

Essais mécaniques sous microscope

Patrice Marchal¹

Résumé : *Au laboratoire d'étude et de recherche sur le matériau bois (LERMAB) du centre Inra de Nancy, nous avons mis au point une technique d'observation à faible grossissement de la surface d'un petit échantillon de bois soumis à une élongation croissante par paliers.*

Puis, nous avons analysé sa déformation grâce à un logiciel traitant les images prises au cours de l'élongation.

A partir de quelques points caractéristiques se retrouvant sur chaque cliché grâce au recentrage permanent de la zone observée, nous avons analysé la déformation de ce polygone par un logiciel développé au laboratoire.

Mots-clés : bois de réaction, peuplier, traction, microscopie optique, analyse d'images, mesures de contraintes/déformations, module d'Young.

Introduction

Au laboratoire d'étude et de recherche sur le matériau bois (LERMAB) du centre Inra de Nancy, nous avons mis au point une technique d'observation à faible grossissement de la surface d'un petit échantillon de bois soumis à une élongation croissante par paliers.

Dans un premier temps, je présenterai sur quel type de matériel végétal et par quels moyens mécaniques sont effectués les essais. Les échantillons sont prélevés, sur un arbre bien particulier, par dégrossissage suivi d'une préparation soignée par sciage de précision et polissage. Leur élongation est ensuite réalisée par une platine équipée de deux mors de serrage des extrémités de l'échantillon et d'une vis micrométrique assurant la précision du déplacement. Cette platine d'élongation prend place sur la platine du microscope optique à laquelle elle est solidarifiée par deux vis de fixation.

Puis, j'expliquerai quelles informations sont recueillies durant la traction et par quelles méthodes elles sont traitées. Ainsi, un détecteur de force situé à l'opposé de la vis micrométrique permet d'associer telle force à tel déplacement. La zone de l'échantillon observée est photographiée après recentrage et mise au point.

Nous procédons ensuite à une analyse de la déformation infime de l'échantillon par un logiciel traitant les images prises successivement au cours de l'élongation. Nous choisissons ainsi quelques points particuliers présents sur chaque image grâce au recentrage permanent de la zone observée ; puis, nous analysons la déformation de ce polygone avec un logiciel développé au laboratoire.

Enfin, j'envisagerai les perspectives futures ainsi que la modélisation permise par l'exploitation de ces résultats.

¹ INRA - UMR1092 - Études des ressources forêt-bois LERFoB,- Laboratoire d'étude et de recherche sur le matériau bois (LERMAB) F-54042 Nancy ☎ 03 83 39 68 30 ✉ patrice.marchal@nancy-engref.inra.fr

1. Matériel et méthode

1.1 Matériel végétal

1.1.a Origine

Actuellement, les essais effectués au laboratoire portent sur des échantillons de bois d'un jeune peuplier ayant subi une contrainte lors de sa croissance (**photo 1**). Il s'agit d'un clone de Peuplier (*Populus*) âgé d'une dizaine d'années, issu d'une culture *in vitro* réalisée dans l'unité Amélioration, génétique et physiologie forestières du centre Inra d'Orléans. Planté en 1996, il a été incliné artificiellement à partir de 1998 de manière à ce qu'il développe une zone de bois de tension bien définie. Etant donné son faible diamètre et son âge, le bois de cet arbre est majoritairement constitué de bois juvénile.

La découpe du peuplier s'est faite en deux étapes.



Photo 1 © Inra/Carole Assor : *peuplier avec contrainte*

Dans un premier temps, l'arbre a été abattu sur le terrain puis débité en longs tronçons de plus d'un mètre (**photo 2**). Puis, quelques jours plus tard, des rondelles de bois d'environ 5 cm d'épaisseur furent prélevées à différentes hauteurs du tronc de l'arbre à l'aide d'une scie à ruban. Cela avait pour but de se situer à différents niveaux de l'intensité de la contrainte subie par l'arbre au cours de sa croissance.



