



HAL
open science

Comportement élastique linéaire et non-linéaire du bois en relation avec sa structure

Anh Tuan Dinh

► **To cite this version:**

Anh Tuan Dinh. Comportement élastique linéaire et non-linéaire du bois en relation avec sa structure. Sciences agricoles. AgroParisTech, 2011. Français. NNT : 2011AGPT0066 . pastel-00720245

HAL Id: pastel-00720245

<https://pastel.hal.science/pastel-00720245v1>

Submitted on 24 Jul 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

**L'Institut des Sciences et Industries
du Vivant et de l'Environnement**

(AgroParisTech)

Spécialité : Sciences forestières et du bois

présentée et soutenue publiquement par

Anh Tuan DINH

le 21 Novembre 2011

Comportement élastique linéaire et non-linéaire du bois en relation avec sa structure

Directeur de thèse : **Patrick PERRE**

Jury

M. Laurent BLERON
M. Frédéric DUBOIS
M. Patrick PERRE
M. Xavier FRANK
M. Rémy MARCHAL

Maître de Conférence-HDR, LABOMAP, ENSAM de Cluny
Professeur, 3MSGC, Université de Limoges-IUT du Limousin
Professeur, LGPM, Ecole Centrale de Paris
Chargé de Recherche, UMR IATE, INRA de Montpellier
Professeur, LABOMAP, ENSAM de Cluny

Rapporteur
Rapporteur
Directeur de thèse
Examineur
Examineur

Résumé

Le bois est un matériau complexe, hétérogène et anisotrope. Ses propriétés mécaniques varient fortement en fonction de l'essence et de l'échelle considérées. Pour mieux comprendre le comportement du bois en fonction de sa structure, nous proposons dans le cadre de cette thèse une étude expérimentale à l'échelle des tissus qui est réalisée sur plusieurs types de bois : bois de peuplier, y compris bois de tension et bois d'épicéa. Compte tenu des faibles dimensions des échantillons testés, les mesures de déformation sont effectuées « sans contact » afin de s'assurer de ne pas perturber l'échantillon en cours de l'essai.

Les premières séries de mesures sont réalisées sur les trois zones (tendue, normale, opposée) et selon les 3 directions matérielles (longitudinale, radiale et tangentielle) d'une tige de peuplier inclinée. Les résultats obtenus permettent de comparer des comportements mécaniques du bois de peuplier dans toutes les zones considérées en fonction de ses propriétés microscopiques.

Les deuxièmes séries de mesures sont réalisées en compression, grandes déformations, dans la chambre d'un ESEM (Microscope électronique à balayage environnemental) sur du bois feuillu (peuplier) et sur du bois résineux (épicéa). Grâce aux images obtenues en période d'essai, du domaine élastique jusqu'à la densification, la réponse de chaque type du bois à la même sollicitation est illustrée.

Enfin, une partie de la modélisation numérique par la MPM (Material Point Method) est proposée dans notre projet envisagé comme prolongement de ce travail. Il permettra de simuler le comportement mécanique du bois en grande déformation.

Mots clés : Peuplier, épicéa, couche G, traction, flexion 4-point, compression, grande déformation, MeshPore, ESEM, MPM.

Abstract

Wood is a complex, heterogeneous and anisotropic material. Its mechanical properties are highly variable according to the species and scale considered. In order to better understand the behaviour of wood in relation to its structure, this PhD work proposes an experimental study at the tissue scale. This work is performed on several types of wood: poplar, including tension wood and spruce. Considering the small dimensions of the tested samples, a “non-contact” method is used to limit perturbations, therefore ensuring the measurement precision.

The first series of measurements were realised in the three zones (tension, normal, opposite) and for the three material directions (longitudinal, radial and tangential) of an inclined poplar tree. The results obtained allowed us to compare the mechanical properties of poplar wood in all zones in relation to their microscopic features.

The second series of tests were performed in the chamber of an ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope) on hardwood (poplar) and softwood (spruce). With the images obtained during the test, from the elastic zone to the densification, the response of each type of wood to the same solicitation is presented and commented.

Finally, some numerical modelling by the MPM (Material Point Method) is proposed as prospects of the present work. It will allow the mechanical behaviour of wood in large deformation to be predicted.

Key words: poplar, spruce, G-layer, traction, 4 point bending, compression in large deformation, MeshPore, ESEM, MPM.

Remerciements

Mes premiers mots de reconnaissances vont vers mon directeur de thèse, Monsieur Patrick PERRE. Je le remercie de m'avoir accueilli au sein de l'équipe Bois-Biomatériaux-Biomasse, de me donner la chance de faire la partie du monde de recherche, de m'avoir encadré tout au long de ma recherche et de m'avoir fait part de ses conseils avisés. Le temps de recherche me restera sûrement inoubliable avec des savoirs-faires que j'avais pu apprendre au niveau professionnel ainsi qu'au niveau humain.

A mes rapporteurs, Messieurs Laurent BLERON et Frédéric DUBOIS qui ont accepté la lourde tâche de rapporteurs ainsi qu'aux autres membres du jury, Messieurs Rémy MARCHAL et Xavier FRANK, je voulais adresser ma profonde reconnaissance pour avoir accepté de consacrer leur temps à l'examen de ce travail. Si la soutenance de thèse est une épreuve réputée difficile, ils ont tout fait pour assurer son déroulement. Cette journée restera un excellent souvenir.

Rattaché à l'équipe Bois-Biomatériaux-Biomasse du Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois de l'AgroParisTech Nancy, j'ai pu apprécier la sympathie de tous ses membres. Un grand merci donc à Madame Meriem FOURNIER, directrice du LERFoB qui m'a beaucoup supporté et encouragé notamment dans les derniers temps de ma thèse, à Madame Françoise HUBER pour ses conseils pertinents en anatomie bois, à Xavier pour la méthode de la MPM, à Corinne pour ses excellentes préparations toujours « à distance », à Romain et à Giana pour leurs conseils approfondis dans le monde du bois, à Philippe, à Patrice, à Michel et à Jean-Claude pour leurs préparations de dispositifs expérimentaux. Je n'oublierai pas non plus tous les autres doctorants avec lesquels j'ai pu faire un bout du chemin : Vincent, Aristide, Saloua, Naoual, Bakary, Mariella, Julien, Florian, Pierre. Ainsi, j'adresse à eux tous un grand merci pour la correction française, une partie par chacun d'entre eux, que j'ai eu la chance d'en profiter, en tant qu'étudiant étranger.

Le temps de travail en tant qu'ATER à l'ENSAM de Cluny m'a donné la chance d'accéder à un autre centre de recherche du bois. Un merci particulier à eux tous, mes amis de l'équipe Matériaux et Usinage Bois, qui ont consacré leur temps pour m'aider à finaliser la rédaction de cette thèse. Ainsi, je n'oublie jamais les « cours particuliers » de la MMC avec Michel, je l'en remercie.

Je ne peux clôturer ces remerciements sans adresser un immense merci à mes parents qui m'ont soutenu dans ce parcours. Merci Hoang-Minh, mon copain, qui m'a supporté et encouragé dans tous les moments les plus difficiles tout au long de ma thèse. Enfin, je tiens rendre hommage à Thanh-Hien, ma copine, qui devait trop souvent supporter la conséquence de mes stressés, pendant que je rédigeais « juste cette dernière partie », à celle à qui j'ai égoïstement saboté pas mal de soirée, week-end et autres vacances. L'achèvement de cette thèse ouvre un nouveau chapitre de notre vie à deux.

A mes parents

DINH Thuc Hoan, et
NGUYEN Thi Hong Nga

Table des matières

Chapitre 1 Bibliographie	14
I. Généralité de l'anatomie du bois	14
1. Structure macroscopique.....	14
a. Formation du bois	14
i. Accroissement du bois	14
ii. Plan ligneux.....	15
iii. La variabilité du bois	16
b. Bois des résineux	17
c. Bois des feuillus.....	19
2. Ultra structure.....	21
a. Constitution de la paroi cellulaire.....	21
b. Composition chimique de la paroi cellulaire.....	23
c. Bois de réaction	24
i. Bois de compression	24
ii. Bois de tension	25
II. Comportement mécanique du bois	27
1. Comportement élastique	27
a. Influence de la température	27
b. Influence de l'humidité	29
c. Influence de la densité.....	31
2. Domaine plastique- mécanismes de rupture	32
3. Comportement viscoélastique	33
a. Condition constante du climat	33
b. Condition variable du climat	34
c. Modèle Kelvin Voigt - Modèle Maxwell.....	35
i. Modèle Kelvin Voigt	35
ii. Modèle Maxwell.....	35
4. Anisotropie et hétérogénéité.....	36
a. Anisotropie	36
b. Hétérogénéité.....	38
i. A l'échelle de l'arbre	38
ii. A l'échelle des tissus.....	38
III. Relations entre structure et comportement mécanique du bois.....	40
1. Echelle des tissus - Agencement cellulaire du bois dans le plan transversal.....	40
a. Résultats expérimentaux.....	40
b. Structure en nid d'abeille	41
2. Echelle de la paroi	43
a. Modélisation de la forme de cellule.....	43
i. Cellule symétrique	43
ii. Cellule antisymétrique	45
b. Couche G dans le bois de tension.....	48
3. Echelle des macromolécules - Cellulose cristalline	50
a. Structure cristalline et amorphe de la cellulose	50
b. Conversion de la cellulose cristalline	51
c. Cellulose type I : I_α et I_β	51
IV. Conclusion	53
Chapitre 2 Méthodes et matériels.....	54
I. Méthode.....	54

1. Mesure du Module d'Young dans la direction longitudinale du peuplier – Micro flexion 4 points.....	54
a. Principe de la flexion 4 points	54
b. Protocole expérimental	57
c. Choix de la géométrie des échantillons.....	58
d. L'infra –densité et la masse volumique des échantillons.....	58
i. Généralités.....	58
ii. La mesure de l'infra-densité pour ces séries d'essais.....	60
2. Mesure du Module d'Young de traction dans le plan transversal sous microscope optique	60
a. Préparation des outils	60
i. Microscope optique.....	60
ii. Protocole de réalisation de l'essai	61
b. Choix de la géométrie des échantillons dans la direction radiale – mors de serrage	62
c. Choix de la géométrie des échantillons dans la direction tangentielle – mors de collage	63
d. Protocole expérimental	64
i. Test du fonctionnement du mors de serrage.....	64
ii. Test du fonctionnement du mors de collage.....	66
e. Mesure de l'infra-densité des échantillons	67
f. Calcul de la déformation de l'échantillon par la méthode de corrélation d'image ...	67
i. Introduction	67
ii. Principe de la corrélation d'images	67
iii. Logiciel <i>MeshPore</i> – Principe et mode d'emploi.....	69
3. Essai de compression en grandes déformations sous le microscope électronique	70
a. Microscope électronique à balayage environnemental	70
b. Platine de compression.....	72
i. Calibration de la platine de traction- compression	73
ii. Calibration des capteurs de force.....	74
c. Détermination de l'effet du bâti.....	75
d. Mesure de la densité et de l'infra-densité des échantillons.....	76
II. Matériel végétal	77
1. Généralités.....	77
2. Usinage des micro-éprouvettes	77
a. Essai de flexion quatre points	77
i. Zones d'échantillonnage	77
ii. Usinage.....	77
b. Essai de traction simple.....	79
i. Zone d'échantillonnage	79
ii. Usinage.....	79
c. Essai de compression	80
i. Rondelle d'épicéa	81
ii. Rondelle de peuplier	82
iii. Prélèvement et préparation des échantillons	82
III. Conclusion	83
Chapitre 3 Caractérisation mécanique du bois de peuplier à l'échelle des tissus (bois normal, de réaction et opposé).....	84
I. Essais de flexion quatre points du peuplier dans la direction longitudinale.....	84
1. Matériel végétal.....	84
2. Tests de flexion 4-points.....	86

a. Essais sur bois saturé.....	86
b. Essais sur bois sec.....	88
3. Essais définitifs en flexion longitudinale.....	89
a. Essais sur échantillons humides.....	89
b. Essais sur échantillons secs à l'air.....	89
II. Essais de traction dans le plan transverse	92
1. Matériel végétal.....	92
2. Test de traction dans le plan transversal	92
3. Essais définitifs dans le plan transversal.....	94
a. Essai de traction simple du peuplier de tension selon la direction radiale	94
b. Essai de traction simple du peuplier de tension selon la direction tangentielle	95
III. Résultats des essais mécaniques dans les trois directions du peuplier de tension.....	96
1. Essai de flexion quatre points dans la direction longitudinale	96
a. Echantillon humide	96
b. Echantillon sec à l'air.....	97
2. Essai de traction simple dans le plan transversal	97
3. Résultats et discussions.....	98
IV. Conclusion	100
Chapitre 4 Essai de compression en grande déformation sous microscope électronique à balayage environnemental (ESEM)	101
I. Essais de compression sous microscope optique	101
II. Test du fonctionnement de la platine de compression et du microscope.....	103
a. Mesure de l'humidité au cours d'essai.....	103
b. Essai de test	104
III. Résultats des essais de compression en grande déformation sous ESEM	107
1. Essai de compression sur l'épicéa	107
a. Compression radiale.....	107
b. Compression tangentielle	109
2. Essai de compression sur le peuplier	111
a. Compression radiale.....	111
b. Compression tangentielle	113
3. Résultats et discussions.....	116
IV. Conclusion	119
ANNEXE 1	126
ANNEXE 2.....	140

Introduction

Issu de l'activité biologique de l'arbre, le bois est un matériau complexe avec la présence des vaisseaux, des cellules, des rayons ligneux, des canaux résinifères, etc. Il présente une forte hétérogénéité que l'on retrouve à différentes échelles d'observation :

- Le tronc : l'échelle de la structure (1 m)
- « Le bois sain » (sans défaut) : l'échelle macroscopique (10 cm)
- Les cernes : l'échelle mésoscopique (1 à 10 mm)
- Les cellules (0.1 mm)
- Les parois cellulaires : l'échelle microscopique (1 μm)
- Les composés du bois : l'échelle nanoscopique (1 nm)

Pour connaître la structure du bois, il est commode de l'examiner selon les trois directions longitudinale (axiale), radiale et tangentielle. Ce sont les directions d'anisotropie du bois pour un grand nombre de ses propriétés physiques, mécaniques et technologiques [Keller, 1994].

Par ailleurs, il est indispensable de noter que le bois est aussi un matériau anisotrope. Le comportement mécanique du bois selon chaque direction, notamment selon les directions transverses, dépend de la position étudiée ; il y a une forte différence entre le bois de printemps et le bois d'été, entre l'aubier et le duramen, etc. dans une même direction.

Pour toutes ces raisons, le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans la démarche de compréhension des propriétés macroscopiques du matériau bois à partir de sa microstructure. Notre étude se place à l'échelle des tissus où les différents éléments anatomiques peuvent être observés à l'aide d'un microscope optique ou/et d'un microscope électronique à balayage environnemental (ESEM).

Le comportement (déformation et rupture) du bois dans le domaine élastique et en grande déformation peut être expliqué par sa structure cellulaire anisotrope. Afin d'obtenir les observations les plus précises possibles, nous étudions le comportement du bois des résineux et du bois des feuillus dont la variabilité s'explique par des agencements cellulaires différents. Ainsi, nous nous intéresserons au bois de tension dont les propriétés mécaniques sont influencées par la présence de la couche G.

Le premier chapitre sera consacré au comportement mécanique du bois en s'appuyant sur une étude bibliographique. Après un rappel des connaissances de base sur le matériau bois, destiné aux non-spécialistes, nous regarderons la relation entre structure et comportement mécanique du bois à l'échelle des tissus ainsi qu'à l'échelle de la paroi.

Les protocoles expérimentaux réalisés sur des échantillons de petite taille qui ont servi à déterminer les propriétés mécaniques du bois seront illustrés dans le deuxième chapitre. Après un rappel sur le principe de la flexion quatre points ainsi que la méthode de corrélation d'images en utilisant le logiciel *MeshPore*, développé par P. Perré, nous présenterons des dispositifs expérimentaux conçus et/ou développés au sein du laboratoire et leur mode d'emploi afin d'obtenir des résultats expérimentaux optimaux.

Ainsi, les deux derniers chapitres seront consacrés à la caractérisation des propriétés élastiques et non élastiques du bois.

Le travail présenté au troisième chapitre est restreint au peuplier provenant d'un arbre incliné en comparant les propriétés du bois de tension avec celles du bois normal et du bois opposé à

l'échelle des tissus selon les trois directions principales du bois. Nous cherchons dans cette partie l'effet de la couche G qui influe sur les propriétés mécaniques du bois de tension, notamment dans la direction longitudinale.

Dans le quatrième chapitre, nous nous intéresserons à la nature de la rupture (ductile ou fragile) au niveau des cellules. Des essais de compression en grande déformation sur du bois d'épicéa et de peuplier seront réalisés afin de mettre en évidence le rôle de l'agencement cellulaire lors d'une sollicitation dans le plan transverse.

Chapitre 1 Bibliographie

I. Généralité de l'anatomie du bois

1. Structure macroscopique

a. Formation du bois

i. Accroissement du bois

L'accroissement annuel du bois est formé par l'activité cambiale qui fonctionne sur les deux faces : la face interne qui va donner le bois et la face externe qui va donner le liber. Dans le sens radial, la constitution du bois, ce qu'on peut les regarder facilement au niveau macroscopique, est illustrée à la Figure 1.1

De l'extérieur à l'intérieur, on peut les distinguer :

- Ecorce externe inerte (suber) et écorce interne vivante (liber)
- Cambium (Assise génératrice libéro-ligneuse)
- Aubier : Bois fonctionnel
- Duramen : Bois parfait duraminisé
- Moelle

Notons que l'accroissement annuel du bois dans les zones tempérées est bien différent de celui dans les zones tropicales ou équatoriales. Chez les espèces tempérées, l'arrêt du fonctionnement du cambium se traduit par l'apparition de limites entre les divers accroissements annuels (limite de cerne), bien visibles chez les résineux et les feuillus à zone initiale poreuse. Elle est plus discrète chez les feuillus à pore diffus. Les bois tropicaux ne présentent pas de limites de cerne.

