fibres et pores
- . Nombre, répartition spatiale, nature des liaisons

Matériaux étudiés

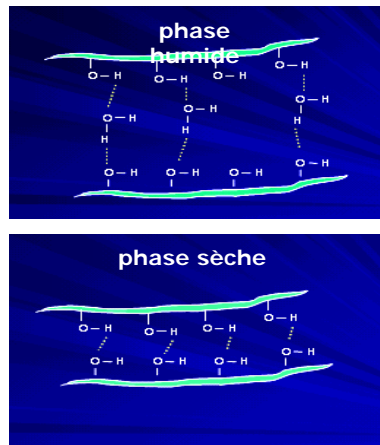
- Différents types de fibres et de liaisons (micro / ultrastruct.)



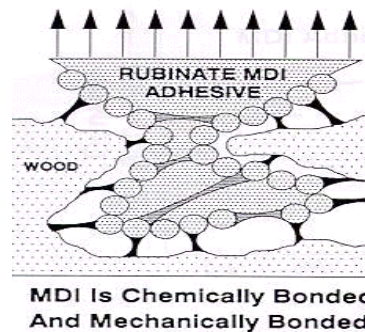
Microtomographie X haute résolution US2B



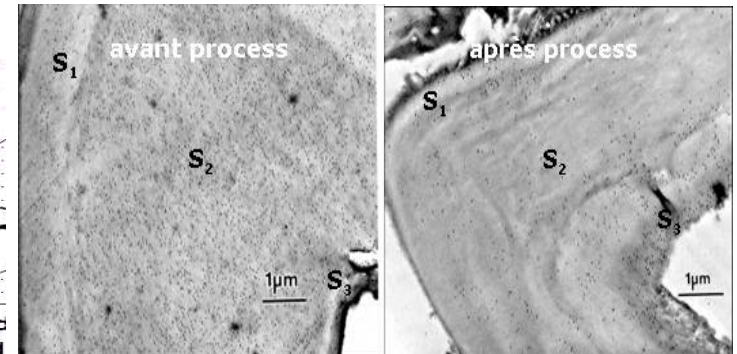
Proc. textile non-tissé
Image MEB, IFTH



Procédé papetier Castéra 2002



MDI Is Chemically Bonded
And Mechanically Bonded



Procédé sec MDF. Images MET, CERMAV

Outils et méthodes

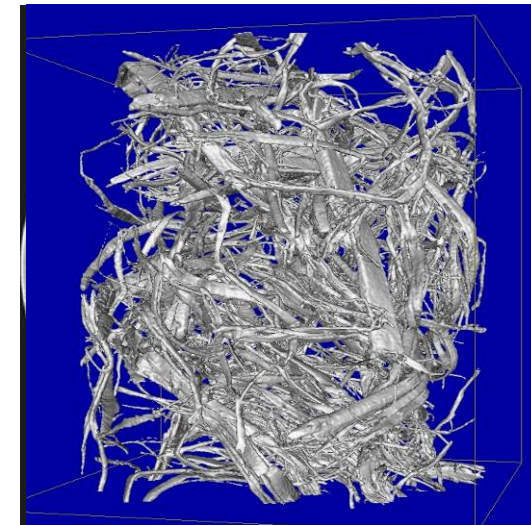
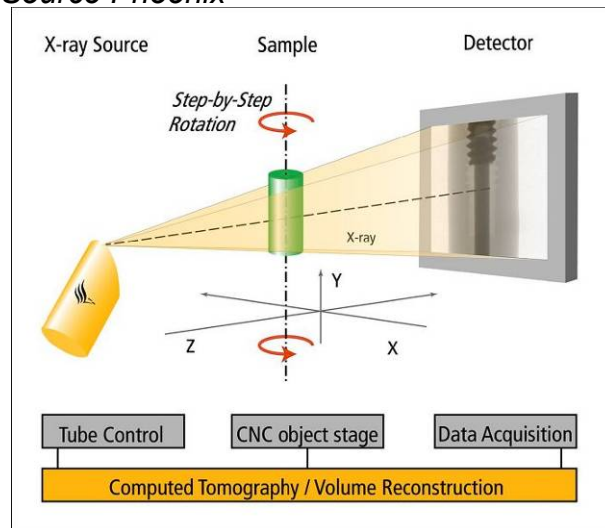
- Observation à l'échelle du réseau de fibres (X-ray CT)