Photo 2 © Inra/Carole Assor : *découpe de l'arbre*

Lors de ces deux étapes, nous avons veillé à ne jamais laisser sécher les tronçons ou les rondelles de bois car la première série de mesures devait porter sur le bois frais, d'où la nécessité de transporter les tronçons dans des sacs poubelle soigneusement fermés ; puis, de conserver les rondelles au réfrigérateur dans des baquets d'eau.

Ainsi, cet arbre recéla différentes sortes de bois (**photo 3**) :

- **du bois de tension (T)** : ce bois présente de grandes différences avec le bois normal. Il a été produit par l'arbre en réaction à la contrainte qui lui fut infligée lors de sa croissance (bois de réaction). Au niveau anatomique, dans le bois de tension, les vaisseaux sont moins nombreux et de plus faible diamètre que dans le bois opposé et normal. Le pourcentage de fibres est plus important, leur diamètre est plus faible et leurs parois plus épaisses avec un contour très arrondi. Les observations microscopiques ont mis en évidence la présence, au niveau des fibres du bois de tension, d'une couche gélatineuse dite couche G ;
- **du bois opposé (O)** : il s'agit également d'un bois de réaction (compression) apparaissant symétriquement au bois de tension par rapport au cœur de l'arbre ;
- **du bois normal (N)** : son aspect est identique au bois constituant un peuplier du même âge et qui n'aurait pas subi de contrainte. Ce bois se trouve de part et d'autre d'une ligne imaginaire qui relierait le bois de tension et le bois opposé. Cela est très logique car en ces deux zones, la contrainte mécanique subie par l'arbre fut globalement nulle (ni tension, ni compression).



Photo 3 © Inra/Carole Assor : *les trois types de bois*

*Tension : zone claire délimitée à gauche,
Opposé : symétrique à celui de tension,
Normal : à 90° de la ligne T-O.*

1.1.b Préparation des échantillons

La préparation des échantillons se fait en trois étapes de sciage suivies d'une dernière étape de ponçage de l'une des faces de l'échantillon final :

- **sciage de la rondelle de 5 cm d'épaisseur à l'aide d'une scie à ruban**

Il s'agit d'extraire un bloc de bois d'environ 5 cm de largeur dans la rondelle en réalisant deux traits de coupe espacés de 5 cm. Le bloc est ensuite obtenu en le détachant au ciseau à bois au niveau du cœur de la rondelle. Il est assez irrégulier, de dimensions approximatives 5 x 5 x 5 cm.

- **sciage du cube de 5 cm de côté à l'aide d'une tronçonneuse de précision**

Le cube obtenu précédemment est débité en tranches de 5 mm de largeur après enlèvement d'une entame afin d'obtenir une surface lisse et régulière. La largeur de la tranche est très précise du fait de l'utilisation d'une scie circulaire électronique de grande précision : la tronçonneuse Accutom-5 de chez Struers (**photo 4**).

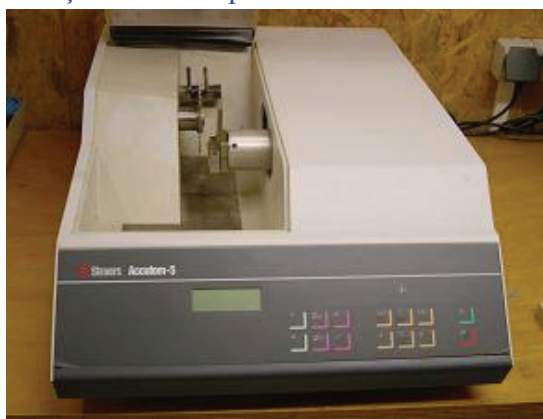


Photo 4 © Inra/ Patrice Marchal : *tronçonneuse Accutom-5*

- **sciage des tranches de 5 mm de largeur**

Les tranches obtenues sont alors découpées en "allumettes" de 2 mm d'épaisseur ; soit toujours avec l'Accutom-5, soit avec une scie à fil diamanté : la scie Well 3241 de chez ESCIL (**photo 5**).