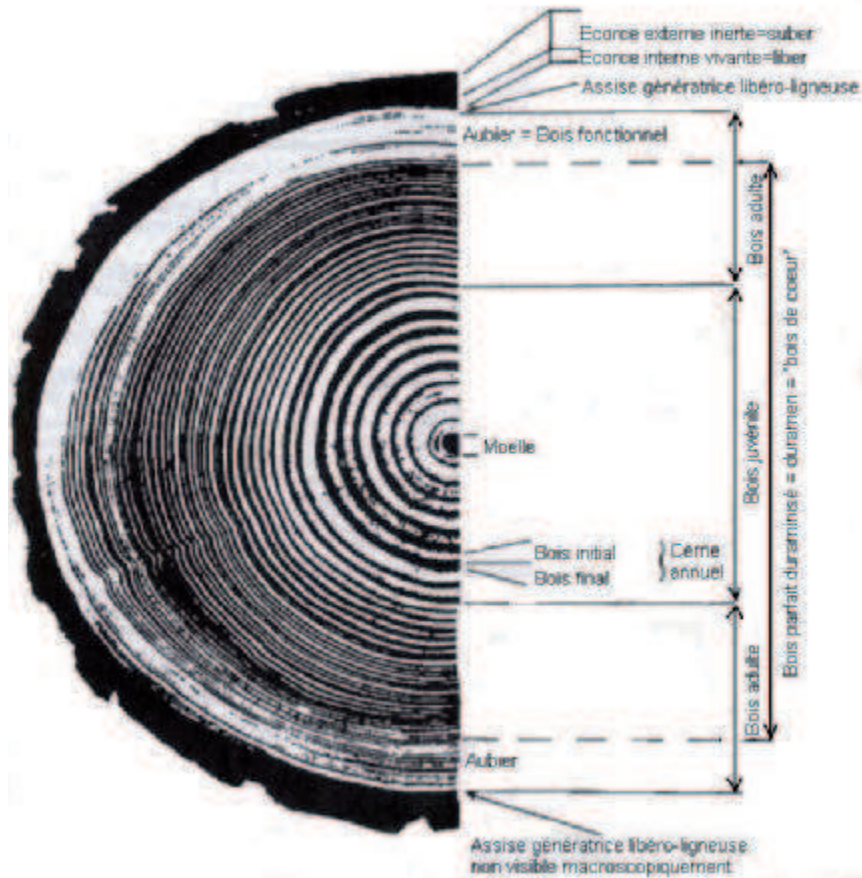


Figure 1.1 : Coupe transversale d'une tige de douglas faisant apparaître diverses zones caractéristiques du bois et de l'écorce [Grosser, 1977 dans Keller, 1994]

La croissance en diamètre du tronc et des branches de l'arbre est liée à la formation de bois ou xylème secondaire qui joue trois rôles dans l'arbre :

- Un rôle mécanique permettant le soutien du houppier, et le maintien de l'arbre en position verticale ;
- Un rôle physiologique puisqu'il permet la circulation de la sève brute, c'est-à-dire le transfert des éléments minéraux vers les éléments chlorophylliens ;
- Un rôle dans la nutrition puisqu'il stocke les éléments qui seront ainsi à la disposition de l'arbre et seront mobilisés dès que nécessaire.

ii. Plan ligneux

Pour mieux comprendre la structure du bois, il est nécessaire de l'examiner dans les trois plans orthogonaux: coupe transversale perpendiculaire à l'axe de la tige ; coupe radiale dans un plan passant par la moelle ; coupe tangentielle dans un plan excentré et parallèle à l'axe de la tige. Les trois directions axiale, radiale et tangentielle sont les directions d'anisotropie du bois pour un grand nombre de ses propriétés physiques, mécaniques et technologiques (Figure 1.2).

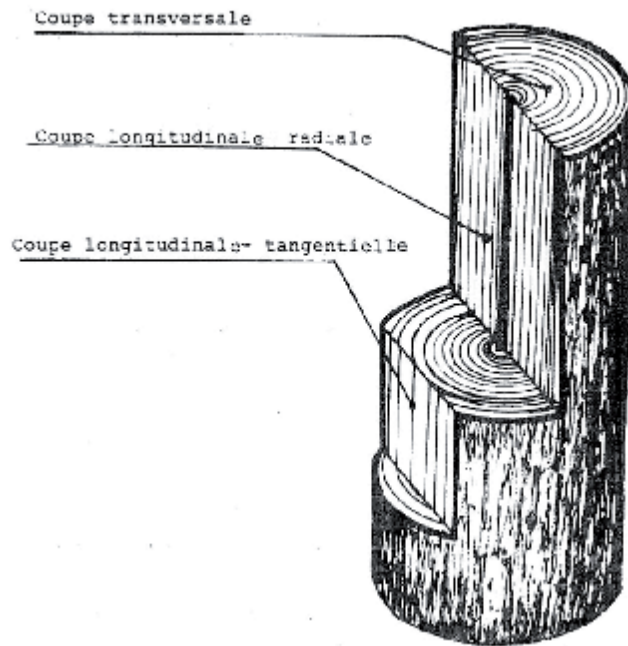


Figure 1.2: Illustration des plans de coupe d'observation du plan ligneux [Guitard, 1987]

Le plan ligneux permet de reconnaître un bois, c'est un caractère systématique. Son étude conduit à la description des bois, à leur connaissance, à l'appréciation de leurs caractéristiques et permet de préciser les relations entre l'anatomie et les caractéristiques de ce matériau :

- le plan de coupe transversal révèle, à l'intérieur du cerne, les sections des cellules ligneuses orientées majoritairement suivant l'axe du tronc. On examine ainsi la mise en place des cellules du bois (les couches, les sous-couches etc.) à l'échelle de quelques dizaines de micromètres.
- le plan de coupe longitudinal-tangentiel : révèle les sections droites des rayons ligneux aux arrangements cellulaires multiformes : ils peuvent contenir des canaux, ils assurent la conduction radiale des fluides et peuvent contenir des réserves. D'après Guitard [1987], grâce à cette coupe, on trouve que les feuillus ont des longueurs de fibres comprises entre 0.8 mm et 3 mm alors que les trachéides des résineux sont plus longues de 2 mm à 7mm.
- le plan de coupe longitudinal-radial : permet d'observer les sections des rayons ligneux suivant l'axe radial ainsi que les zones de croissance entre eux et les alignements de cellules longitudinales.

iii. La variabilité du bois

Le bois est composé par de nombreux types de cellules qui sont formés lors du développement de l'arbre. La formation du bois est influée par la génétique. En plus, les conditions environnementales comme l'eau, la température, le vent, les produits chimiques dans le sol influencent les caractéristiques du matériau dans toute la vie de l'arbre.

Il y a d'énormes variations dans les propriétés du bois entre les arbres d'une même espèce et entre les génotypes au sein des espèces. Même dans chaque arbre individuel, les caractéristiques physiques, chimiques et anatomiques du bois peuvent être différentes, elles dépendent de la position du bois dans l'arbre et du moment où le bois s'est formé. Les connaissances de ces différences sont importantes pour l'utilisation finale du matériau. La variation dans l'arbre se présente dans toutes les parties du bois, bois juvénile et bois adulte,

bois de printemps (bois initial) et bois d'été (bois final) etc. et dans le bois de réaction [Sheng Du, 2007].

b. Bois des résineux

L'organisation du bois des résineux est relativement simple, uniforme et régulière. Leur plan ligneux est simplement constitué de trachéides et de cellules de parenchymes. Les trachéides longitudinales constituent environ 90% de l'ensemble des cellules du bois des résineux ; leurs longueurs sont de 1mm à 8mm ; leurs sections sont presque carrées ou rectangulaires, leurs dimensions sont de l'ordre de 25 μm à 75 μm [Keller, 1994].

En direction transversale, il y a une diminution de la dimension radiale de la cellule selon le sens du bois initial au bois final. Par contre, il y a une augmentation de l'épaisseur des parois dans le même sens. Il existe des ponctuations aréolées dans les trachéides du bois des résineux. Leurs faces radiales en portent de nombreuses mais peu sont présentes dans leurs faces tangentielles. Ces ponctuations permettent des échanges de cellules à cellules (Figure 1.3).

Dans le plan transversal, à l'œil nu, on peut observer des rayons ligneux de la moelle à l'écorce. Ils sont issus des initiales isodiamétriques, ils constituent des bandes radiales et continues. Ils ont un rôle de conduction radiale et d'accumulation de réserve. D'un point de vue mécanique, ils contribuent à augmenter la résistance mécanique du bois selon la direction radiale.

Un bloc du bois des résineux (pin) est présenté ci-dessous (Figure 1.3) pour illustrer ce plan ligneux :

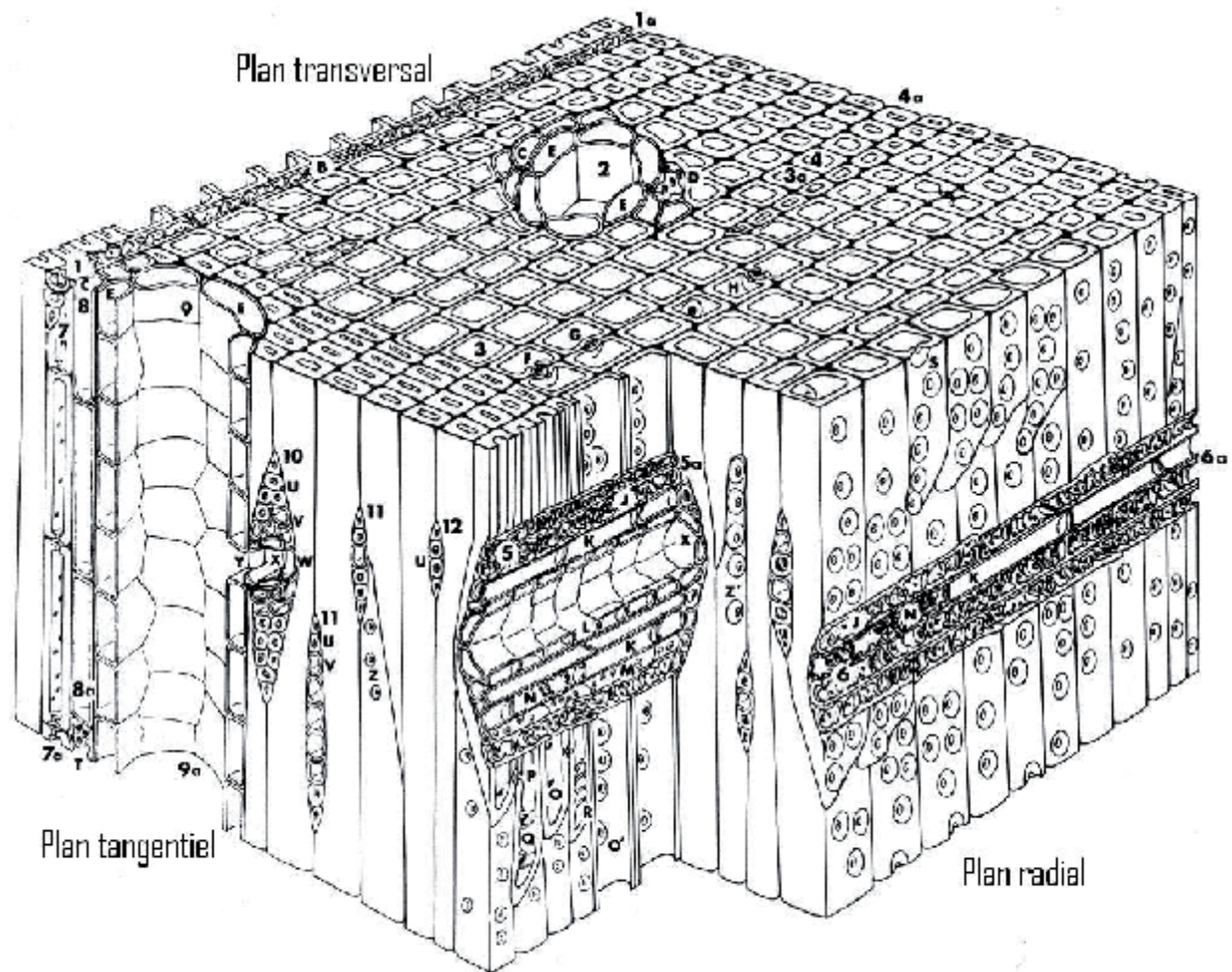


Figure 1.3 : Diagramme schématique d'un bloc de bois de pin [Howard et Manwiller, 1969 cité dans Siau, 1995]

Plan transversal : 1-1a rayon ligneux ; B trachéide transversale ; 2 canal résinifère ; C parenchyme longitudinale à paroi mince ; E cellule épithéliale ; 3-3a trachéide de bois de printemps ; F ponctuation aréolée radiale coupée au niveau du torus ; G ponctuation aréolée coupée en dessous de l'ouverture de la ponctuation ; H ponctuation aréolée tangentielle ; 4-4a trachéides de bois final.

Plan radial : 5-5a rayon ligneux hétérogène ; J trachéide transversale ; K parenchyme à paroi mince ; L cellule épithéliale ; M trachéide transversale non coupée ; N parenchyme à paroi épaisse ; O ponctuation aréolée radiale de trachéide de bois final ; O' ponctuation aréolée radiale de bois final ; P ponctuation aréolée tangentielle ; Q épaississement callitroïdes ; R épaississement spiralé ; S ponctuation aréolée radiale ; 6-6a rayon ligneux hétérogène.

Plan tangentiel : 7-7a trachéide cloisonnée mixte ; 8-8a parenchyme longitudinale à paroi mince ; T parenchyme à paroi épaisse ; 9-9a canal résinifère longitudinal ; 10 rayon ligneux hétérogène ; U trachéide radiale ; V parenchyme de rayon ligneux ; W cellules épithéliales horizontales ; X canal résinifère horizontal ; Y anastomose entre canaux résinifères radial et longitudinal ; 11 rayon unisériel hétérogène ; 12 rayon unisériel homogène ; Z petite ponctuation aréolée tangentielle de bois final ; Z' grosse ponctuation aréolée de bois final [Keller, 1994]

Bois d'épicéa

Le bois d'épicéa possède des zones d'accroissement très apparentes, grâce à une zone finale bien différenciée. La largeur de cerne est très variable suivant sa provenance et son traitement. Les arbres en forêts naturelles ou en haute montagne ont des cernes plus fins et des propriétés mécaniques plus élevées qu'en plantation dans des fonds de vallées à sol riche. Là bas, la

largeur de cerne peut atteindre 10 mm et le bois présente des propriétés mécaniques très faibles [Venet, 1986].

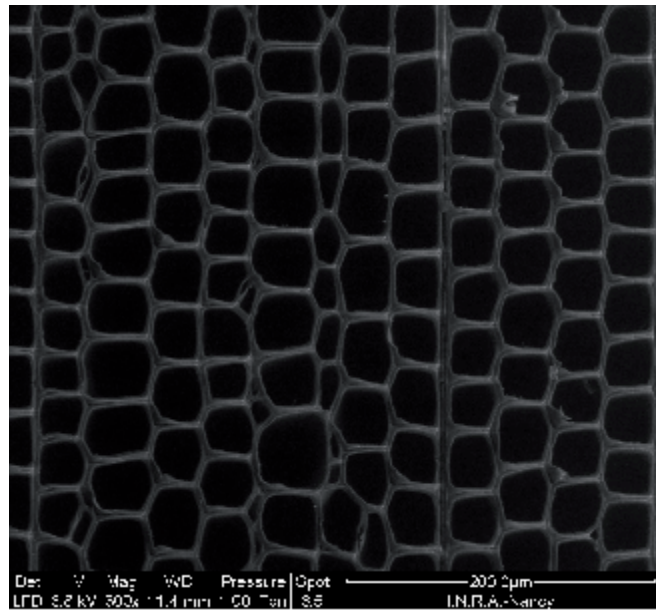


Figure 1.4 : Bois d'épicéa sous microscope électronique à balayage

On peut trouver facilement dans les littératures des auteurs qui ont illustré le comportement mécanique de l'épicéa par des paramètres mécaniques intrinsèques [Guitard, 1987 ; Hapca, 2004]. Le Tableau 1.1 présente les complaisances mécaniques principales de quelques essences d'épicéa.

Noms spécifiques communs	H	ρ	E_R	E_T	E_L	G_{RT}	G_{TL}	G_{RL}
	%	g/cm^3	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2
Picea engelmann	12.8	0.36	649	348	10700	41	438	533
Picea sitchensis sitka	12	0.39	920	510	11800	40	730	760
Picea Sp	9.8	0.44	700	400	16200	40	780	630
Picea Sp	12	0.43	910	490	13800	30	710	730

Tableau 1.1 : Complaisances mécaniques de certaines essences de l'épicéa (de Guitard, 1987)]

c. Bois des feuillus

Le bois des feuillus est plus évolué et il présente dans sa structure une diversité plus grande que celle du bois des résineux. Par exemple, chez les résineux, les trachéides longitudinales jouent les deux rôles de soutien et de conduction alors que chez les feuillus, les trachéides n'assurent que la fonction de conduction, le soutien étant assuré par un autre types de cellules qui s'appellent les fibres.