- . ESRF Synchrotron Grenoble, résolution $0,3 \mu\text{m}$, accès réservé

- . Nanotom Phoenix X-Ray Bordeaux, résolution $0,9 \mu\text{m}$

- . Taille centimétrique des échantillons (découpe difficile)

Source Phoenix



Acquisition des projections

Reconstruction du volume 3D (32 Go)

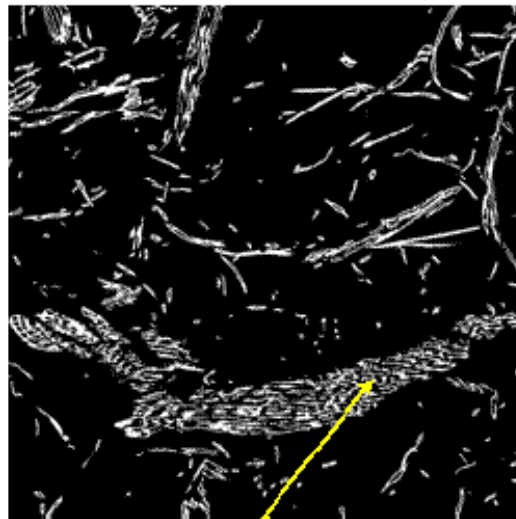
Outils et méthodes

- Observation / caractérisation : mesures morphologiques 3D sur les phases segmentées

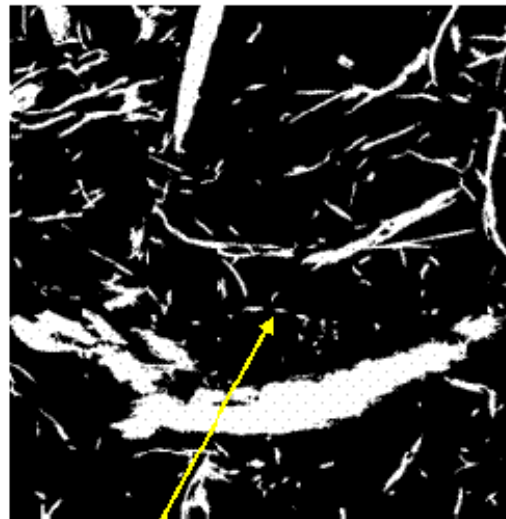
. Porosités : ouverte, interne, externe, totale

. Distribution de taille des pores, des fibres

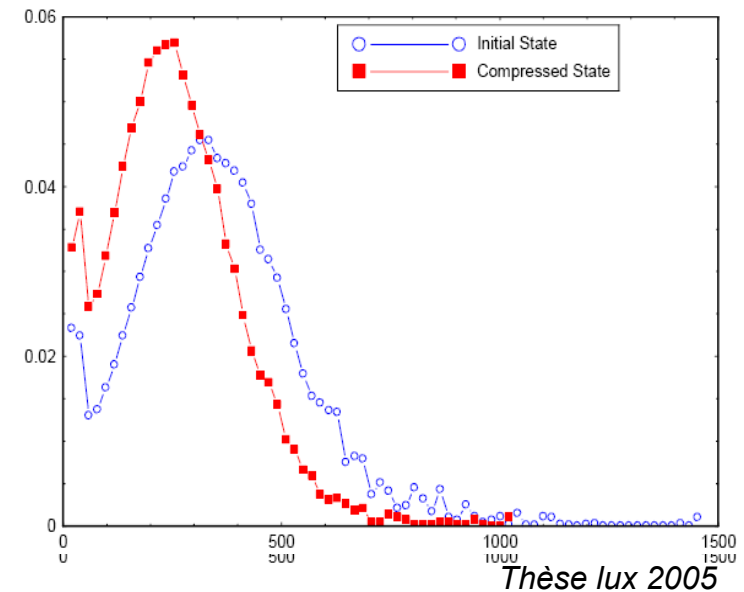
. Orientations locale, globale (covariance), connectivité