Photo 5 © ESCIL <http://www.materiel-metallograp> :
scie à fil Well 3241

Le choix d'utiliser la tronçonneuse ou la scie à fil est un compromis entre le nombre d'échantillons obtenu et le temps nécessaire pour effectuer les coupes. La tronçonneuse permet une coupe très rapide mais engendre une grosse perte de bois à chaque coupe (2,1 mm), soit l'obtention de six ou sept échantillons pour une tranche. En revanche, la scie à fil nécessite un temps de coupe très long mais n'occasionne quasiment aucune perte de bois (le diamètre du fil étant de 0,3 mm), on peut alors obtenir plus de quinze échantillons dans une tranche soit plus du double de ceux obtenus avec la tronçonneuse.

Un autre avantage de la scie à fil est la quasi-absence de rupture de continuité d'un échantillon à l'autre, on enlève seulement une épaisseur de 0,3 mm ; tandis qu'avec la tronçonneuse, on enlève 2,1 mm soit environ l'épaisseur d'un échantillon brut.

- ponçage des allumettes de 50 x 5 x 2 mm

L'état de surface obtenu à l'issue des coupes à la tronçonneuse ou à la scie à fil, bien que lisse au toucher, est nettement insuffisant pour une observation microscopique. L'image obtenue sur ces échantillons bruts est trop floue pour être exploitable, d'où la nécessité d'un ponçage avec une fine granulométrie de papier (1200).



Photo 6 © Inra/P. Marchal :
polisseuse manuelle



Photo 7 © Inra /Anh Tuan Dinh :
polisseuse manuelle et cale



Photo 8 © Inra/P. Marchal :
cale de ponçage, vue de face



Photo 9 © Inra/P. Marchal :
cale de ponçage, détail rainure

Le ponçage s'effectue à l'aide d'une polisseuse manuelle de chez ESCIL (**photos 6 et 7**), à vitesse variable et à possibilité d'arrosage ; cette fonction est très utile pour les expériences portant sur le bois frais, comme par exemple, les futurs essais mécaniques sur le bois vert.

Il est bien évident qu'un échantillon aussi petit (50 x 5 x 2 mm) ne peut pas être poncé directement en l'appliquant à la main sur la polisseuse. Aussi, une cale de ponçage a été conçue et réalisée par Anh Tuan Dinh, doctorant au LERMAB réalisant une thèse sur le comportement élastique linéaire et non-linéaire.

Cette cale est constituée de deux rectangles de bois superposés reliés par quatre vis et écrous, l'ensemble formant une sorte d'étau (**photos 8 et 9**).

Les vis sont suffisamment longues pour permettre de glisser, entre les deux rectangles de bois, une petite baguette de bois de même largeur que les échantillons (en général 5 mm). Celle-ci est enfoncée à l'intérieur de la cale à une profondeur comprise entre 1,7 et 1,9 mm, l'important étant que la profondeur à chaque extrémité soit identique afin d'obtenir un

échantillon poncé d'épaisseur constante sur toute sa longueur. L'échantillon est ensuite inséré dans cette rainure d'un peu moins de 2 mm de profondeur. Il dépasse donc très légèrement du bord de la cale qu'il suffit alors d'appliquer perpendiculairement à la surface abrasive de la polisseuse afin d'éliminer toute la partie d'échantillon excédant le bord de la cale. On obtient alors l'échantillon définitif d'une épaisseur identique sur toute sa longueur et dont l'un des côtés présente un bon état de surface pour la microscopie optique.

1.2 Méthode

1.2.a Support permettant les contraintes sur l'échantillon (photos 10 et 11)

La platine de traction, avec laquelle nous avons déjà réalisé des tests sur des échantillons d'épicéa (Farruggia, 1998, Farruggia et Perré, 2000), a été conçue et réalisée à l'ENGREF (conception : Patrick Perré ; réalisation : Michel Contal). Elle est constituée d'un châssis formé d'un rectangle en acier aux extrémités duquel ont été fixées d'une part la sonde du détecteur de force et d'autre part, à l'opposé de cette sonde, une vis micrométrique pour un déplacement précis de 20 μm par graduation.