Selon la disposition des vaisseaux (pores) dans les accroissements annuels, on peut classer le bois des feuillus en 3 groupes principaux [Keller, 1994] :

- Bois à zone initiale poreuse (le chêne, le frêne etc.) : Les vaisseaux dans le bois initial ont un diamètre beaucoup plus grand que celui du bois final ;
- Bois à pores diffus (le peuplier, le hêtre etc.) : Le diamètre des vaisseaux est presque le même dans tout l'accroissement annuel. Les vaisseaux sont répartis assez uniformément dans la masse du bois. Ils peuvent être isolés ou groupés en files ou petite plage ;

- Bois à zone semi poreuse (le noyer, le peuplier etc.) : Les vaisseaux ont des diamètres identiques dans tout l'accroissement annuel. Ils ont tendance à être plus abondants dans le bois initial où ils constituent une ou plusieurs lignes de pores disposées tangentiellement. La proportion des vaisseaux varie généralement de 5% à 30% mais pour la plupart des espèces, elle est comprise entre 10% et 20%.

Un bloc du bois des feuillus (hêtre) est présenté au-dessous (Figure 1.5) pour illustrer ce plan ligneux :

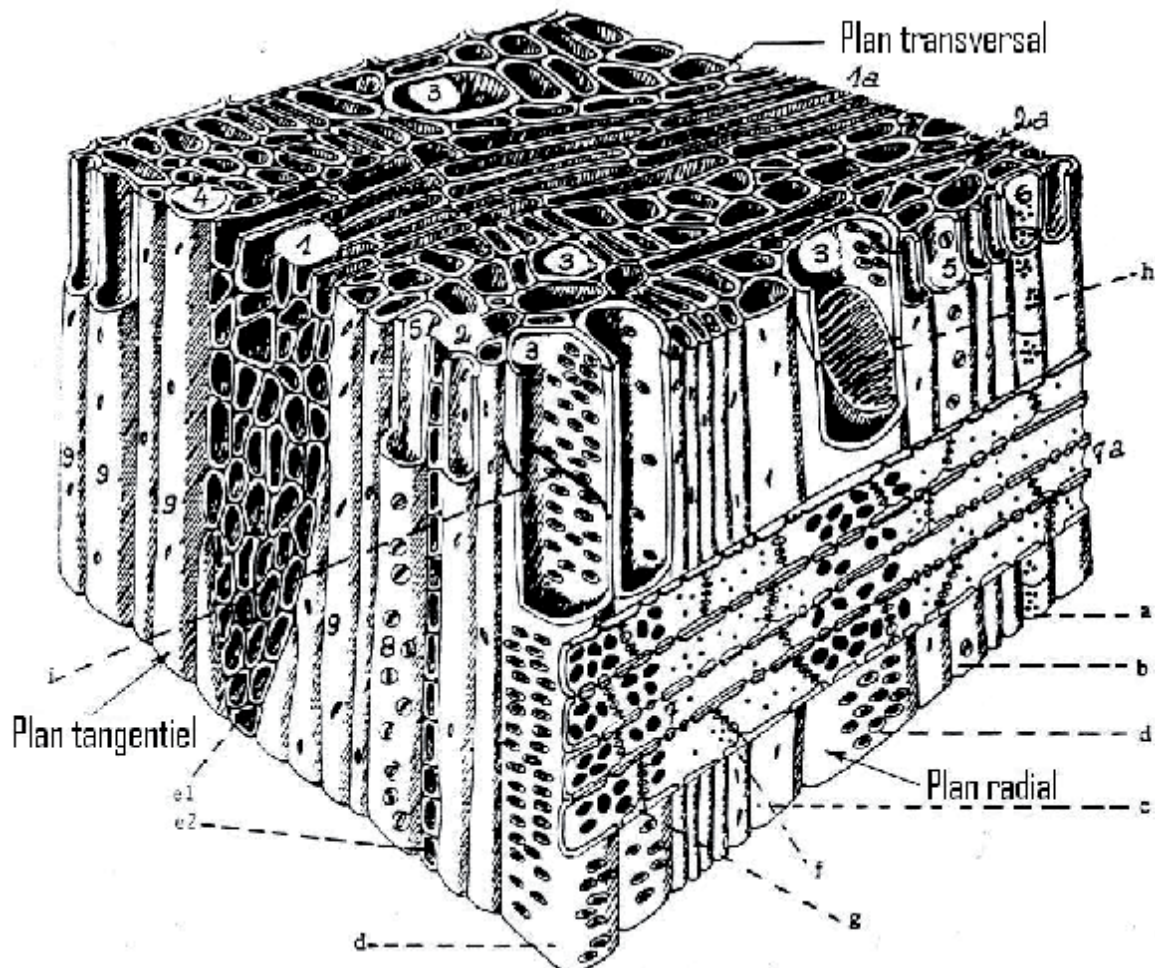


Figure 1.5 : Diagramme schématisique d'un bloc de bois de hêtre [Jacquiot, Trenard et Dirol, 1973 cité dans Keller, 1994]

Plan transversal : 1-1a rayon ligneux multisérié ; 2-2a rayon ligneux unisérié ; 3 vaisseau ; 4 fibre simpliciponctuée (libriforme) ; 5 fibre- trachéide ; 6 parenchyme longitudinal.

Plan radial : 7-7a rayon ligneux unisérié ; a parenchyme longitudinal ; b fibre trachéide ; c fibre simpliciponctuée ; d vaisseau avec ponctuations latérales aréolées intervasculaires ; f ponctuations simples entre parenchyme de rayon ligneux et fibre simpliciponctuée ; g ponctuations simples de champ de croisement entre parenchyme de rayon ligneux et élément de vaisseau ; h perforation en grille (scalariforme) ; i perforation unique

Plan tangentiel : e1 rayon ligneux multisérié ; e2 rayon ligneux unisérié ; 8 fibre- trachéide ; 9 fibre simpliciponctuée.

Bois de peuplier

Appartenant à la famille des Salicacées, il est un bois homogène. D'après Venet (1986), la concentration de pores varie à l'intérieur d'une même couche d'accroissement, elle est plus élevée au début (en particulier chez les trembles), parfois un peu plus tard en saison (peuplier de culture). Son accroissement de forme irrégulière, souvent large (plus de 1cm chez les peupliers de culture). Ses groupes radiaux de vaisseaux sont très fréquents, comprenant de 2 à 6 pores tangents et alignements irréguliers, dentritiques ou en feston. Il possède aussi des pores très fin, parfois de classe E (plus de 250 pores par 10 mm²) ; parfois de classe D (de 125 à 250 pores par 10 mm²). Sa densité est faible, la moyenne est environ 450kg/m³ [Venet 1986]

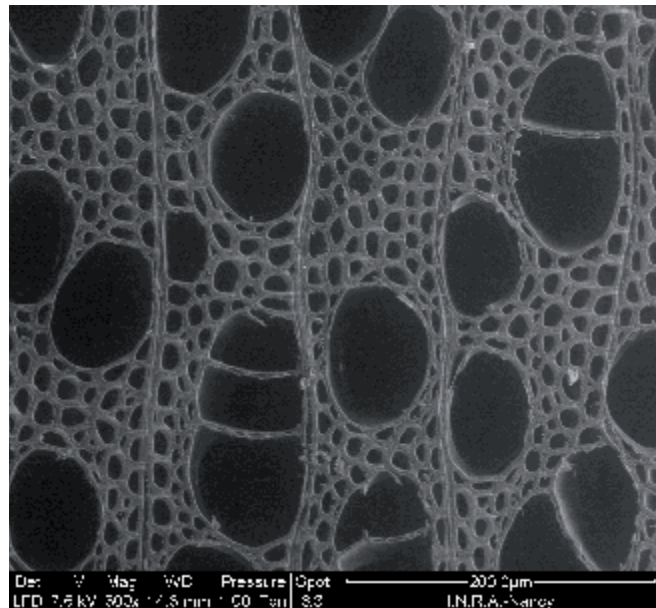


Figure 1.6 : Bois de peuplier sous microscope électronique à balayage

Différents travaux de recherches sur plusieurs essences du bois de peuplier ont été réalisés pour déterminer chercher ses comportements mécaniques intrinsèques [C.T.B, 1980 ; Guitard ,1987 ; Marchal et al., 2009]. Le Tableau 1.2 présente quelques paramètres mécaniques généraux du bois de peuplier :

Noms spécifiques communs	H %	ρ g/cm ³	E_R N/mm ²	E_T N/mm ²	E_L N/mm ²	G_{RT} N/mm ²	G_{TL} N/mm ²	G_{RL} N/mm ²
Populus tremuloides (quaking aspen)	12	0,3	743	264	7850	83	447	601
Populus tremuloides	12	0,31	712	281	9540	99	432	674
Populus Alba	13,7	0,4	1190	493	6830	200	900	1000

Tableau 1.2 : Complaisances mécaniques de certaines essences du peuplier [de Guitard, 1987]

Généralement, on voit que dans la famille de peuplier, à l'humidité environ 12%, le module d'élasticité du peuplier selon la direction radiale atteint à environ 8 GPa, et il est beaucoup plus faible dans les directions transversales ; environ 0.7 GPa selon la direction radiale et environ 0.3 GPa selon la direction tangentielle.

2. Ultra structure

a. Constitution de la paroi cellulaire

La cellule du bois peut comporter 3 types de parois qui vont apparaître au fur et à mesure de la différenciation cellulaire (Figure 1.7).

Dès la division cambiale apparaît la paroi la plus externe, dite la couche intercellulaire, celle qui soude les cellules entre elles. Amorphe, isotrope, elle est constituée en grande partie de substance pectique, son épaisseur oscille entre 0.5 et 1.5 μm . Cette paroi est le ciment des cellules.

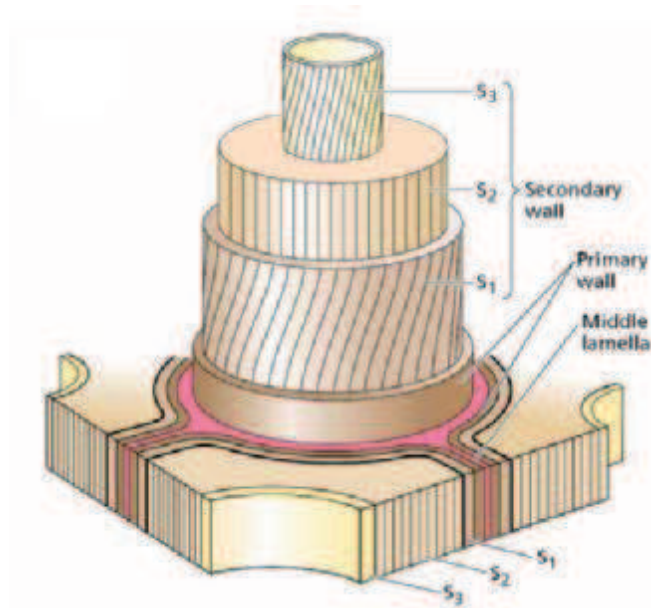


Figure 1.7 : Schéma des différences couches dans la paroi cellulaire du bois [Taiz et Zeiger, 2002 cité dans Ruelle, 2007]

Puis sur cette lamelle moyenne vient se plaquer une paroi primaire formée de microfibrilles de cellulose mal ordonnées se présentant comme un feutre et qui va laisser à cette paroi une certaine souplesse non négligeable dans le mécanisme d'aspiration des ponctuations aréolées. Dans un arbre vivant, la paroi primaire contient beaucoup d'eau et son épaisseur est de l'ordre de 0,1 μm seulement. A l'état sec, le retrait réduit son épaisseur jusqu'à 0,03 μm [Keller, 1994].

S'ajoute une paroi qui est vraisemblablement déterminante dans notre travail de recherche, la paroi secondaire.

La paroi secondaire se dépose sur la paroi primaire, elle est une couche relativement dense et rigide contenant une forte proportion de cellulose. Par sa structure et son volume, elle constitue la partie de la cellule la plus résistante mécaniquement. Elle présente une structure en couches qui se déposent successivement; les microfibrilles de cellulose s'orientant en une texture parallèle, différente de celle qu'on observe sur la paroi primaire. Elle comprend des celluloses, des hémicelluloses et des lignines [Bodig et Jayne, 1982 ; Guitard, 1987] qui viennent s'y déposer.

Dans un cas normal du bois, comme par exemple les trachéides des résineux et les fibres des feuillus, la paroi secondaire comporte trois couches:

- La couche externe S_1 qui est accolée à la paroi primaire, son angle de microfibrille (A.M.F.) est élevé de l'ordre de 60° à 80° [Keller, 1994] ou bien il peut atteindre jusqu'à 90° [Yamamoto, 2004] par rapport à l'axe de la cellule. Son épaisseur varie de 0,1 mm à 0,35 mm et elle représente au total 5% à 10% de l'épaisseur totale de la membrane cellulaire [Keller 1994]. Cette structure en réseau croisé expliquerait la forte résistance à la traction transversale de cette zone de la paroi cellulaire.
- La couche centrale S_2 est la plus épaisse de toutes les parois. Elle est organisée en lamelles de cellulose qui lui donne une épaisseur comprise entre 1 et 10 μm et

représente ainsi 75% voire 85% de l'épaisseur totale de la paroi cellulaire [Keller, 1994]. Les microfibrilles disposées en hélice ont un angle compris entre 5 et 30°. De cet angle dépend le comportement physique du bois. Compte-tenu de son importance volumique, cette paroi S_2 est la plus importante paroi de la cellule du bois ;

- La couche interne S_3 : C'est une paroi mince, dont l'épaisseur est de l'ordre de $1\mu\text{m}$, et dont les microfibrilles font un angle de 60° à 90° par rapport à l'axe de la cellule [Keller, 1994].

Ces parois sont couvertes de ponctuations qui permettent les échanges entre cellules, ponctuations qui seront simples ou aréolées en fonction du type des cellules auxquelles elles appartiennent.

Parfois nous pouvons rencontrer une couche plus interne présente dans le bois de réaction qui sera présenté par la suite.

b. Composition chimique de la paroi cellulaire

Les cellules du bois sont composées par des différents composants chimiques, comme la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Leurs proportions sont différentes selon les essences et dans les différentes couches dans la même essence. Ils influent les propriétés mécaniques du bois. Leurs pourcentages sont illustrés dans le travail de Bergander [2002], présentés dans le Tableau 1.3

Layer	Thickness (μm)	Fibril angle degrees	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)
S_3	0.03	70	48	36	16
S_2	1.6	10	50	31	19
S_1	0.15	-70, +70	28	31	41
P	0.1	unordered	15	33	52
M	0.3	-	0	44	56
Total	2.18		40	33	27

Tableau 1.3 : Structure et propriétés chimiques de la paroi cellulaire du bois de printemps à 12% H.R [Bergander, 2002]

Jozsef Bodig et Benjamin A. Jayne [Bodig and Jayne 1982] trouvent différents pourcentages de constituants dans les différences type du bois, les feuillus et les résineux. Dans la couche intercellulaire, il y a environ 65-75% de lignine pour le bois de résineux et un peu plus dans le bois des feuillus, environ 75-85%. La sous-couche S_2 du bois de résineux contient seulement environ 15-20% de lignine. Par contre, elle contient jusqu'à 70% de cellulose dans la paroi cellulaire. Ces auteurs présentent, dans la Figure 1.8, le rapport de lignine, hémicellulose et cellulose dans les trachéides du bois des résineux à l'état sec:

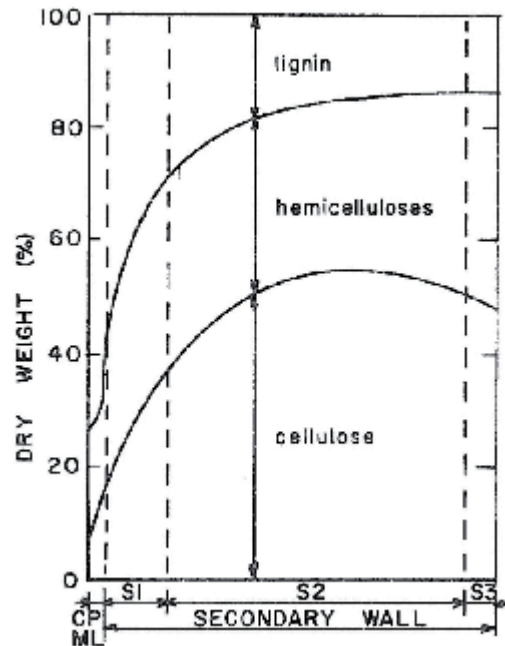


Figure 1.8 : Distribution des constituants chimiques dans la paroi cellulaire de la trachéide [Bodig et Jayne, 1982]

c. Bois de réaction

Le bois de réaction est modifié dans ses propriétés anatomiques et chimiques et est généralement formé en réponse l'orientation de la tige non optimale ou la branche causée par les vents dominants, la neige, la lumière, la pente, des charges, ou à la forme asymétrique de la couronne. Quand un arbre est sorti de sa position d'équilibre dans l'espace, incliné ou positionné horizontalement par exemple, un fort développement est engagé sur sa face inférieure. Pourtant, une augmentation de la croissance longitudinale sur la face inférieure ne suffit pas à l'augmentation de la flexion. Le redressement est atteint par la formation du bois de réaction, qui se développe tandis que l'arbre "réagit" à la modification de son environnement.



Figure 1.9 : Arbre incliné (droite) et arbre normal (gauche)

i. Bois de compression

Le bois de réaction chez les résineux est appelé « bois de compression » parce qu'il est formé du côté large des sections transversales excentrées, correspondant à la partie inférieure ou soumise à une compression des troncs penchés ou des branches [Keller 1994].

Les caractéristiques anatomiques du bois de compression sont modifiées par rapport au bois normal. D'après plusieurs auteurs, les trachéides dans le bois de compression sont plus courtes que celles du bois normal, (environ 10-40%) [Keller 1994], le taux de lignine et d'hémicellulose est plus élevé, (environ 8-9%) mais le taux de cellulose est moindre (environ 10%) [Ressel, 2007]. Ces différences ont des conséquences : la densité est plus importante ; le retrait selon la direction longitudinale est augmenté jusqu'à 2% (0.1 à 0.2% dans le cas du bois normal) et parfois, il peut atteindre jusqu'à 7% [Ressel, 2007].