porosité interne des fibres

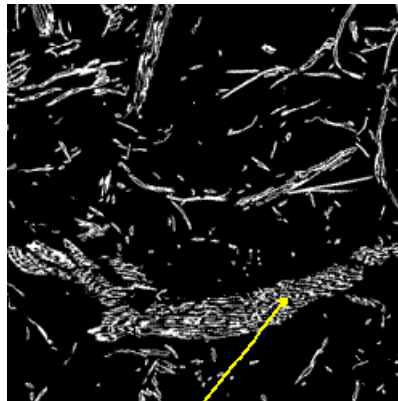
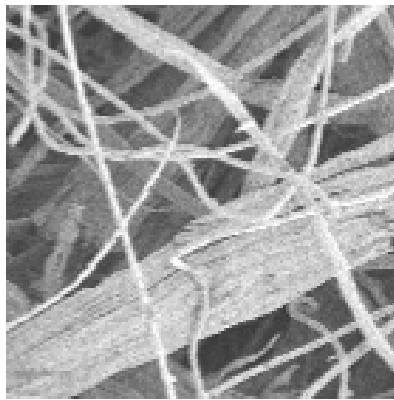


porosité externe aux fibres

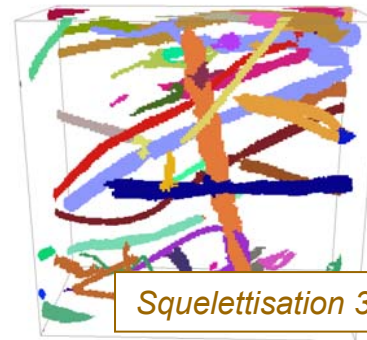
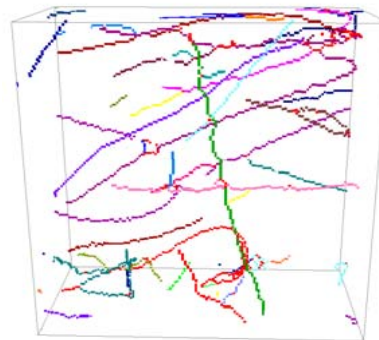


Outils et méthodes

- Observation / caractérisation : mesures morphologiques 3D sur les fibres individuelles et les populations segmentées.

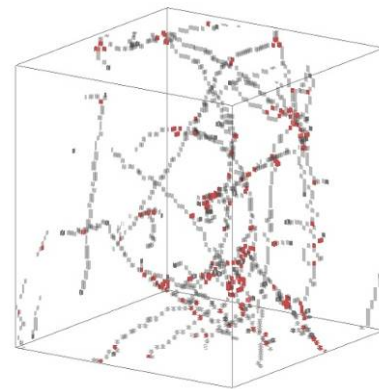


porosité interne des fibres



Squelettisation 3D, labélisation des fibres

Thèse Lux 2005

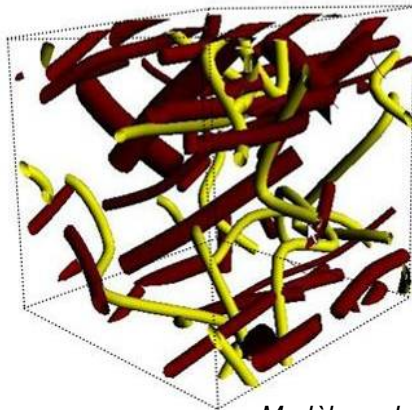
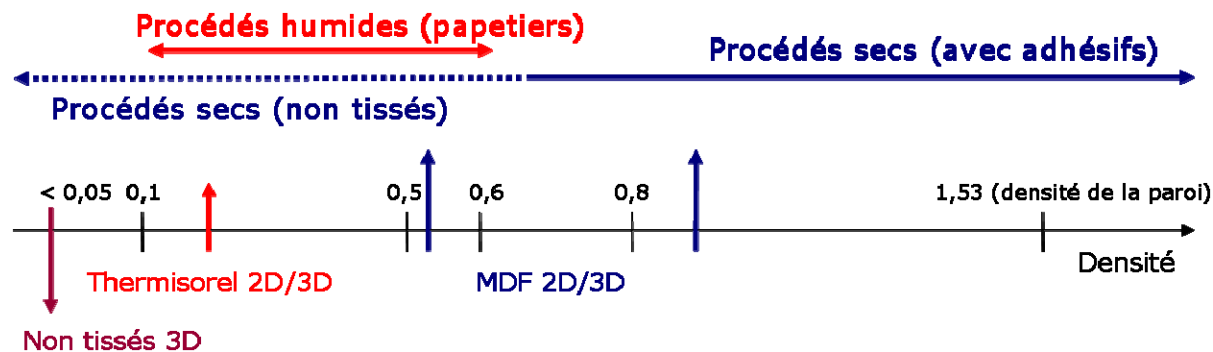