Le châssis est lui-même fixé sur une plaque de plastique rigide dans laquelle ont été pratiquées deux encoches pour fixer la platine sur le microscope optique.

Sur le bloc métallique déplacé par la vis micrométrique ainsi que sur la sonde du détecteur de force (Digital Force Gauge Chatillon de chez Indelco) ont été fixés des supports de mors.

Les deux mors de serrage de l'échantillon sont amovibles et peuvent être retirés facilement de la platine. Cela présente l'avantage d'étudier un nouvel échantillon sans avoir à enlever la platine de traction de la platine du microscope.

La liaison entre les supports de mors et les mors amovibles se fait par un système de deux tiges métalliques, l'une verticale et l'autre horizontale occasionnant un frottement minime en s'effectuant au point de contact de deux cylindres métalliques. Par ailleurs, l'absence de fixation par serrage entre les supports de mors et les mors amovibles laisse l'échantillon libre de s'orienter selon la ligne de force lorsque la traction commence.

Les deux surfaces de serrage des mors amovibles, sur les extrémités de l'échantillon de bois, sont garnies de papier de verre afin de limiter au maximum le glissement de l'échantillon durant la traction.

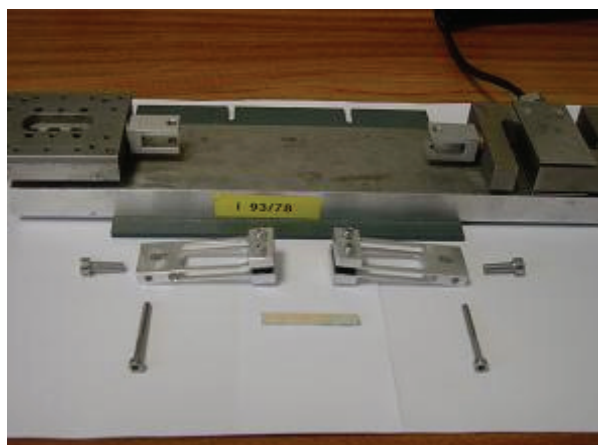


Photo 10 © Inra/ P. Marchal : *platine démontée*

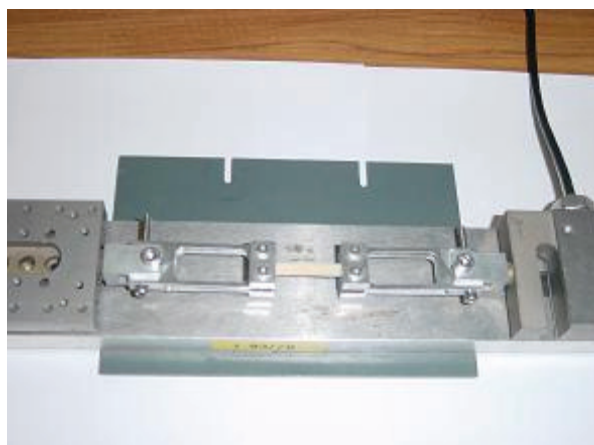


Photo 11 © Inra/ P. Marchal : *platine avec éprouvette*

1.2.b Dispositif d'observation microscopique et de prise d'images_(photos 12 et 13)

La prise d'images de l'échantillon est réalisée grâce à un microscope optique Zeiss Axioplan. Il s'agit d'une observation de surface, on emploie donc comme objectif un Zeiss NEOFLUAR épiplan à grossissement modéré (20 fois).