A l'échelle macroscopique, la zone de compression dans la section transversale ayant la croissance la plus rapide est beaucoup plus rouge que dans le cas du bois normal. De plus, la largeur de cerne est plus large dans la zone de compression et plus étroite dans la zone opposée par rapport celui du bois normal.

Au niveau microscopique, on voit que la paroi cellulaire n'est faite que de couches ML, P, S₁ et S₂ et il n'y a pas de couche S₃ [Ressel, 2007]. Kollmann a confirmé l'absence de la couche S₃ dans le bois de compression [Kollmann, 1984], cette absence est présentée nettement sur l'image réalisée sous microscope électronique d'une section transversale ultrafine de bois (Figure 1.10).

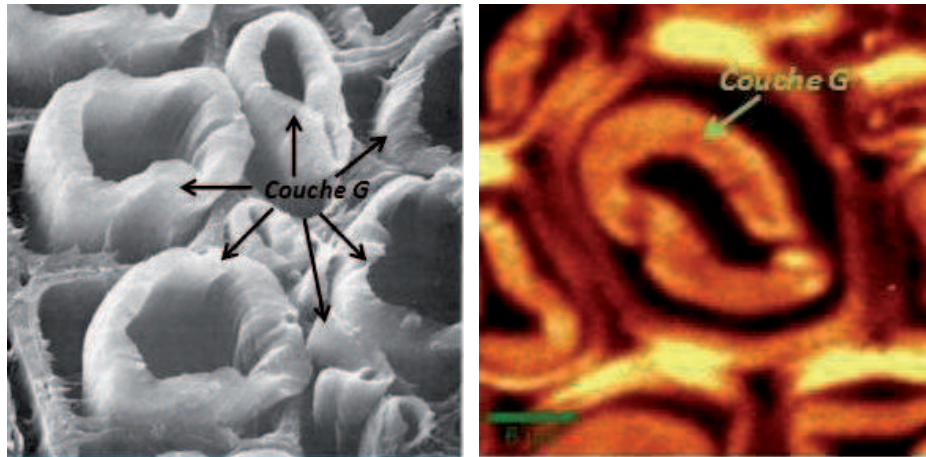


Figure 1.10 : Cellule du bois de pin de compression sous microscope électronique, grossissement x2600. Remarque l'absence de la sous couche S₃ [Kollmann, 1984]

L'angle des microfibrilles dans la couche S₂ est d'environ 45° par rapport à l'axe de la cellule [Ressel, 2007]. Cette valeur est vraiment plus importante par rapport à l'angle des microfibrilles dans la couche S₂ du bois normal.

ii. Bois de tension

Le bois de réaction des feuillus est appelé « bois de tension ». Il est formé sur la face supérieure du bois, où les tissus sont organisés en tension. La caractéristique la plus remarquable des fibres de bois de tension est la présence d'une couche épaisse qui se compose d'une structure très riche en cellulose cristalline, dans laquelle l'orientation des microfibrilles est presque longitudinale et parallèle à l'axe de la fibre. Cette couche s'appelle la couche gélatineuse (couche G), elle est presque toujours non aoûtées et est lâchement attaché à la cellule d'autres couches de la paroi (Figure 1.11).



(1)

(2)

Figure 1.11 : (1) Fibres du bois de tension présentant une couche G [Haygreen et Boyer, 1982] et (2) Image des fibres du bois de tension obtenue par micro-spectroscopie Raman (cliché P.Cabrolhier, 2009)

La couche G est sensible à la coloration, elle s'appelle aussi « green G- layer » dans plusieurs articles [Yamamoto, 2004 ; 2005]. Les fibres de bois de tension sont facilement reconnaissables, elle est colorable au Bleu Astra et devient bien visible au microscope optique. Pendant la maturation, les fibres de bois de tension rétrécissent fortement dans la direction longitudinale [Sheng Du' and F. Yamamoto, 2007].

Dans le cas du bois de tension, les fibres se présentent d'une couche épaisse dans la paroi interne des cellules qui se compose de couche très cellulosique cristalline. Sa densité peut atteindre jusqu'à 30% de plus par rapport à celle du bois normal si la couche G est épaisse [Keller, 1994], l'orientation des microfibrilles est presque longitudinale et parallèle à l'axe de la cellule.

Les différences principales par rapport au bois normal sont observées au niveau des fibres ; les vaisseaux, dans le bois de tension sont moins nombreux et de plus faible diamètre [Keller, 1994]. La modification la plus caractéristique dans les fibres du bois de tension est le développement d'une couche gélatineuse (couche G) où les microfibrilles de cellulose font un angle très faible par rapport à l'axe de la cellule (de 0° [Yamamoto, 2004] à 5° [Keller, 1994]). Son épaisseur est égale ou supérieure à celle de la couche S₂ de la paroi, elle a une apparence gondolée et gonflée et est partiellement détachée des autres couches. Réfractant plus la lumière que les couches des parois du bois normal, elle peut avoir l'apparence d'un gel clair.

Concernant la composition chimique dans la couche G, il reste encore des différences idées. Keller [1994] a dit que la lignine est normalement absente, elle n'apparaît donc ni par les colorations spécifiques ni au microscope à contraste de phase. Par ailleurs, Yamamoto [2004] croit qu'il y a de la lignine dans la couche G et elle n'est pas différente par rapport à celle dans le bois normal.

Notons que les modifications dans les tissus ne sont pas limitées aux zones du bois de tension ; le bois opposé peut avoir des fibres plus courtes que les fibres du bois normal, mais ses vaisseaux sont normaux [Keller, 1994]. Chimiquement, on trouve que le bois de tension contient plus de cellulose, moins de lignine et de plus faibles quantités de xylose que le bois normale [Kollmann, 1984].

II. Comportement mécanique du bois

1. Comportement élastique

Dans le domaine élastique du bois, le module d'élasticité (module d'Young E) est un paramètre important pour déterminer son comportement mécanique. Des facteurs influent le module d'Young, notamment la température, la teneur en eau (humidité) et la densité.

a. Influence de la température

L'influence de la température sur les propriétés mécaniques du bois est toujours déterminée par le changement des paramètres élastiques, des dilatations, des relaxations des contraintes ou bien des quelques combinaisons entre ceux-ci [Bodig et Jayne, 1982]. En générale, quand la température augmente, on obtient une contrainte plus faible à la même valeur de déformation (le matériau bois est moins dur quand la température augmente). Cette relation est présentée dans la Figure 1.12.

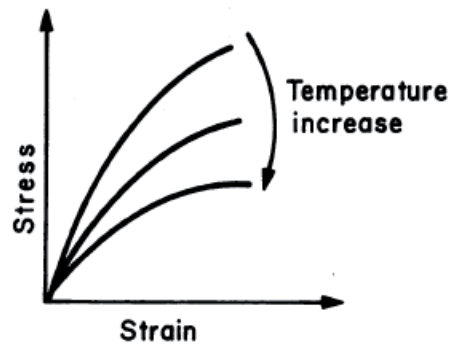


Figure 1.12 : Représentation de l'effet de la température dans la courbe contrainte-déformation du bois [Bodig et Jayne, 1982]

Bodig et Jayne montrent également la relation entre la propriété mécanique du bois et le changement de température sous la forme de l'équation.

$$Y' = Y(1 + \alpha[t' - t])$$

Avec : Y' : Propriété mécanique correspondante à la température t'

Y : Propriété mécanique correspondant à la température t

α : coefficient de l'effet thermique.

α , représenté dans le Tableau 1.4, dépend à l'essence du bois mais il porte toujours la valeur négative. C'est-à-dire que quand la température augmente ($t' > t$), la propriété mécanique du bois est toujours diminuée.

Species	Temperature Range, °C	M.C., %*	Coefficient of Thermal Effect, $10^{-3}/^{\circ}\text{C}$					
			α_{EL}	α_{ER}	α_{ET}	α_{GLR}	α_{GLT}	α_{GRT}
Ash, mountain	20 to 60	15	-7.50	-	-	-	-	-
Beech	20 to 100	O.D.	-0.79	-	-	-	-1.60	-1.80
N. American	20 to 80	Green	-	-	-10.00	-	-	-
N. American	20 to 80	15	-	-	-9.00	-	-	-
Birch	20 to 100	O.D.	-1.50	-	-	-	-0.87	-
Oak	20 to 100	O.D.	-0.73	-2.50	-2.10	-1.70	-1.60	-1.60
Poplar	20 to 100	O.D.	-0.60	-	-0.60	-	-1.50	-
Quandong, silver	20 to 60	15	-4.00	-	-	-	-	-
Spruce	20 to 60	15	-5.00	-	-	-	-	-
Sitka	20 to 100	O.D.	-	-	-	-1.80	-2.00	-2.10
Pine, scot	-15 to 50	12	-4.50	-	-	-	-	-

Tableau 1.4 : Coefficient de l'effet thermique pour les paramètres élastiques du bois [d'après Hearmon, 1948 cité dans Bodig and Jayne, 1982]

Un exemple de l'effet de température influe sur le module d'élasticité, appliqué sur 2 essences du bois, est montré dans la Figure 1.13

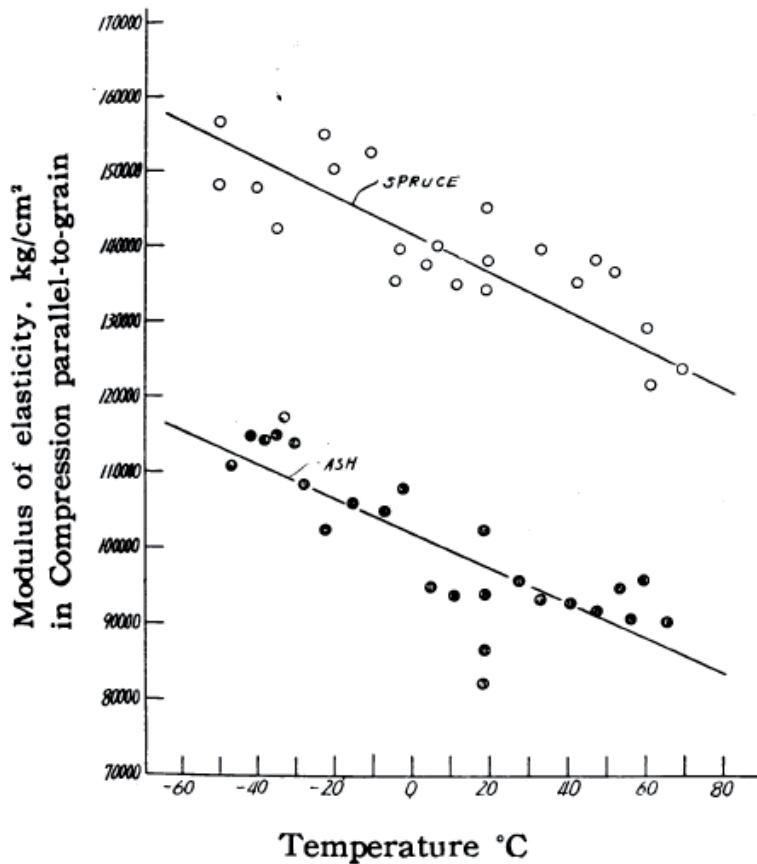


Figure 1.13 : Relation entre E_L et la température pour deux essences du bois [Sano, 1961 cité dans Bodig and Jayne, 1982]

b. Influence de l'humidité

Généralement, le changement de l'humidité affecte profondément l'équilibre des constantes élastiques du bois, surtout quand le taux d'humidité est dans le domaine hygroscopique. La limite supérieure de ce domaine (ou le point de saturation des fibres, dite PSF) varie selon l'espèce et la température. Pourtant, elle est toujours proche de 30% à 20°C [Perré, 1994]. Notons qu'au point de saturation des fibres, tous les pores d'un diamètre inférieur à environ 0.1 μm sont saturés [Perré, 1987].

D'après Guitard [1987], la variation dimensionnelle, retrait ou gonflement, se réalise quand le taux d'humidité est en dessous de PSF. De plus, Pluvinage [1992] a montré que le PFS influe également sur la variation de module d'Young en fonction de l'humidité. Cette variation est très forte quand l'humidité est moins de 30% et presque constante quand l'humidité est plus de 30%. Son travail est réalisé sur le bois de chêne, bouleau et pin, présenté à la Figure 1.14

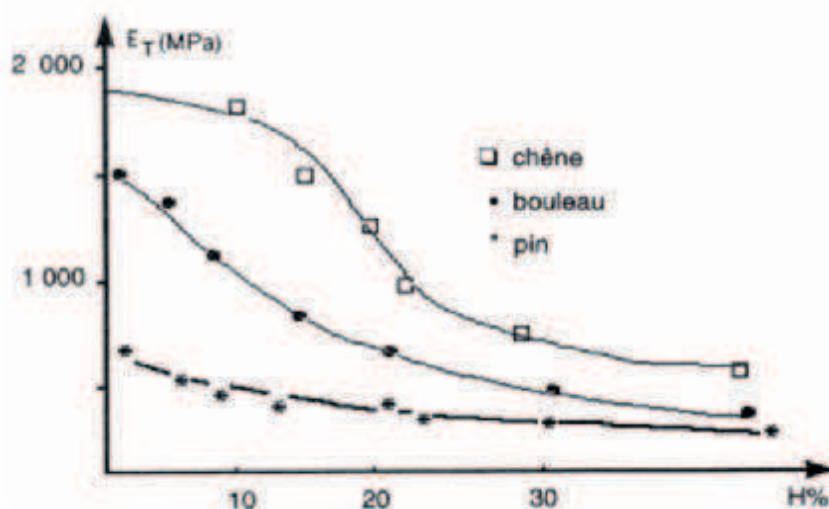


Figure 1.14 : Variation du module d'élasticité E_T en fonction de taux d'humidité [Pluvinage, 1992]

Le module d'Young est varié en fonction du changement de l'humidité et de la température. Cette conclusion est reconfirmée par le travail de Bodig et Jayne [1982], ils ont montré une courbe qui représente l'effet de l'humidité sur le module d'élasticité de l'épicéa à basse température (Figure 1.15)

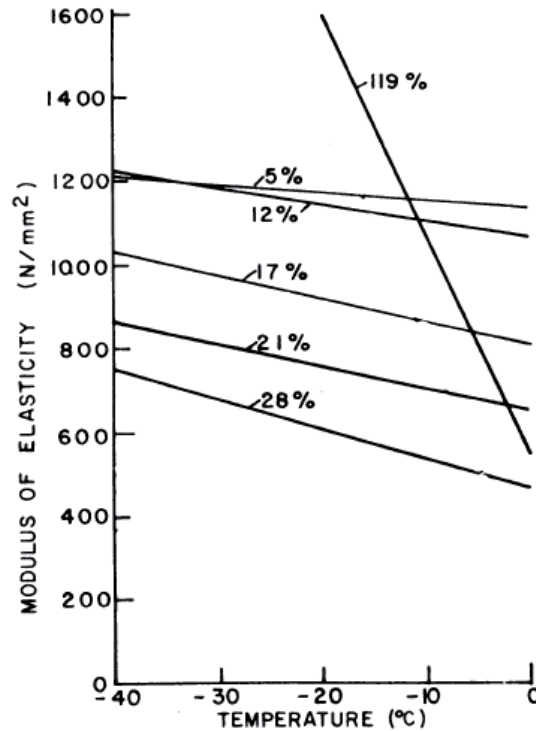


Figure 1.15 : Effet de taux d'humidité sur E_R de l'épicéa à la base température [Geissen, 1976 cité dans Bodig et Jayne, 1982]

On constate qu'à la même température, le module d'Young du bois augmente quand son humidité diminue, c'est-à-dire que le matériau bois est plus rigide quand il est plus sec. Cette augmentation de la rigidité mécanique est provoquée par les changements dans la paroi cellulaire. Lors d'une perte d'humidité, la paroi cellulaire devient beaucoup plus compacte puisque la masse de substance ligneuse dans un volume donné augmente [De La Cruz Sanchez, 2006].

Outre, à la même humidité, le module d'Young diminue quand la température augmente. Ce résultat reconferme alors l'effet de température sur le module d'Young que l'on a discuté précédemment. De plus, la Figure 1.15 montre que la pente du courbe à 5% H.R et à 119% H.R est beaucoup différente par rapport celle des autres courbes (de 12% à 28% H.R). C'est-à-dire que la variation de module d'Young en fonction de la variation de température est très peu à l'état très sec (5% H.R), un peu plus importante et assez constante à l'état sec à l'air (de 12% à 28% H.R) et elle est très élevée à l'état très humide (119% H.R).