Identification des populations et des contacts

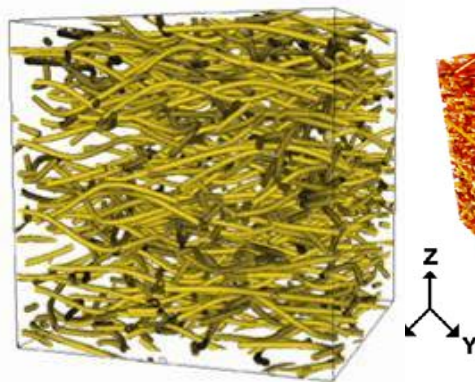
Thèses Lux 2005, Tran 2009/2012

Outils et méthodes

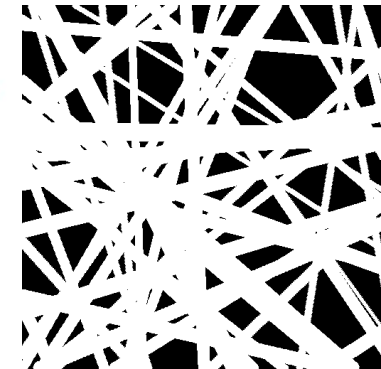
- Modélisation par des milieux aléatoires adaptés à des structures et/ou des process



Modèle probabiliste renseigné.
Thèse Faessel 2003



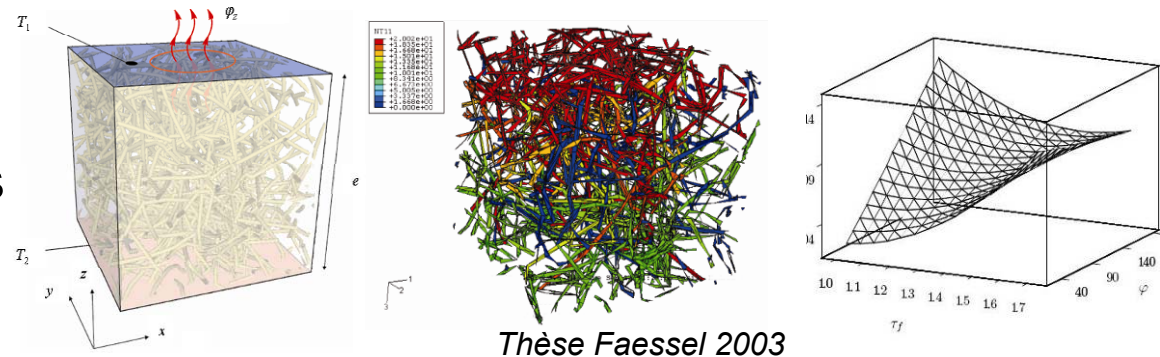
Modèles booléens paramétrés sur images.
Thèse Peyrega 2009. Coll. CMM