Les clichés sont obtenus par l'intermédiaire d'une caméra noir et blanc Basler A102f-2 fixée sur la colonne du microscope. La caméra est pilotée par le logiciel BCAM Viewer Version 1.8.0050



Photo 12 © Inra/ P. Marchal : *vue générale*

Photo 13 © Inra/ P. Marchal : *platine sous microscope*

1.2.c Procédure du recueil de résultats

La collecte des résultats est réalisée de manière cyclique selon un motif d'une durée de 20 s :

- à t_0 , l'opérateur N°1 tourne la vis micrométrique d'une graduation et réalise le recentrage sur l'écran grâce aux vis de déplacement en X et en Y de la platine du microscope. Dans le même temps, l'opérateur N°2 refait la mise au point de l'image ;
- à t_{10} , l'opérateur N°1 donne la valeur de déplacement ainsi que la valeur de la force en N à l'opérateur N°2 tandis qu'il note ces deux valeurs sur le cahier de laboratoire. Simultanément, l'opérateur N°2 prend le cliché et donne au fichier image un nom regroupant le déplacement et la force (exemple : 120-56,6 pour 120 μm parcourus depuis le départ et une force lue de 56,6 N) ;
- à t_{20} , on recommence comme à t_0 .

On poursuit la collecte des résultats jusqu'à une force exercée sur l'échantillon de 100 N au maximum ; il arrive parfois que l'échantillon se casse avant d'atteindre cette valeur.

1.2.d Logiciel d'analyse de la déformation de l'échantillon (photos 14 et 15)

La mesure de déformation utilise la méthode de corrélation d'images (Sun *et al.*, 1997 ; Hild, 2003). Pour les mesures de déformation de l'échantillon nous n'utilisons pas un logiciel commercial, mais le logiciel *MeshPore* entièrement développé au LERMAB (Perré, 2005) ; nous utilisons actuellement la version 4, d'avril 2007.

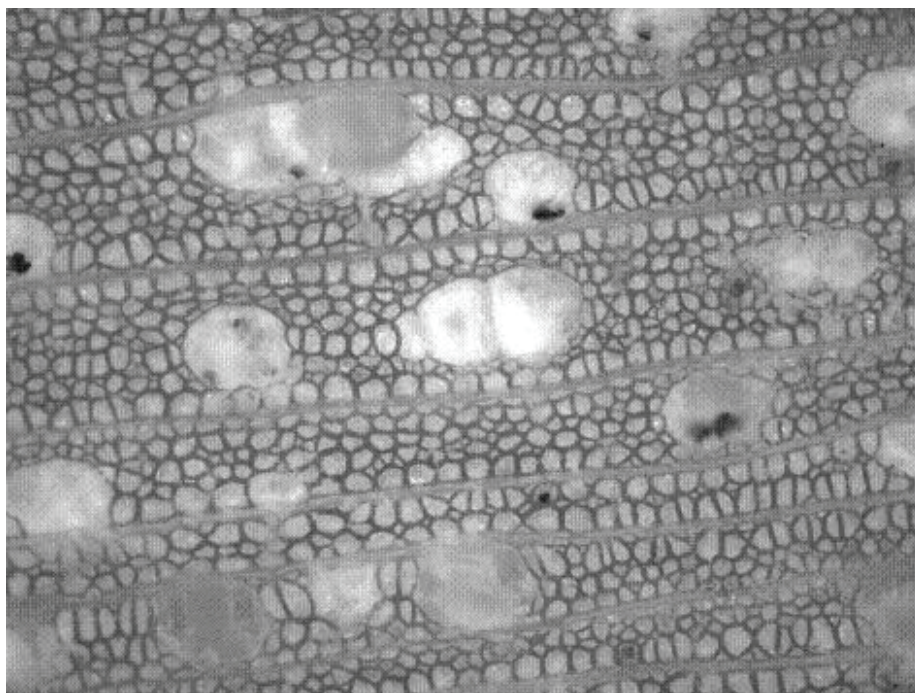


Photo 14 © Inra/Anh Tuan Dinh : *vue microscopique de la surface de l'éprouvette*