Notons que dans plupart des documents techniques, les paramètres physiques et mécaniques du bois sont donnés à l'humidité 12%. De manière pratique, pour les fluctuations du taux d'humidité dans la plage de 6 à 20%, on pourra adopter les corrections suivantes sur les principales caractéristiques élastiques [Guitard, 1987] :

$$E_L^H = E_L^{12} [1 - 0.015(H - 12)]$$

$$E_R^H = E_R^{12} [1 - 0.030(H - 12)]$$

$$E_T^H = E_T^{12} [1 - 0.030(H - 12)]$$

$$G_{RT}^H = G_{RT}^{12} [1 - 0.030(H - 12)]$$

$$G_{TL}^H = G_{TL}^{12} [1 - 0.030(H - 12)]$$

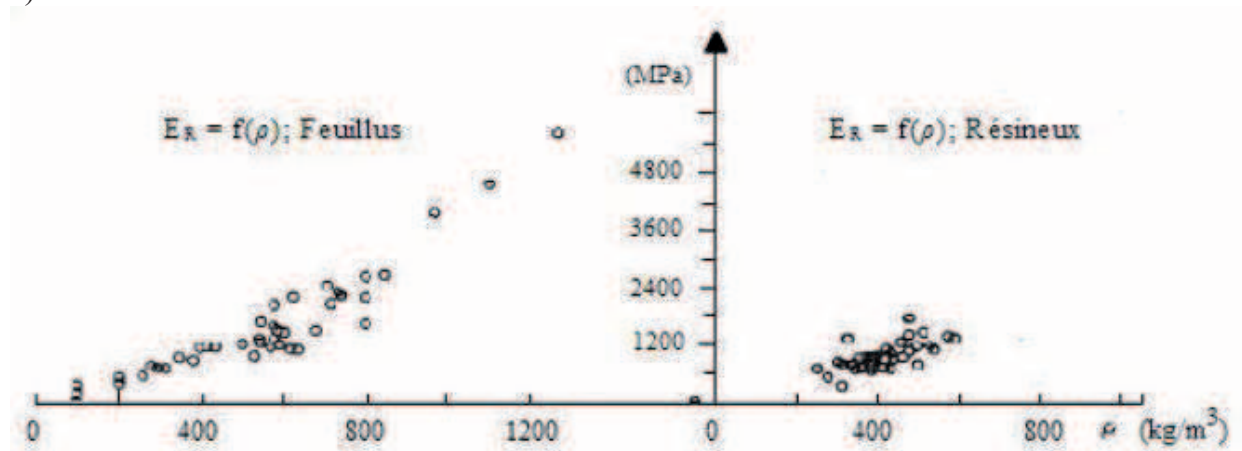
$$G_{LR}^H = G_{LR}^{12} [1 - 0.030(H - 12)]$$

c. *Influence de la densité*

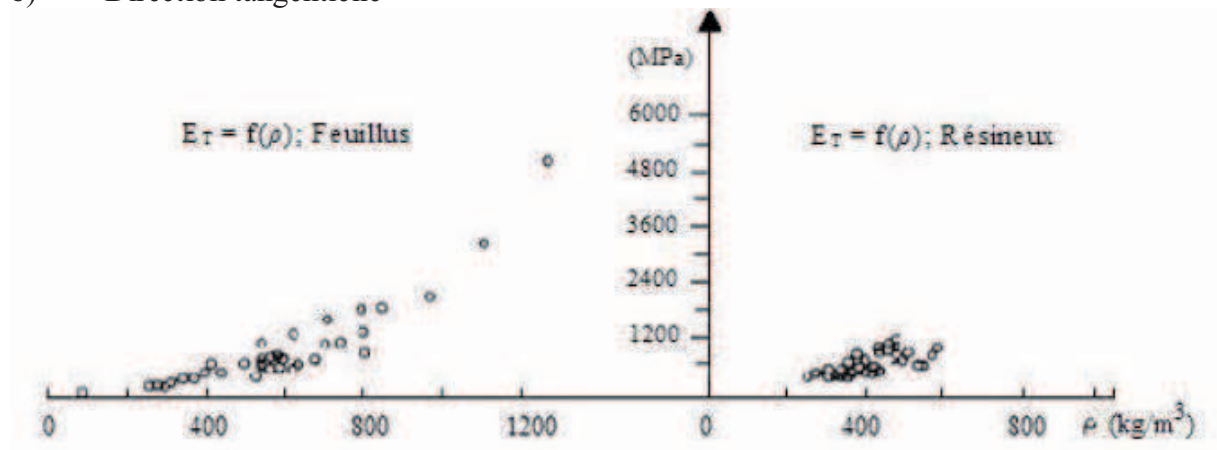
La densité du bois (ou la masse volumique) est le rapport entre la masse et le volume d'un échantillon qui vise à préciser la quantité massique de matière ligneuse contenue dans le volume donné de bois [Guitard, 1987]. Elle est une caractéristique extrêmement importante parce qu'elle conditionne nombre de propriétés et aptitudes technologiques du matériau et notamment ses propriétés mécaniques [Nepveu, 1994].

D'après Guitard [1987], la masse volumique calculée est de 0.65g/cm^3 pour le feuillu standard et est de 0.45g/cm^3 pour le résineux standard. Par contre, la densité du bois présente une vaste plage pour les essences différentes, depuis $\rho=0.2\text{g/cm}^3$ pour le Balsa jusqu'à $\rho=1.28\text{g/cm}^3$ pour l'Endranendrana. Cet auteur présente des diagrammes qui permettent de déterminer le module d'Young E en fonction de la densité ρ .

a) Direction radiale



b) Direction tangentielle



c) Direction longitudinale

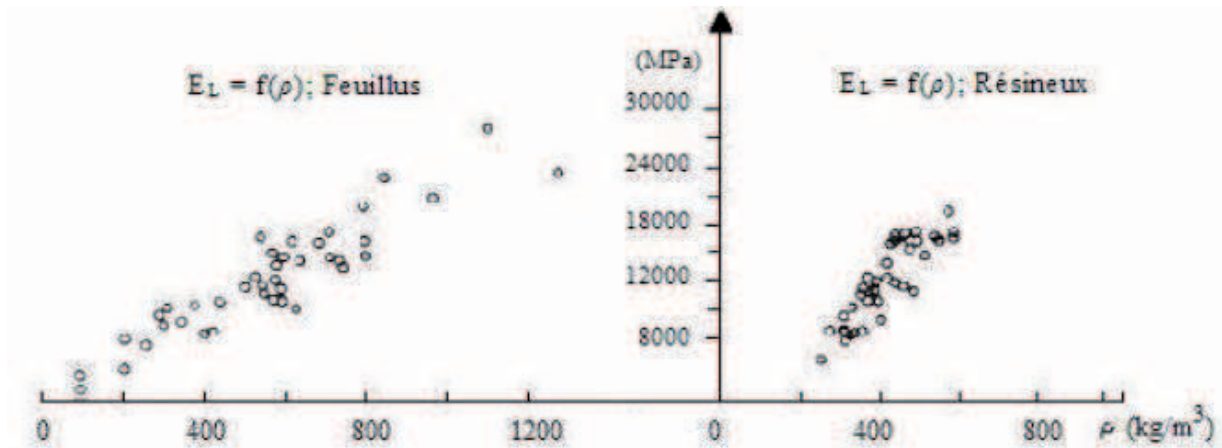


Figure 1.16 : Module d'Young en fonction de la densité des différences essences pour les teneurs en eau voisinent de 12% [Guitard, 1987]

Grâce aux diagrammes présentés dans la Figure 1.16, on constate que le bois qui possède la densité plus élevée (plus dense) est plus résistant (le module d'Young est plus élevé). Cette confirmation est correcte pour toutes les trois directions du bois, même pour le feuillu et le résineux.

2. Domaine plastique- mécanismes de rupture

Considérons un essai mécanique classique : essai de traction ou de compression.

Le rapport de contrainte/déformation (module d'Young dans la zone élastique) est très varié pour les différentes essences du bois ou pour les différentes directions dans un même arbre. Pourtant, la courbe de contrainte/déformation dans l'essai de traction/compression pour le bois sec possède une forme générale comme la Figure 1.17

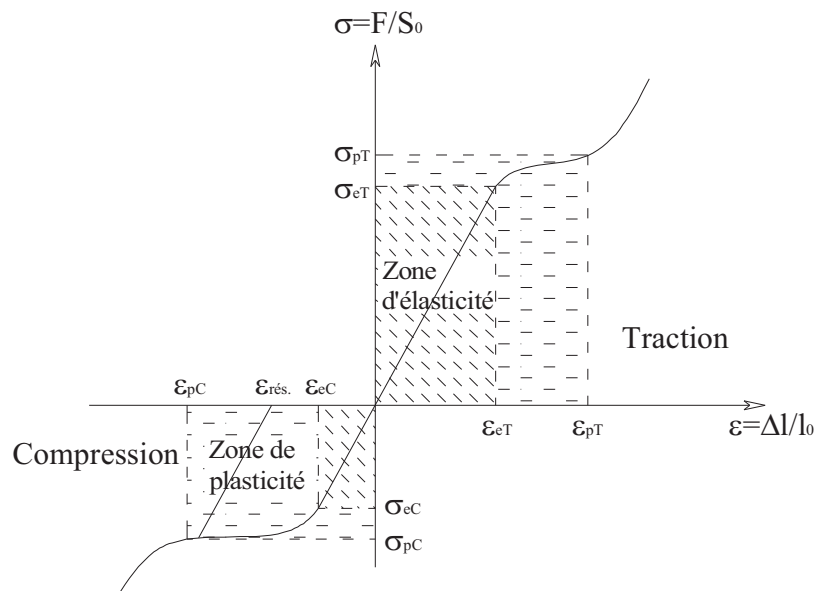


Figure 1.17 : Courbe de contrainte-déformation en traction et en compression limitée à la zone de comportement plastique [Guitard, 1994]

Quand on dépasse la limite élastique du matériau, on tombe dans le domaine plastique jusqu'à la rupture. Dans ce domaine, le matériau bois obtient toujours une déformation plastique dite résiduelle $\epsilon_{rés.}$, elle est déterminée facilement quand on décharge à 0 (Figure 1.17).

Pour le matériau bois, d'après Guitard [1987 ; 1994], la rupture à la traction apparaît plutôt fragile. Par ailleurs, elle présente un caractère ductile en compression. En outre, dans un cas il y a la rupture de fibre, dans le second, il y a des flambements et des instabilités mécaniques dans la structure du bois.

3. Comportement viscoélastique

A long terme, la viscosité est une caractéristique importante pour le comportement mécanique des matériaux et du bois. Cette caractéristique est exprimée nettement dans deux phénomènes : fluage et relaxation. Rappelons que la caractérisation et la modélisation du comportement différé du bois sont complexes. Elles sont fonction de la contrainte, de la température et de leurs vitesses de variation dans le temps [Navi, 2005].

a. Condition constante du climat

Il apparaît le phénomène de fluage quand on impose un essai par la contrainte dans le long terme. Pour simplifier, on va considérer la condition constante du climat (température et humidité constantes).

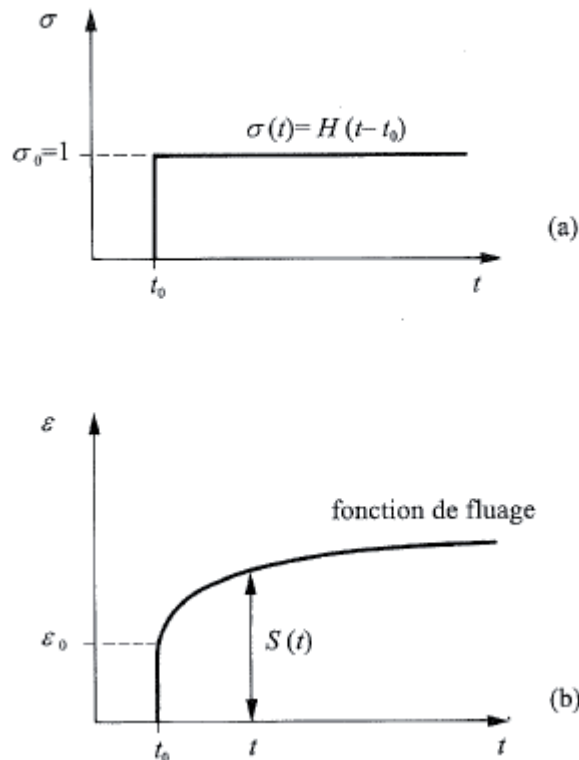


Figure 1.18 : Représentation d'une fonction de fluage : (a) sollicitation en un échelon, de contrainte, $\sigma(t)=H(t-t_0)$, $H(t)$ est la fonction de Heaviside, où $H(t)=0$ pour $t<0$ et $H(t)=1$ pour $t\geq 0$; (b) réponse en déformation ou fonction de fluage [Navi, 2005].

Quand on sollicite une contrainte σ_0 , on obtient une réponse en déformation $\varepsilon(t)$ en fonction du temps et de σ_0 .

$$\varepsilon(t) = \varepsilon'(t, \sigma_0)$$

Pour un comportement linéaire, la fonction ε' est déterminée :

$$\varepsilon'(t, \sigma_0) = S(t)\sigma_0 \text{ avec } S(t) \text{ s'appelle la fonction de fluage et elle est donnée par } S(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0}$$

$S(t)$ se définit comme le rapport croissant dans le temps de la déformation à la contrainte appliquée σ_0 .

D'après le développement de Navi [Navi 2005], la déformation $\varepsilon(t)$ est déterminée en décomposant en deux parties, une partie élastique et une partie visqueuse.

$$\varepsilon_{(t)} = \sigma_{(t)} S_{(0)} + \int_{t_0}^t \sigma_{(\tau)} \frac{dS_{(t-\tau)}}{d\tau} d\tau$$

Avec $\sigma(t) = H(t-t_0)$

τ : le moment intermédiaire entre t et t_0 .

b. Condition variable du climat

D'après Grossmann [1976] dans Navi [2005], on utilise souvent le terme « effet de mécanosorption » pour exprimer le couplage entre la contrainte mécanique et la variation de la teneur en eau du bois. Par définition, le phénomène de mécanosorption se caractérise par le fait qu'une variation d'humidité relative sous contrainte constante amène une augmentation des déformations par rapport à une pièce ayant les mêmes contraintes sans variation d'humidité relative [Armstrong, 1962 cité dans Husson, 2009]. En effet, la teneur en eau d'équilibre d'une éprouvette, à une humidité relative donnée, dépend fortement de la température, de l'état de contrainte et de l'histoire de l'humidité [Skaar, 1988 cité dans Randiambolona, 2003].

Cependant, le matériau possède un comportement, dite hygro-verrou, se traduisant par des blocages de déformation durant des phases de séchage et une mémoire hydrique rappelée lors des phases de recouvrement des déformations [Gril, 1988 cité dans Husson, 2009]. Ce comportement est montré nettement dans le travail de Husson [2009] où il présente un essai de fluage-recouvrance avec deux niveaux différents de teneur en eau pendant la phase de fluage et de recouvrance (Figure 1.19)

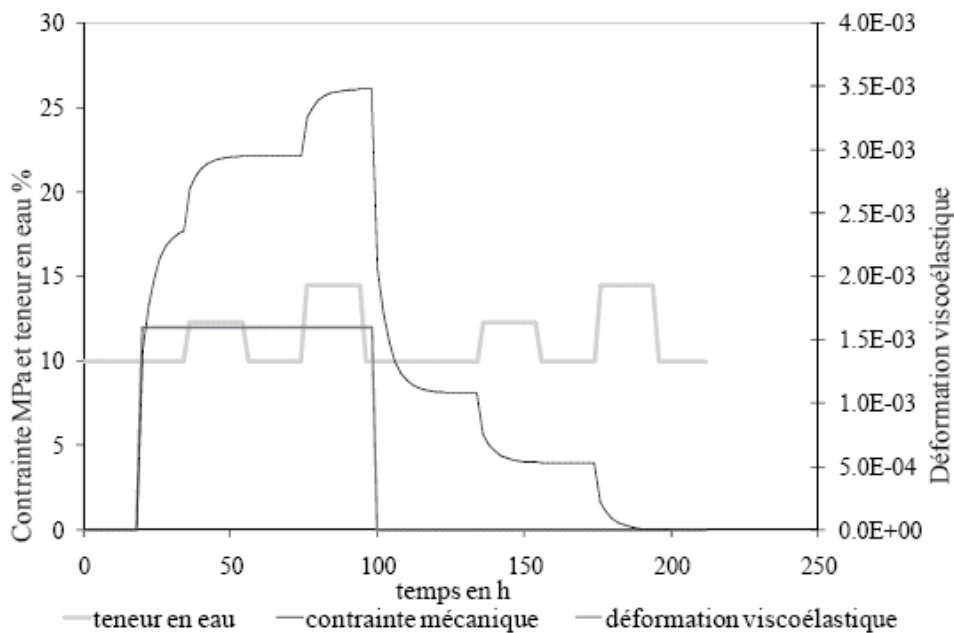


Figure 1.19 : Fluages et recouvrements en fonction de changement de la contrainte et de la teneur en eau [Husson, 2009]

La Figure 1.19 montre qu'il y a le blocage des déformations lors du premier séchage sous charge. Ensuite, la libération de l'effet hygro-verrou est partielle lors de la première humidification après déchargement. L'annulation de la déformation viscoélastique est totale lorsque la teneur en eau atteint la valeur maximale connue.

Dans une autre application, Husson [2009] confirme que même la teneur en eau est plus grande que celle connue, la déformation ne dépasse pas à une valeur négative.

c. *Modèle Kelvin Voigt - Modèle Maxwell*

Le comportement viscoélastique du matériau peut être modélisé par la construction d'un modèle constitué d'un ensemble de ressorts (solide élastique parfait) et d'amortisseurs (liquide visqueux newtonien). Ils sont structurés peut être en série, en parallèle ou complexe.

i. *Modèle Kelvin Voigt*

Ce modèle est composé en parallèle par un ressort modélisant le module d'élasticité E et un amortisseur modélisant le coefficient de viscosité η . Il est plutôt réservé pour représenter le comportement d'un solide [Placet, 2006].

Notons que ε_1 , ε_2 et σ_1 , σ_2 sont les déformations et les contraintes dans le ressort et dans l'amortisseur. On obtient :

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1$$

$$\sigma_2 = \eta \frac{d\varepsilon_2}{dt}$$

Ils sont structurés en parallèle, donc :

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$$

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = E\varepsilon_1 + \eta \frac{d\varepsilon_2}{dt}$$

La fonction du fluage peut s'écrire

$$f(t) = \frac{1}{E} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \text{ avec } \tau = \frac{\eta}{E} \text{ qui s'appelle le temps de retard.}$$

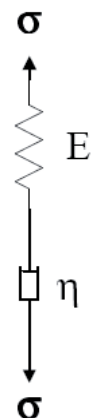
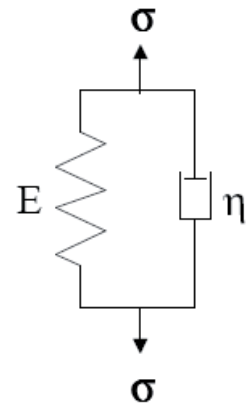
ii. *Modèle Maxwell*

Il est composé par un ressort et un amortisseur en série. Cette présentation est bien adaptée pour représenter le comportement du fluide [Placet, 2006].