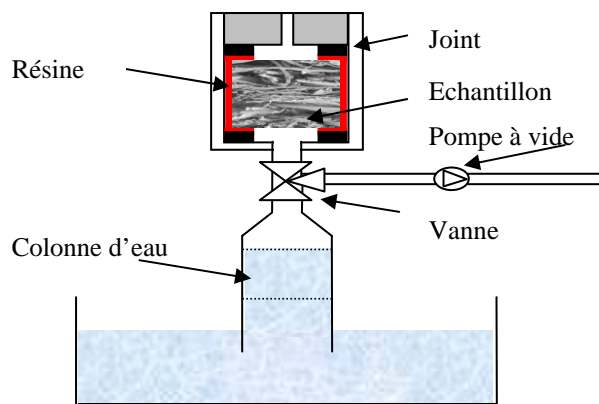
Relations structure - propriétés

■ Morphologie et propriétés physiques / mécaniques

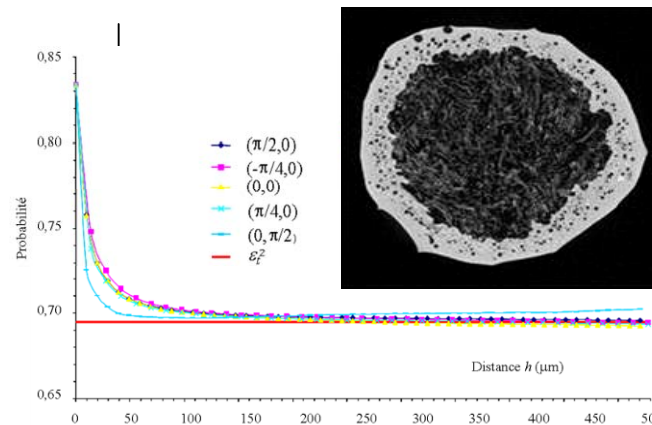
- **Conductivité thermique** simulée par EF (fibres)
- Variation des paramètres d'entrée du modèle : optimisation



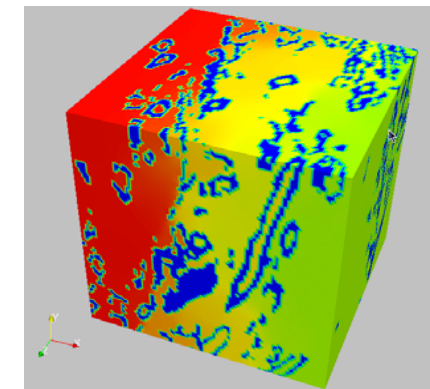
- **Perméabilité à l'air** (pores) : résolution directe dans un VER



Mesures expérimentales



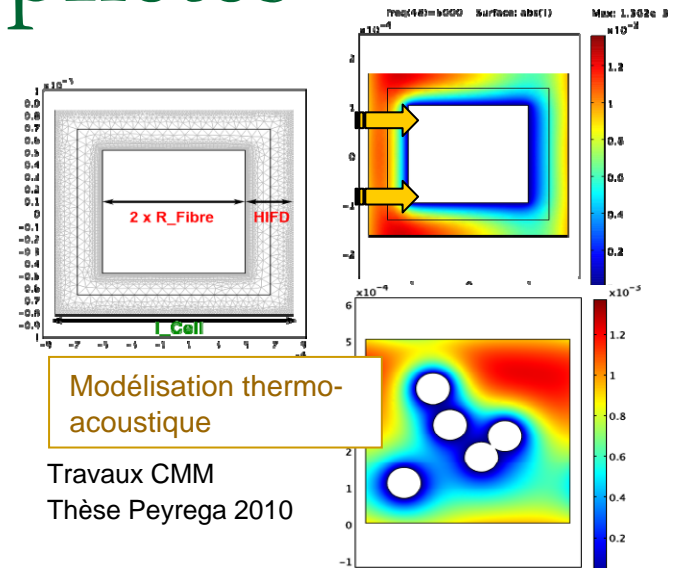
Mesures morphologiques X-Ray



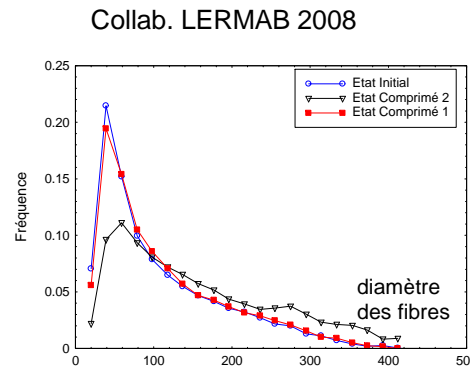
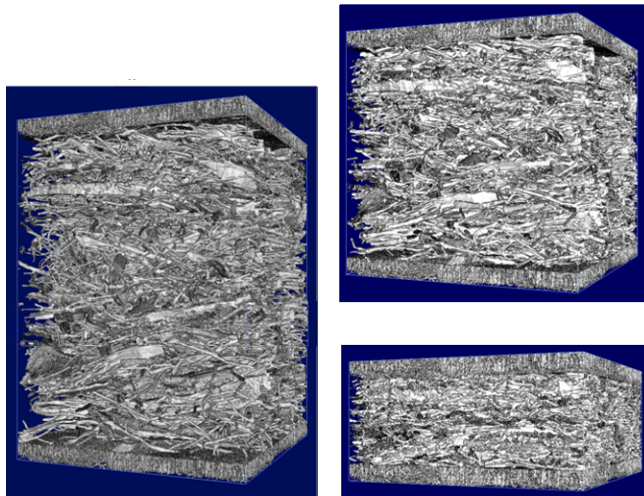
Simulation numérique LEPTIAB