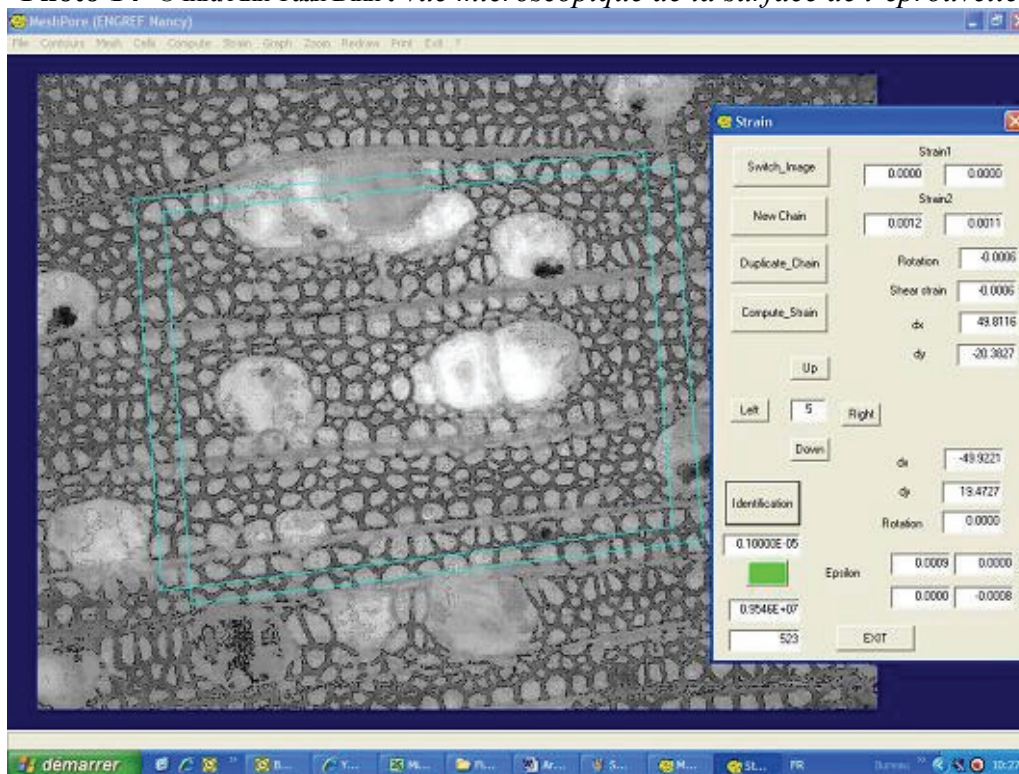
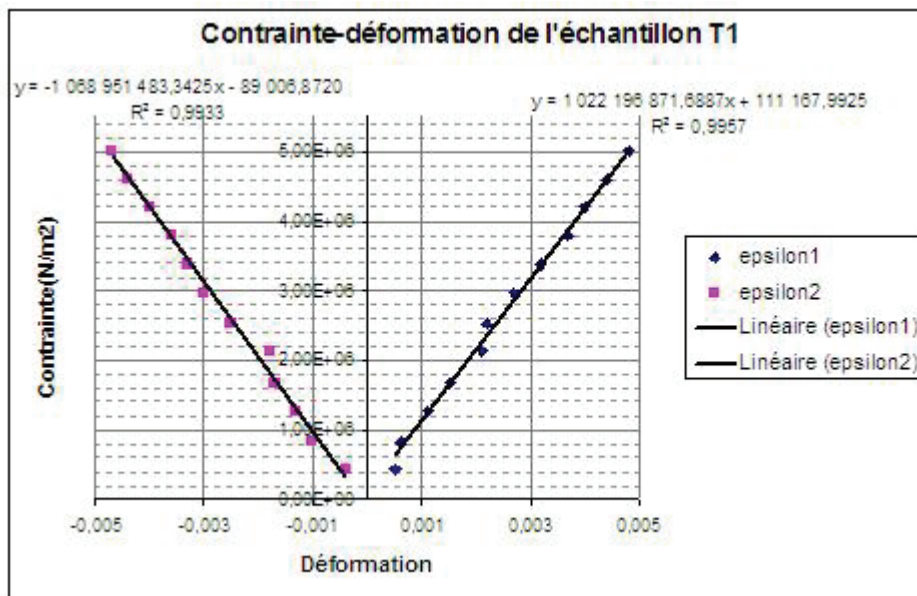