La fonction du fluage de cette structure s'est écrite :

$$f(t) = \frac{1}{E} + \frac{t}{\eta}$$

Le comportement viscoélastique du matériau bois peut être modélisé plus précis en utilisant les modèles complexes qui sont présentés dans plusieurs littératures [Dubois, 2004 ; Moutee, 2006].



4. Anisotropie et hétérogénéité

a. Anisotropie

Au microscope, le bois apparaît comme une série de tubes orientés dans la même direction. Cette disposition a pour conséquence de différencier les propriétés mécaniques du bois suivant les directions. C'est ce qu'on appelle l'anisotropie du bois.

A toutes les échelles, le matériau bois présente donc une direction principale. Par exemple à l'échelle de l'arbre, c'est la direction de l'axe du tronc qui s'appelle la direction longitudinale (L). A l'échelle microscopique, la direction principale est celle des microfibrilles, et aux échelles intermédiaires, c'est la direction des fibres et des cellules. Notons que les fibres, mêmes dans le bois clair, ne suivent pas exactement la direction longitudinale de l'arbre [Simon, 2009].

Pour caractériser globalement l'anisotropie en fonction de la partie réelle (ou imaginaire) du module d'Young, Viéville et Guitard [1995] définissent un facteur d'anisotropie α déterminé par la formule :

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{(E_R - E_T)^2}{(E_R + E_T)^2} + \frac{(E_L - E_T)^2}{(E_L + E_T)^2} + \frac{(E_L - E_R)^2}{(E_L + E_R)^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Avec E_L , E_R , E_T : Partie réelle ou partie imaginaire du module d'Young complexe dans la direction longitudinale, radiale, tangentielle.

D'après les auteurs, ce coefficient (ou l'anisotropie du bois) dépend de la variation des paramètres de forme et des pourcentages des rayons ligneux (Figure 1.20).

Au niveau du cerne, dans le cas du bois initial où il y a 70% de vides (correspondant à un bois initial de densité moyenne), le coefficient varie de 0.035 à 0.77 pour une variation d'allongement des fibres allant de 1 à 50. Dans le cas du bois final où il y a 10% de vides (correspondant à un bois final dense), avec les mêmes variations d'allongement des fibres que précédemment, α varie de 0.44 à 0.53. Cette variation est beaucoup moins importante que celle dans le cas du bois initial. Après, dans la zone d'écrasement des fibres du bois final à 10% de vides, le coefficient d'anisotropie est particulièrement sensible au facteur d'écrasement de la cellule.

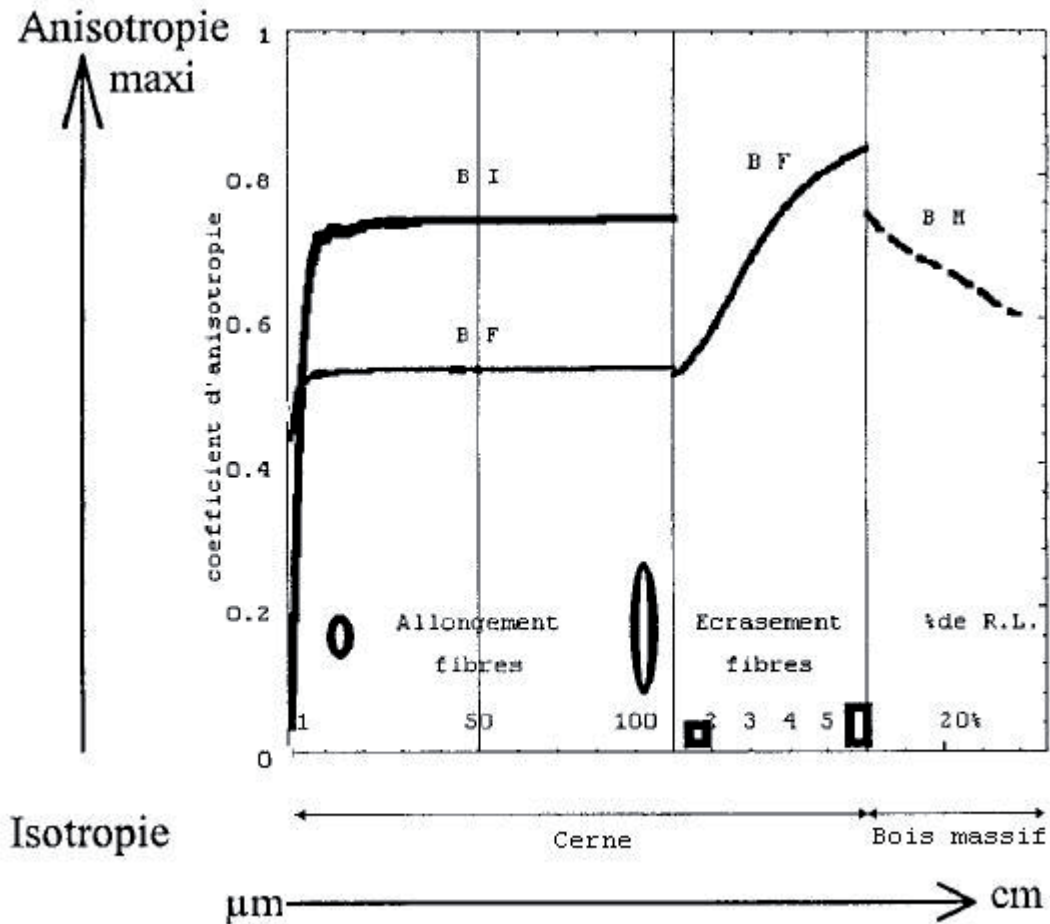


Figure 1.20 : Evolution du paramètre d'anisotropie global au niveau de cerne et de bois massif en fonction de la variation des paramètres de formes et des pourcentages des rayons ligneux avec : BI, bois initial ; BM : Bois final ; BM, bois massif ; RL, rayons ligneux [Viéville et Guitard, 1995]

A l'échelle du bois massif, le pourcentage des rayons ligneux va réduire l'anisotropie du matériau en augmentant la rigidité dans la direction radiale et en diminuant la rigidité dans la direction longitudinale.

Pour un matériau d'ingénierie comme le bois, il est nécessaire de définir un matériau orthotrope à l'échelle de l'arbre ou des cernes pour la simplification du calcul et de la modélisation. On définit la direction longitudinale (L) qui suit l'axe du tronc et deux autres directions orthonormales. C'est la direction de croissance annuelle, dite Radiale (R) et la dernière qui est tangente aux plans de cernes, dite Tangentielle (T).

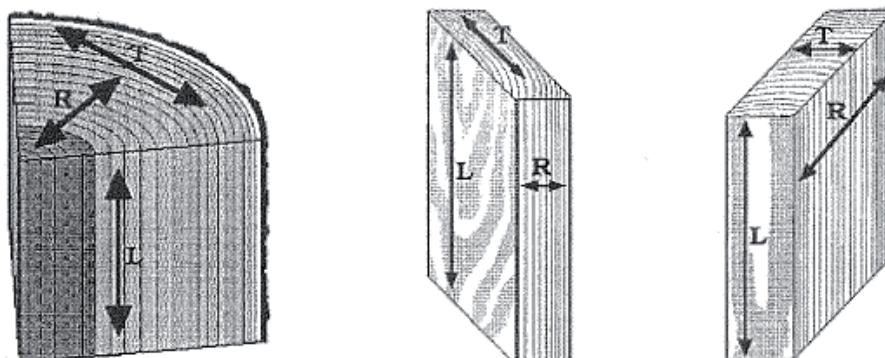


Figure 1.21 : Directions principales du bois (L : longitudinale ; R : radiale ; T : tangentielle)
[Wengert et Meyer, 2002]

b. Hétérogénéité

i. A l'échelle de l'arbre

Dans le plan transversal, le bois présente deux zones différentes selon la direction radiale, dite bois juvénile et bois adulte. Ces deux parties possèdent des angles des microfibrilles différents et donc des propriétés mécaniques différentes. D'après l'étude d'Outahyon [2008] sur le bois de Douglas, il semble que l'angle des microfibrilles diminue en fonction de l'âge de l'arbre, fortement dans les premières années et plus calme dans les années après (Figure 1.22).

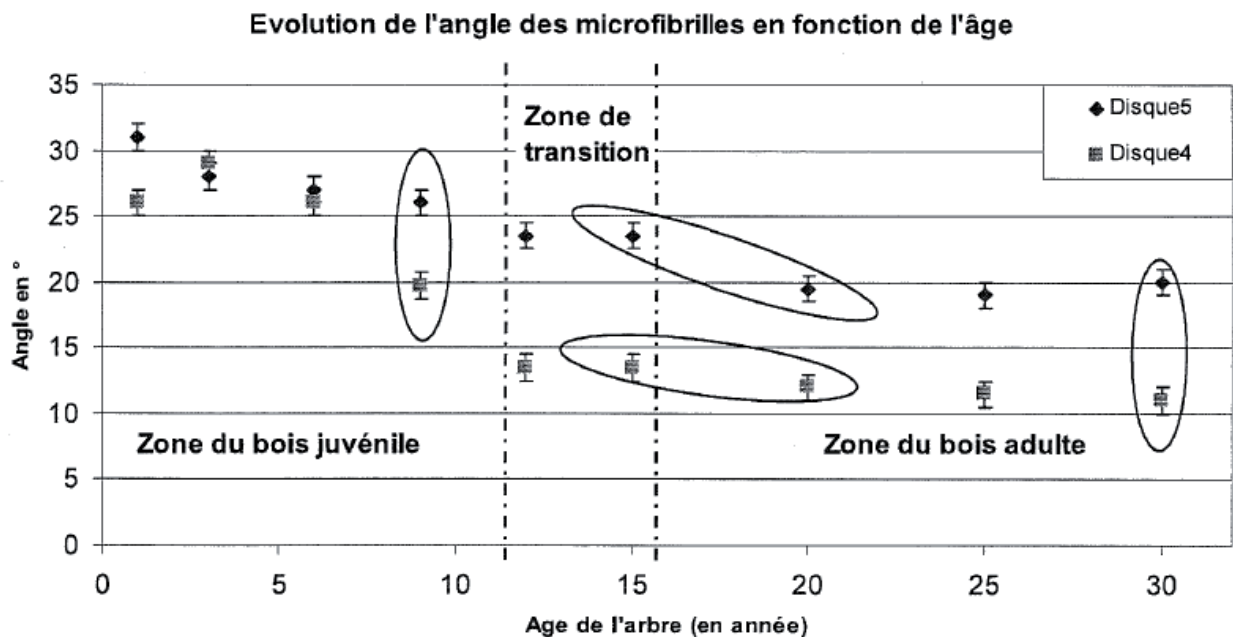


Figure 1.22 : Angle des microfibrilles en fonction de l'âge de l'arbre de Douglas [Outahyon, 2008]

Selon la direction radiale, l'angle des microfibrilles change de 31° à 19° pour le disque 5 (Figure 1.22) et de 29° à 11° pour le disque 4. Suite à cette variation, la rondelle du bois est divisée en 3 zones différentes : zone du bois juvénile, zone de transition et zone du bois adulte. L'angle de microfibrilles varie beaucoup dans la zone du bois juvénile alors qu'elle est plus stable dans la zone du bois adulte. Généralement, on peut dire que la transition juvénile/adulte se produit entre 10 et 15ans ; avant 10 ans on est dans le bois juvénile et après 15 ans, on est dans la zone du bois adulte.

ii. A l'échelle des tissus

Dans un cerne annuel, le bois initial et le bois final présentent des différences au niveau anatomique et mécanique. Ces différences sont dues à la vitesse de l'accroissement secondaire qui est décidé par le changement de climat durant toute l'année.

Farruggia [2000] a testé des propriétés élastiques de l'épicéa dans ses travaux de recherche. Il a trouvé des grandes différences entre ces deux zones. Dans la direction radiale, le bois d'été présente un module d'élasticité ainsi qu'un coefficient de Poisson fortement différents par

rapport ceux dans le bois de printemps : $E_R=1230$ MPa et $\nu_{RT}=0.39$ dans le bois d'été et $E_R=744$ MPa et $\nu_{RT}=1.13$ dans le bois de printemps.

Les différences des propriétés mécaniques du bois s'expliquent par la différence de la densité entre le bois initial et le bois final dans un cerne, et entre les cernes différents.

Nepveu [1994] montre que les effets « âge compté depuis la moelle » et « largeur de cerne » constituent deux sources prépondérantes de variabilité de la densité du bois dans un cerne ou dans un groupe de cerne. Les résultats de Huber [1991], présenté dans la Figure 1.23, permettent de dessiner des tendances générales

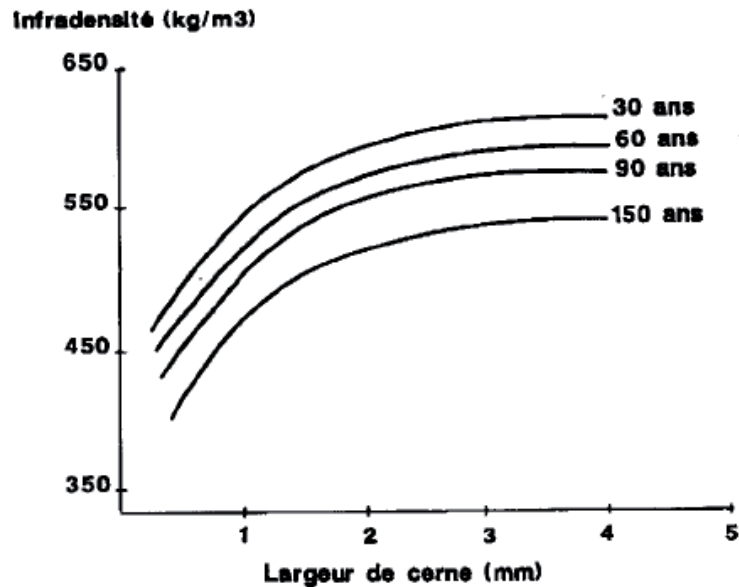


Figure 1.23 : Effets de la largeur de cerne à age depuis la moelle fixe et de l'âge à la largeur de cerne fixée sur la densité du bois de chêne (*Quercus petraea* et *Quercus robur*). Niveau intraarbre [Huber, 1991 cité dans Nepveu, 1994]

L'infradensité du bois de chêne, à âge égale, est nettement favorisée par un accroissement de la largeur de cerne. En effet, lorsque la largeur de cerne augmente, le bois de feuillus produit plutôt du bois d'été qui est plus dense. A l'inverse, une accélération de la croissance des cernes s'accompagne, chez les résineux, d'une forte augmentation de la proportion de bois de printemps.

L'effet âge depuis la moelle, considéré indépendamment de la largeur de cerne, se traduit par une diminution de l'infradensité en fonction de l'augmentation de l'âge. Dans le cas des résineux, cet effet s'estompe dès la production de bois mature soit généralement avant 20 ans. Pour les feuillus, cet effet persiste très longtemps après la limite du bois juvénile identifié sur le bois des résineux [Nepveu, 1994].

De manière générale, cet auteur dit que l'effet largeur de cerne prédomine sur l'effet âge pour les résineux. Ceci explique pourquoi les premiers cernes produits sont moins denses que ceux mise en place ultérieurement.

Pour les feuillus, ses deux effets sont convergents si bien qu'on retrouve le bois le plus dense au voisinage de la moelle de l'arbre.

III. Relations entre structure et comportement mécanique du bois

1. Echelle des tissus - Agencement cellulaire du bois dans le plan transversal

La structure du bois peut-être définie à différentes échelles spatiales. Il existe une dizaine de niveau structural différent entre le niveau macroscopique (tronc d'arbre) et le niveau moléculaire du bois (Navi, 2005). Dans le cadre de ce travail, nous nous intéresserons à l'agencement cellulaire du bois à l'échelle des tissus, qui joue un rôle important dans le comportement mécanique du bois, surtout dans le plan transversal.

a. Résultats expérimentaux

De nombreux travaux [Gillis, 1972 ; Farruggia, 1998 ; Navi, 2005], ont montré que le bois est plus rigide dans le domaine élastique selon la direction radiale que selon la direction tangentielle. Par exemple, Badel [1999] a mesuré lors d'essais en traction la rigidité transversale de tissus du bois de chêne : dans la zone initiale poreuse, $E_R=450$ MPa et $E_T=320\pm 85$ MPa ; dans la plage de parenchyme longitudinal (constituée de cellules de parenchyme longitudinal et de petits vaisseaux, densité ~ 800 kg/m³; cf. Figure 1.5), $E_R=1700\pm 450$ MPa et $E_T=850\pm 110$ MPa.

Par contre, dans la zone plastique et de rupture, cette dominance n'existe pas toujours. Le module de rupture du bois selon la direction radiale est plus faible que celui selon la direction tangentielle. Cette observation est confirmée par les travaux de Easterling et al., 1982 ; Roussel, 1997 cité dans Navi, 2005.