Relations structure - propriétés

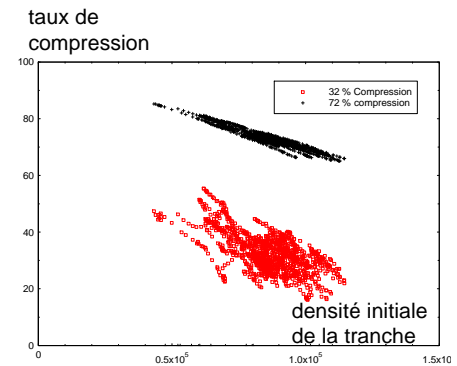
- Morphologie et **propriétés acoustiques**
- Maillage EF des pores - Modélisation thermo-acoustique Comsol Multiphysics
- Mise en évidence des interactions : taille des fibres / fréquence Hz / épaisseur du panneau / recouvrement des couches limites



- Morphologie et **propriétés mécaniques** d'isolants à haute porosité



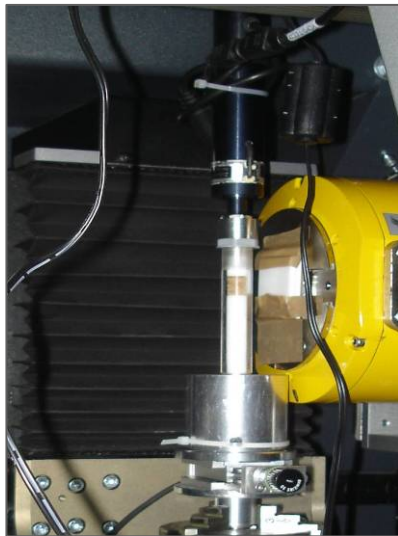
Modifications de structure



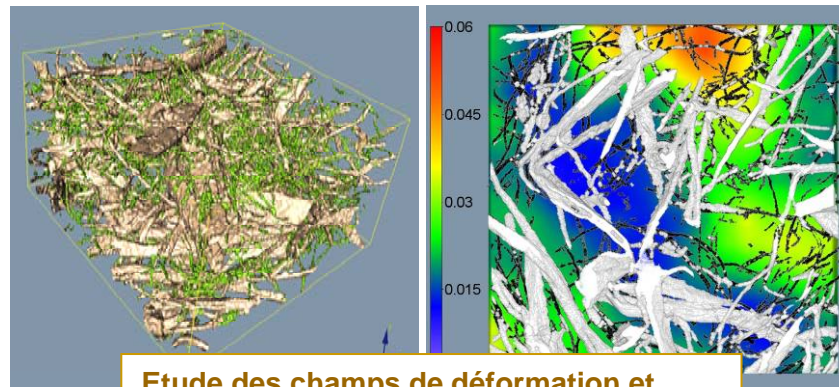
Densification locale

Relations structure - propriétés

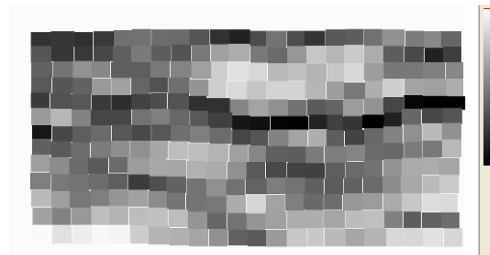
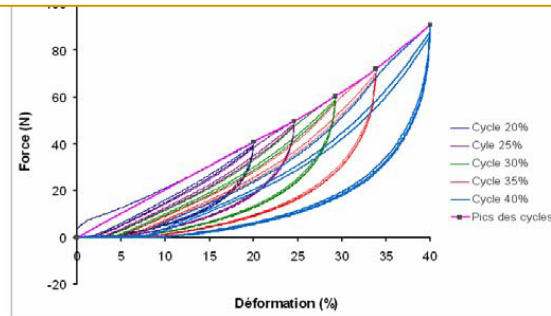
- Suivi 4D de processus d'endommagement, mesures de champs
- . Loi de comportement en compression (Collaboration Inst P'- Axe Pem)