Photo 15 © Inra/ P. Marchal : *images en cours d'analyse avec MeshPore*

D'autre part, le bois étant un matériau hétérogène, en considérant l'échantillon comme une poutre encastrée dans les mors, on constate la variabilité de sa rigidité en fonction de l'endroit où la déformation a été évaluée. L'hétérogénéité est l'une des raisons expliquant la différence du module d'Young entre les différents échantillons.



Graphique 1 : exemple de tracé des droites contrainte = f(déformation)

3. Conclusion et perspectives

3.1 Mesures sur échantillons frais

Nous envisageons de réaliser ces essais pour les échantillons frais car cela est une étape importante à la détermination des caractéristiques mécaniques du bois. Ces résultats pourraient donner une vue précise de l'état vert du bois ; et, en les combinant avec ceux obtenus à l'état sec, nous aurions un bilan complet des caractéristiques mécaniques ainsi que de leur évolution durant le séchage. Cependant, comme nous l'avons décrit précédemment, la réalisation des essais sur bois frais est très délicate à cause du phénomène de fluage. La plus grosse contrainte est la durée de recueil des données à chaque palier de déplacement, l'objectif sera donc de la réduire afin de limiter l'apparition du fluage. Une des possibilités sera l'automatisation du dispositif qui effectuerait à la fois la traction et la prise des clichés en une durée la plus courte possible.

3.2 Comportement en grandes déformations

Nous projetons d'élargir ces essais pour la compression en grandes déformations. Cela consistera à examiner les caractéristiques mécaniques du bois en compression lorsque l'échantillon subit une force importante. Pour l'instant, la plage de déformation étudiée est l'élasticité jusqu'à la plasticité et parfois la rupture. Il y a encore des incertitudes quant à la zone s'étendant de la plasticité à la rupture. Celle-ci pourrait apporter des connaissances intéressantes.

3.3 Modélisation du comportement en grandes déformations

Enfin, il serait intéressant de modéliser la compression en grandes déformations grâce à la méthode MPM (Material Point Method) ; en effet, après avoir recueilli les caractéristiques mécaniques du bois, il sera judicieux de les comparer avec le modèle obtenu grâce à cette nouvelle méthode.

Remerciements : Au LERMAB, je tiens à remercier M. Anh Tuan Dinh, doctorant, ainsi que Mme Carole Assor, chargée de recherche, pour les éléments qu'ils m'ont fournis. Je remercie également M. Patrick Perré, directeur du laboratoire, pour la relecture scientifique de mon document.

Bibliographie

- Hild F. (2003) Mesure de champs de déplacement par corrélation d'images et applications en mécanique des solides ; notes de cours IPSI "Identification du comportement mécanique des matériaux et de la rupture des structures à l'aide de méthodes optiques" ; 82 p.
- Farruggia F. (1998) Détermination du comportement élastique d'un ensemble de fibres de bois à partir de son organisation cellulaire et d'essais mécaniques sous microscope ; thèse de doctorat de l'ENGREF, spécialité "Sciences forestières et du bois" ; 92 p.
- Farruggia F. and Perré P. (2000) Microscopic tensile tests in the transverse plane of earlywood and latewood parts of spruce, *Wood Science and Tech.*, **34**: 65-82
- Perré P. (2005) *MeshPore* : a software able to apply image-based meshing techniques to anisotropic and heterogeneous porous media, *Drying technology Journal*, **23**: 1993-2006
- Sun Z., Lyons J. S. and McNeill S. R. (1997) Measuring Microscopic Deformations with Digital Image Correlation, *Optics and Lasers in Engineering*, **27**: 409-428