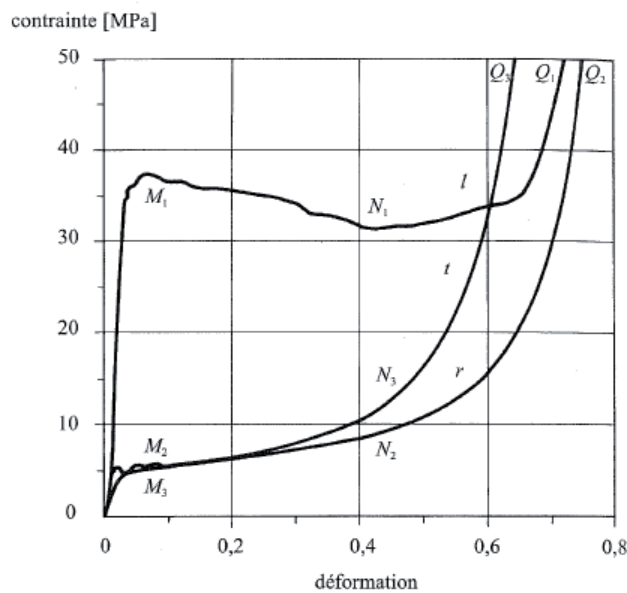


Figure 1.24 : Courbe contrainte-déformation d'une éprouvette de peuplier (densité =0.35) de dimension 25x25x5 mm³ en compression simple suivant les directions l, r et t (courbe M₁, M₂ et M₃) à vitesse de déplacement contrôlée de $v=1$ mm/mn [d'après Roussel, 1997 cité dans Navi, 2005]

Dans la Figure 1.24, au début de la courbe σ - ϵ , E_R est bien supérieur à E_T mais à la fin de cette courbe l'inégalité s'inverse.

Ce phénomène peut-être expliqué par le rôle des rayons ligneux et de l'agencement cellulaire du bois dans le plan transversal :

- Au début de la courbe σ - ε , la force sollicitée est assez faible, les rayons ligneux résistent et ils peuvent bien supporter cette contrainte imposée dans le sens radial. D'autre part, le module d'Young du bois dans le sens radial est plus élevé que celui dans le sens tangentiel car la contrainte de traction/compression (ce qui apparaît dans le sens radial) est plus importante que celle de flexion (ce qui apparaît dans le sens tangentiel) de paroi cellulaire [Gillis, 1972].
- A la fin de la zone de plasticité ou au début de la zone de densification, les rayons ligneux ont flambé, ils ne peuvent plus porter la sollicitation. Durant cette période, l'agencement cellulaire du bois s'occupe une place beaucoup plus importante. Chez les résineux, les parois radiales des cellules s'assemblent comme des poutres droites et longues (cf. Figure 1.25 et Figure 1.26). Cette structure perd rapidement sa stabilité par l'effet de flambement quand la force sollicitée est suffisamment importante. Donc, son comportement mécanique est plus faible par rapport à la structure des carrées présentée dans la direction tangentielle, ce qui est plus stable.

b. Structure en nid d'abeille

Dans la littérature, plusieurs chercheurs [Gibson et Ashby, 1997 ; Farruggia, 1998] ont utilisé la composition de nid d'abeille pour exprimer la structure des matériaux solides. Les cellules sont normalement hexagonales, comme un nid d'abeille, mais peuvent être en forme de triangle, de carrée, etc. Dans le cas du bois des résineux, la composition d'un nid d'abeille avec des cellules hexagonales est choisie pour la modélisation sa structure dans le plan transversal à l'échelle des tissus.

Lors des chargements dans le plan transversal, quand on dépasse le seuil d'élasticité du bois, il apparaît de temps en temps une rupture locale dans les zones les plus faibles. La Figure 1.26 montre qu'à ces ruptures locales, il y a encore des cellules qui restent à leur forme géométrique initiale.

En comparant la déformation transversale du bois observée pour une sollicitation dans la direction tangentielle ou radiale (Figure 1.25 et Figure 1.26), on constate que :

- la direction tangentielle est beaucoup plus homogène que la direction radiale, les cellules sont déformés pratiquement de la même façon. La raison principale est l'agencement cellulaire discuté précédemment.

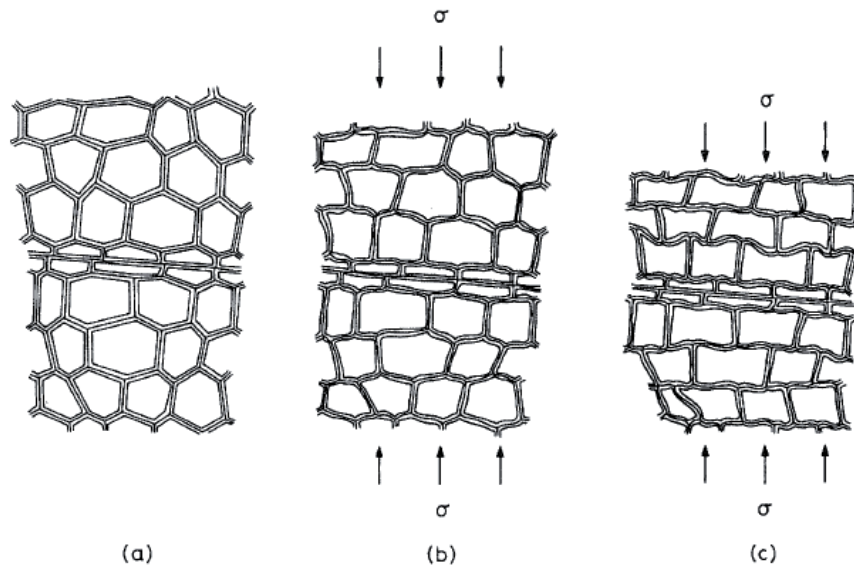


Figure 1.25 : Schéma de la déformation des cellules de bois pour une sollicitation selon la direction tangentielle : (a) pas de chargement ; (b) flexion des parois cellulaires dans le domaine élastique ; (c) rupture des cellules uniforme dans le domaine plastique [Gibson, 1997]

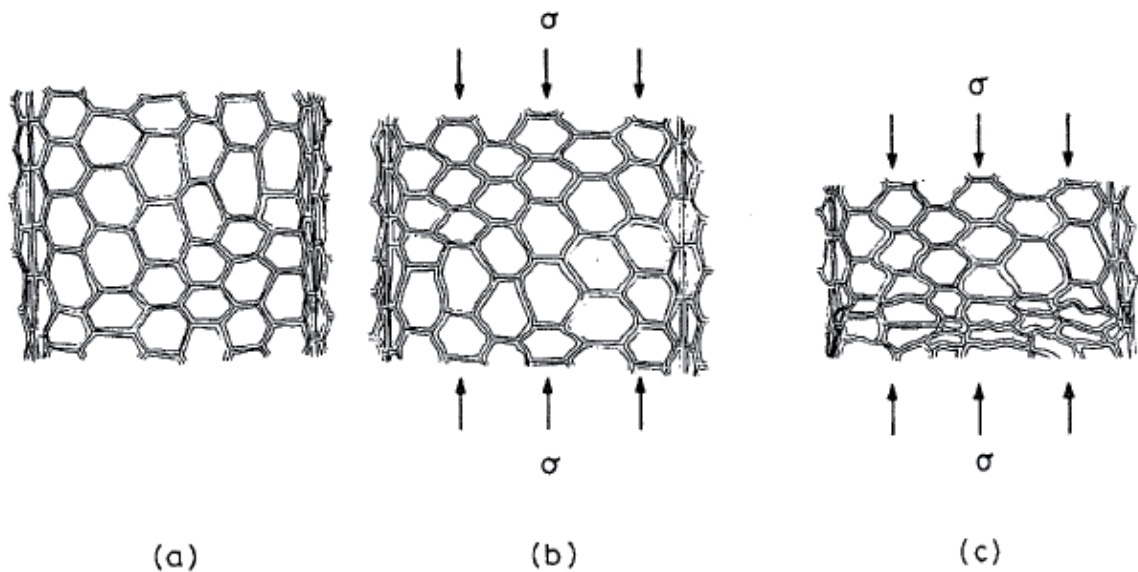


Figure 1.26 : Schéma de la déformation des cellules de bois pour une sollicitation selon la direction radiale : (a) pas de chargement ; (b) flexion des parois cellulaires dans le domaine élastique ; (c) rupture des cellules non-uniformes dans le domaine plastique [Gibson, 1997]

Gibson [1997] a confirmé pour le balsa la différence entre ces deux directions par des courbes de déformation en fonction de la contrainte (Figure 1.27).

Le seuil d'élasticité du bois dans la direction radiale est plus élevé que celui dans la direction tangentielle (1.5 GPa par rapport 1 GPa). Pourtant, dans le cas d'un chargement, les cellules sont déformées dès le début du domaine de plasticité, soit $\epsilon \sim 0.02$. Dans le cas de chargement tangential, les cellules gardent la forme presque initiale jusqu'à $\epsilon \sim 0.2$

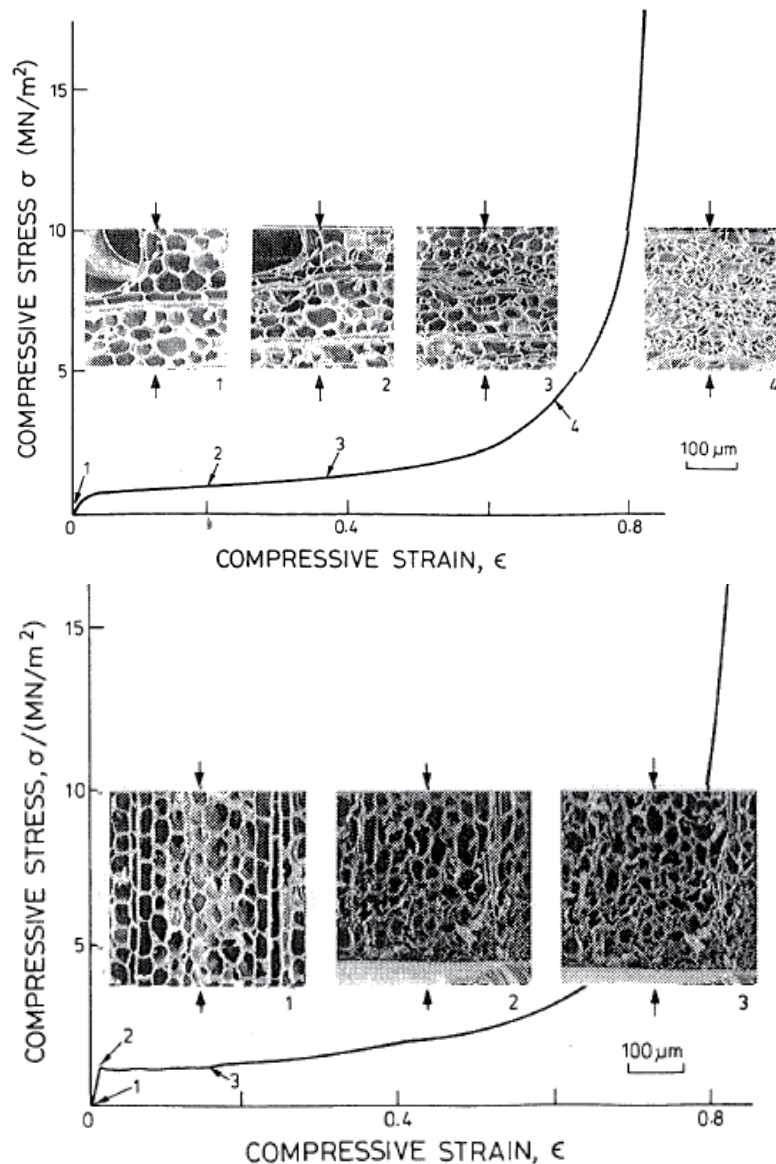


Figure 1.27 : Courbes contrainte-déformation du balsa, chargement selon la direction tangentielle (en haut) et selon la direction radiale (en bas) [Gibson, 1997]

2. Echelle de la paroi

a. Modélisation de la forme de cellule

Précédemment, nous avons discuté de l'effet de l'arrangement cellulaire du bois sur son comportement mécanique. Parallèlement, il a été démontré que la forme géométrique de la cellule influe directement sur sa résistance, et sur le comportement mécanique intrinsèque du bois. Watanabe [2002] a trouvé qu'une cellule symétrique est plus résistante qu'une cellule antisymétrique.

i. Cellule symétrique

Les cellules des conifères sont assez régulières et elles sont modélisées souvent sous la forme hexagonale par plusieurs auteurs [Boutelje, 1962 ; Farruggia, 1998 ; Watanabe, 2002]. Dans la Figure 1.28 représentée par Watanabe [2002], T est la longueur axiale de la paroi cellulaire

tangentielle ; R est la longueur axiale de la paroi cellulaire radiale ; θ est l'angle d'élément et t est l'épaisseur de la paroi cellulaire.

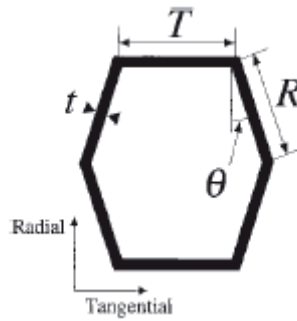


Figure 1.28 : Forme géométrique et paramètres du modèle d'une cellule [Watanabe, 2002]

D'après Gibson [1997], l'épaisseur « t » est calculée par la formule :

$$\frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{(t/R)(T/R + 2)}{2(T/R + \sin \theta) \cos \theta}$$

Avec γ est la densité du bois ; γ_w est la densité de la paroi cellulaire. D'après Koponen [1989], $\gamma_w=1500 \text{ kg/m}^3$. Précisément, Norimoto [1978] cité dans Watanabe [1999] confirme que $\gamma_w=1.43 \text{ g/cm}^3$ à 20°C et 60% R.H.

A partir des paramètres déterminés ci-dessus, Watanabe [2002] propose des équations pour calculer le module d'Young E_T et E_R de ce modèle :

$$E_T = \left[\frac{\cos \theta (2T/R + \sin^2 \theta)}{(t/R)(T/R + \sin \theta) E_a} + \frac{\cos^3 \theta}{(t/R)^3 (T/R + \sin \theta) E_b} \right]^{-1}$$

$$E_R = \left[\frac{(T/R + \sin \theta) \cos \theta}{E_a (t/R)} + \frac{(T/R + \sin \theta) \sin^2 \theta}{E_b (t/R)^3 \cos \theta} \right]^{-1} \quad (3)$$

Ici, E_a et E_b sont les modules d'Young axial et de flexion de la paroi cellulaire dans la direction périmétrique. D'après Watanabe [1999], E_a et E_b sont déterminés à 14.3 GPa et 15.6 GPa environ.

Un des résultats de Watanabe [2002] est montré dans la Figure 1.29

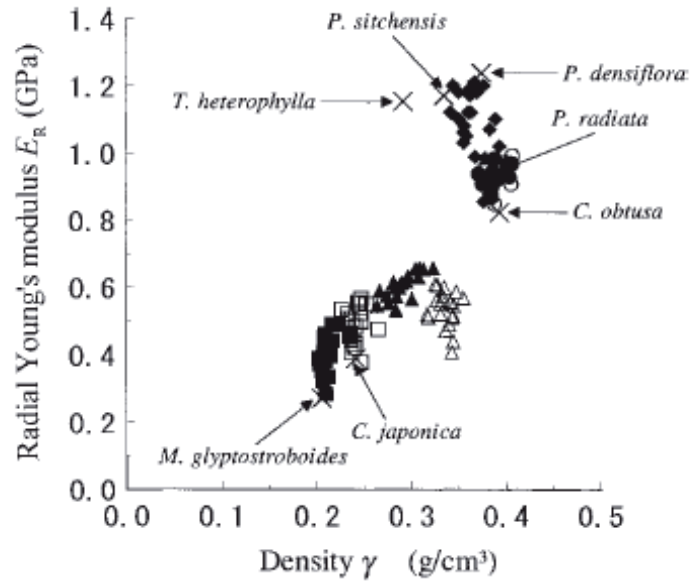


Figure 1.29 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées en utilisant l'équation (3) (les croix) pour 7 espèces : \square = *Cryptomeria japonica* ; \circ = *Chamaecyparis obtusa* ; \blacksquare = *Metasequoia glyptostroboides* ; \triangle = *Picea sitchensis* ; \blacklozenge = *Pinus densiflora* ; \bullet = *Pinus radiata* ; \blacktriangle = *Tsuga heterophylla*. [Watanabe, 2002]

Grâce à cette démonstration, on trouve que les résultats calculés (les croix) et les résultats expérimentaux ne sont pas vraiment cohérents pour les 7 espèces de bois considérées. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées :

- Premièrement, il est difficile d'avoir des cellules qui sont orientées exactement selon un des axes du repère de référence de l'échantillon. Par exemple la direction nommée « radiale » de la cellule est souvent inclinée par rapport la direction radiale de l'échantillon. Watanabe [2002] estime que cette inclinaison est environ de 3° à 4° et cette erreur influe naturellement sur le résultat de calcul.
- Deuxièmement, on trouve que la déformation de la cellule dans ce modèle est la somme des résultats de flexion et de la déformation axiale, dans la direction radiale par exemple. Quand le ratio t/R est petit, l'équation (3) peut être appliquée pour calculer E_R mais quand il est grand, le phénomène de cisaillement apparaît et influe sur la déformation totale. Dans cet exemple, l'auteur confirme que le ratio t/R n'est pas assez petit pour ignorer le phénomène de cisaillement.
- Troisièmement, c'est le problème de la forme symétrique du modèle de la cellule. Dans la réalité, les cellules du bois sont souvent asymétriques. Quand une cellule asymétrique est chargée, elle se déforme par rotation et des contraintes de cisaillement apparaissent dans la paroi. Le module d'Young apparent dans ce cas est plus faible que celui dans le cas d'une cellule symétrique.

ii. Cellule antisymétrique

Simon [2009] a modélisé une cellule de bois sous la forme antisymétrique par 6 paramètres principaux, précisés dans la Figure 1.30

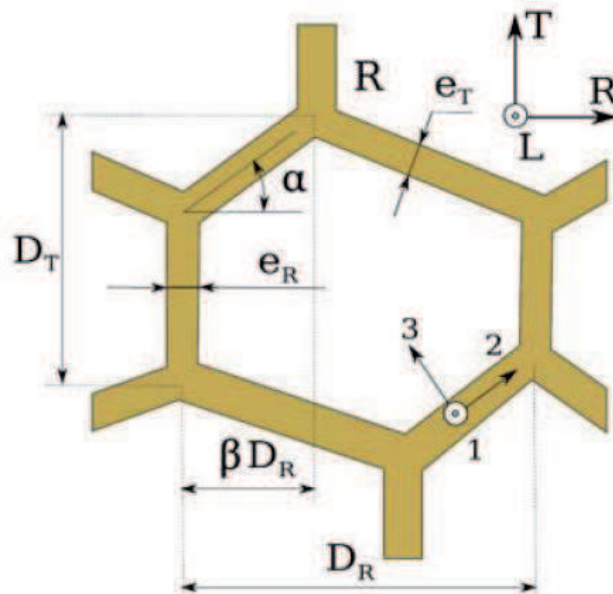


Figure 1.30 : Modèle géométrique des cellules : 6 paramètres indépendants : 4 dimensions D_R , D_T , e_R , e_T et 2 paramètres géométriques α et β [Simon, 2009]

D_R : largeur radiale ou diamètre radial

D_T : largeur tangentielle ou diamètre tangentiel

e_R : épaisseur radiale des doubles parois

e_T : épaisseur tangentielle des doubles parois

α : angle entre la direction radiale et la paroi radiale de gauche

β : facteur qui caractérise le croisement entre les cellules de 2 rangées radiales adjacents : si les cellules se croisent en leur milieu, alors $\beta=1/2$ et si les parois tangentielles sont alignées, alors $\beta=0$ ou $\beta=1$.