Essais de compression sous imagerie (X, caméra) : micro, 10 mm



Etude des champs de déformation et relations avec la microstructure



Essais de compression sous imagerie (caméra) : macro, 10 cm

Thèse Tran 2009/2012

Relations micro

macro

Conclusions et perspectives

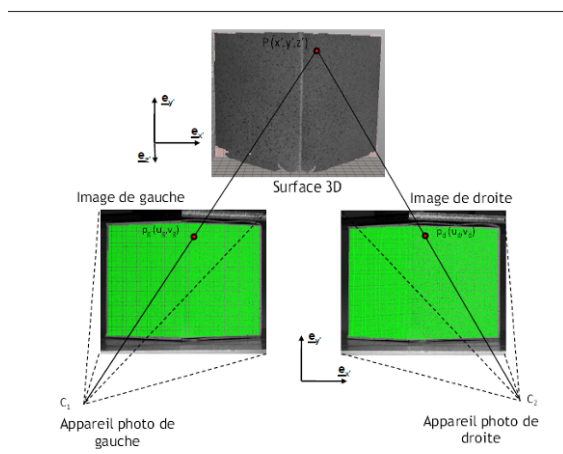
- Caractérisation préliminaire des matériaux et des procédés nécessaire
- Prise en compte de la variabilité aux différentes échelles
- Utilisation et développement d'outils d'imagerie quantitative et de traitement des images performants
- Utilisation et développement d'outils de modélisation et d'optimisation adaptés
- Validation du passage micro /macro (VER)
- Approche d'éco-conception préliminaire (gain en matière, gain en transport : compressibilité)

Conclusions et perspectives

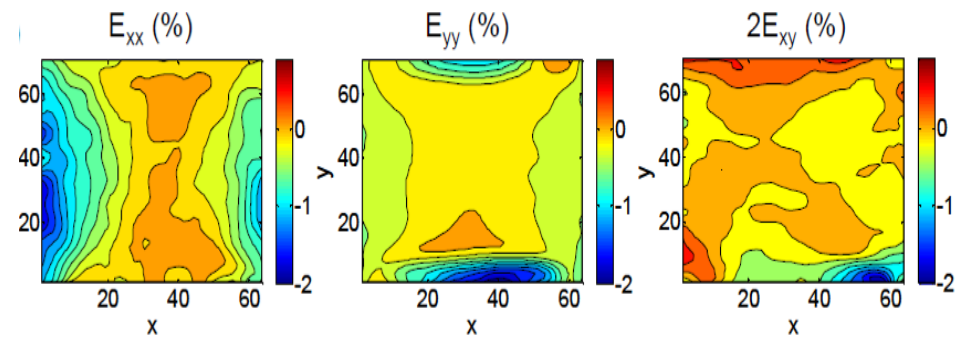
- Amélioration et développement de nouveaux matériaux et / ou procédés :
 - . Développement de nouveaux procédés : assemblages, procédés textiles 3D, ...
 - . Intégration de nouvelles matières premières : colles et résines vertes, fibres longues naturelles, fibres reconstituées (whiskers de cellulose - CANOE)
- Ouverture des méthodes de caractérisation et de modélisation vers les industriels du panneau : EquipEx Xylomat / Xyloplate

Conclusions et perspectives

- **Xylomat** (B. Charrier UPPA) : *amélioration de la compétitivité des entreprises du secteur Panneaux et Composites Bois*
 - . Equipement d'un microtomographe transportable Skyscan
 - . Ingénierie inverse, contrôle de qualité : résolution 10 μm , taille 3 cm.
 - + Cellule de compression et cellule thermique
- **Xyloplate** (J-L. Coureau UBx I2M GCE) : développement d'un plateau de recherche pour analyse de systèmes bois



Collab. R Pommier, JF Dumail (I2M)



Thèse Viguié 2010, INPG