Avec ces paramètres, on approche la configuration des cellules les plus courantes.

Pour la caractérisation de la variation géométrique des cellules dans un cerne, Simon [2009] a proposé un modèle basé sur les résultats de Gachet [2003], présenté à la Figure 1.31

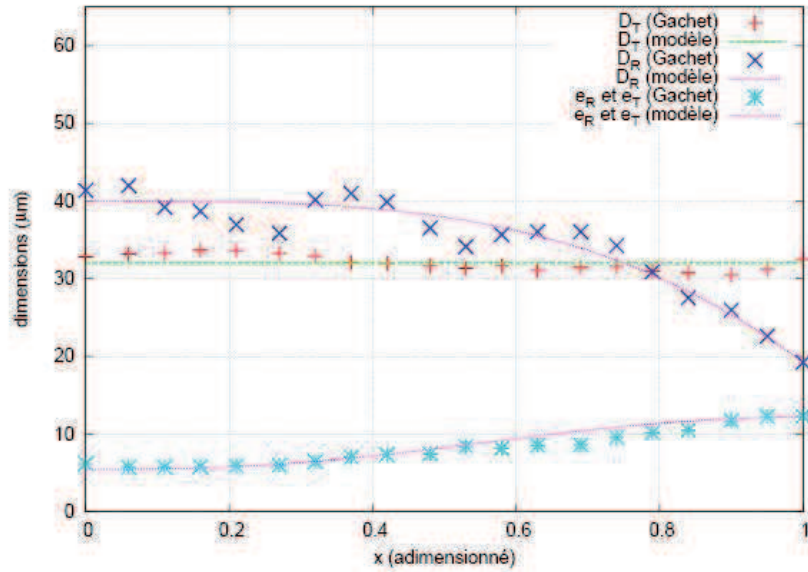


Figure 1.31 : Morphologie suivant la largeur d'un cerne des cellules d'épicéa donnée par Gachet [2003] et le modèle de Simon [2009]

Suite à cette démonstration, on trouve que selon la largeur d'un cerne, le diamètre radial baisse de moitié entre le début d'année et la fin d'année, $D_R^{\text{printemps}} \sim 2D_R^{\text{été}}$. Par contre, l'épaisseur de la paroi cellulaire augmente d'environ 2 fois, $e^{\text{printemps}} \sim \frac{1}{2} e^{\text{été}}$, le diamètre tangential étant constant dans tout l'accroissement.

Par les calculs analytiques basés sur ce modèle, il a trouvé des résultats comparables avec les autres auteurs [Farruggia et Perré, 2000] ou avec les résultats expérimentaux sur l'épicéa du Bugey à 12% H.R.

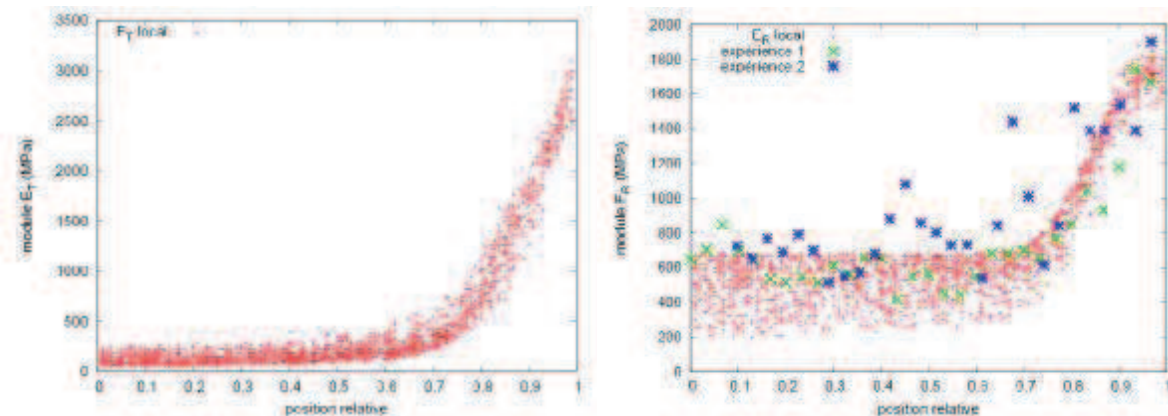


Figure 1.32 : Evolution du module tangentiel et radial local calculé en fonction de la position radiale relative dans le cerne. Comparaison avec des essais de compression sur l'épicéa du Bugey [Simon, 2009]

Dans la Figure 1.32, on constate que la variation de module d'Young local dans la direction tangentielle est plus élevée que celle dans la direction radiale. Le rapport $E_R^{\text{été}}/E_R^{\text{printemps}}$ est de l'ordre de 3 à 4, tandis que le rapport $E_T^{\text{été}}/E_T^{\text{printemps}}$ peut atteindre 20.

D'autre part, le module d'Young local du bois d'été dans la direction tangentielle est plus important que celui dans la direction radiale (3000 MPa par rapport 1800 MPa). Ceci peut être expliqué par la quantité de matière ligneuse selon chaque direction. A la fin de la zone de bois

d'été (bois final), la cellule est allongée selon la direction tangentielle. Suite à la Figure 1.33, on trouve que la matière ligneuse dans la coupe A-A (coupe tangentielle) est plus que celle dans la coupe B-B (coupe radiale). C'est-à-dire que dans ce cas-là, le bois est plus résistant selon la direction tangentielle.

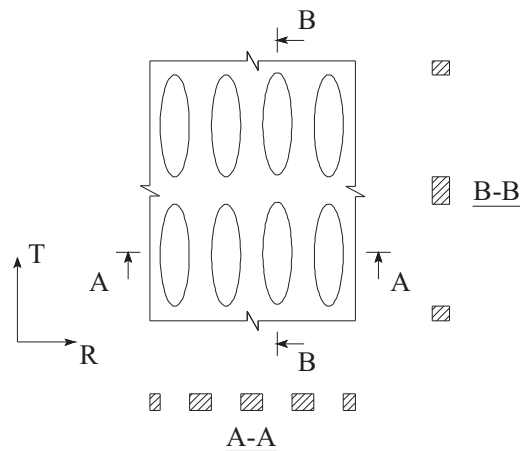


Figure 1.33 : Quantité de matière ligneuse selon la direction tangentielle (coupe A-A) et selon la direction radiale (coupe B-B)

Par ailleurs, au sein d'un accroissement annuel, le module d'Young moyen dans la direction radiale est toujours plus grand que celui dans la direction tangentielle, présenté à la Figure 1.34

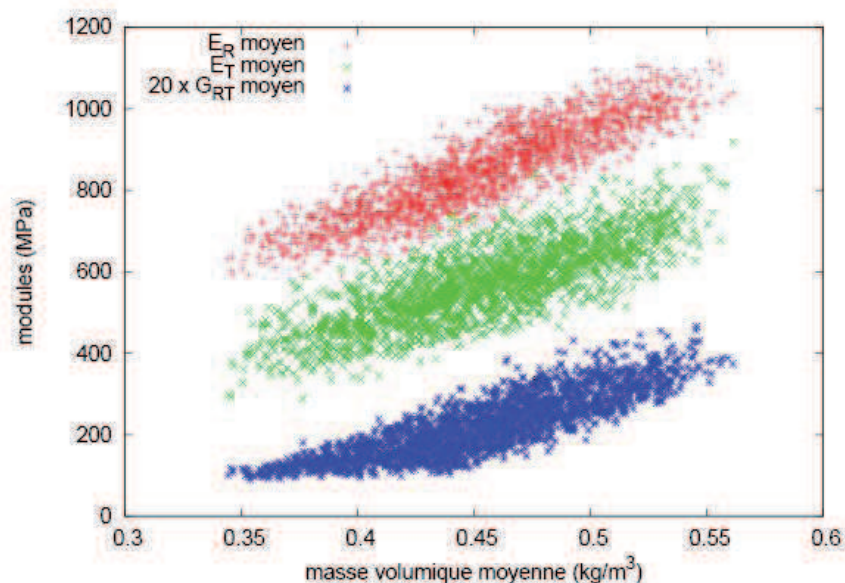


Figure 1.34 : Nuages des modules de 2000 cernes en fonction de leur masse volumique [Simon, 2009]

b. Couche G dans le bois de tension

Le bois de tension possède souvent un comportement qui est différent à celui du bois normal. De fortes contraintes de croissance de traction apparaissent à la surface du xylème dans la zone du bois de tension, elles peuvent être dix fois plus grandes que celles dans la zone du bois normal [Yamamoto, 2004]. Le module d'élasticité (module d'Young) du bois de tension devient beaucoup plus élevé que celui du bois normal, varie de 2 fois [Thibaut, 2001] à 3 fois [Yamamoto, 1992]. En outre pour les hygrovariations, le retrait axial total du bois de tension tend à dépasser la valeur de 1% [Yamamoto, 1992], tandis que celui du bois normal devient

inférieur à 0.5%. Certain auteur attribuent ces comportements aux propriétés intrinsèques de la couche G [Okuyama, 1990].

Un caractère extrêmement important qui influe la résistance du bois de tension est la teneur en cellulose dans la couche G. Elle est importante et plus élevée de 40% à 50% [Keller 1994] voir même jusqu'à 80% [Yamamoto 2004]. A cause de cette raison, le comportement mécanique du bois de tension dans le sens longitudinal est plus renforcé. Quelques résultats de caractéristiques de la couche G dans le bois de tension sont présentés dans le Tableau 1.5:

	Location	$\varphi(^{\circ})$	Cristalline cellulose (%)
CML	$r=r_0\sim r_1$		15
S ₁	$r=r_1\sim r_2$	90	15
S ₂	$r=r_2\sim r_3$	ϕ	30
G	$r=r_3\sim r_4$	0	
Cas 1			40
Cas 2			60
Cas 3			80

Tableau 1.5 : Angle de microfibrille (φ°) et teneur en cellulose de la couche G dans le bois de tension [Yamamoto, 2004]

La constitution des couches dans le bois de tension est illustrée dans la Figure 1.35:

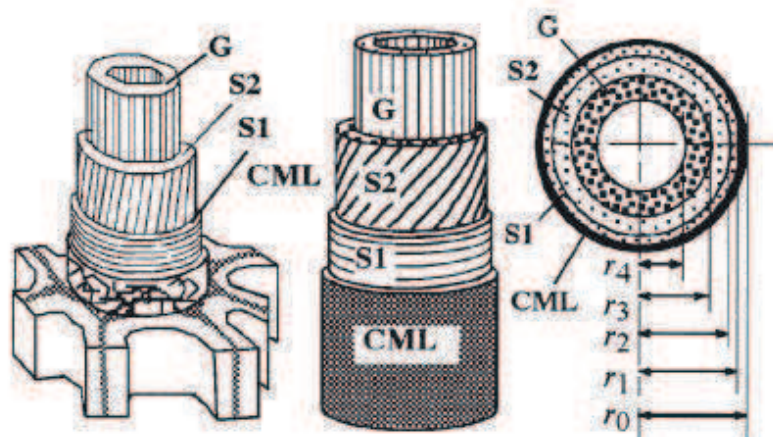


Figure 1.35 : Constitution de la couche G et les sous couches S₁, S₂ dans la structure pariétale du bois de réaction [Yamamoto, 2004]

Par ailleurs, dans le plan transversal, la couche G est convolutée. C'est à dire que cette couche est faiblement attachée à la paroi secondaire [Kollmann, 1984], elle peut être facilement décollée de la paroi cellulaire. (Figure 1.36).

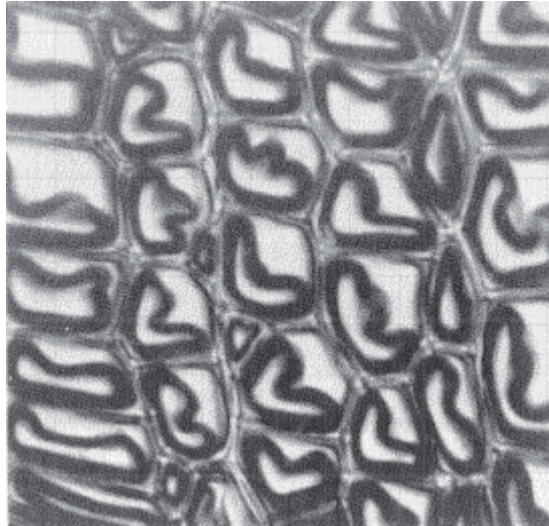


Figure 1.36 : Section transversale du peuplier de tension représentant la couche G déplacée dans les même sens en passant le microtome [Kollmann, 1984]

D'après *Scurfield et Waldrop (1962) dans Kollmann 1984*, ces convolutions sont représentatives des divers stades de développement de la formation de la paroi cellulaire. Pourtant, cette convolution peut apparaître dans les cellules matures chez quelques espèces. Si une fibre de bois de tension est observée avant qu'elle soit complètement développée, cette convolution est remarquable. Dans plupart des espèces, comme la formation de la paroi cellulaire se poursuit, ces convolutions sont réduites ou disparaissent et les couches s'aplatissent contre la paroi existante.

De plus, des auteurs considèrent que les variations des caractéristiques du bois de tension ne devraient pas être attribuées à la couche G mais à une couche externe plus épaisse de la sous couche S_1 [Boyd, 1977], et/ou à une couche intermédiaire plus fine de la sous couche S_2 , dont l'angle des micro-fibrilles devrait être plus ou moins différent de celui du bois normal. Celle-ci est précisée dans le travail d'Yamamoto [1992], l'angle des microfibrilles de la sous couche S_2 du bois de tension est plus faible que celui du bois normal, $23,1^\circ$ chez le bois de tension par rapport à $27,2^\circ$ chez le bois normal.

Il est difficile d'émettre des conclusions exactes sur les caractéristiques mécaniques de la couche G et de la paroi lignifiée, qui demande d'isoler les deux. Pourtant, on peut considérer que la lignine dans la couche G serait essentiellement la même que celle dans le bois normal parce qu'il n'y a pas de différences spécifiques dans les aspects anatomiques et chimiques des deux [Okuyama, 1990]. Par ailleurs, on peut dire aussi que la lignine est présente dans S_1 (et S_2 quand cette couche existe) et sa concentration est plus importante que dans le bois normal [Keller, 1994].

3. Echelle des macromolécules - Cellulose cristalline

La paroi cellulaire des trachéides est constituée par des celluloses, hémicelluloses et lignines. D'après Bergaden [2002], la structure des celluloses est beaucoup plus résistante par rapport aux autres composants. Son module d'Young est de l'ordre de 20 fois plus élevé par rapport celui des hémicelluloses, et de 30-60 fois plus élevé en comparant avec celui des lignines. On peut alors dire que la cellulose joue un rôle très important sur le comportement mécanique du bois.

a. Structure cristalline et amorphe de la cellulose

La cellulose est la matière la plus répandue dans la nature. Elle représente environ 45-50% de la composition chimique de bois [Navi, 2005]. Dans chaque fibrille élémentaire, il y a 50-80

molécules de la cellulose qui sont principalement parallèles à l'axe des fibres [Bodig et Jayne, 1982]. La cellulose est schématisée par une zone de cristalline (C), liée avec une autre zone moins dense et moins ordonnée, dite zone amorphe (A), présentée à la Figure 1.37

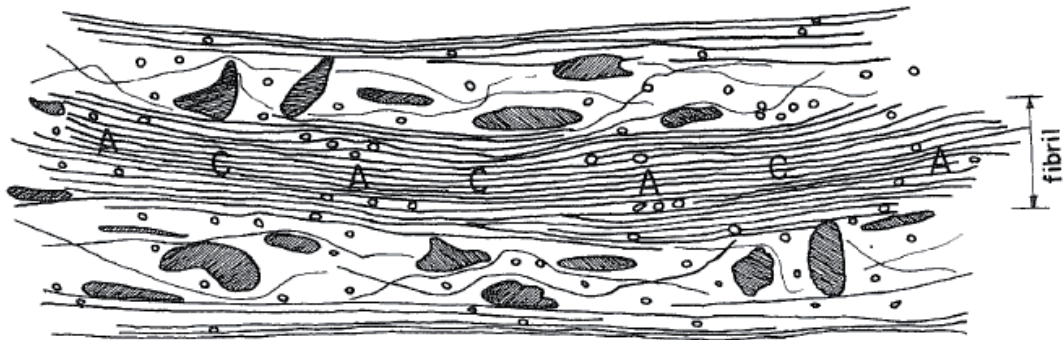


Figure 1.37 : Section longitudinale d'un élément de fibre, présentée la zone de cristalline (C) et d'amorphe (A) de la cellulose [Bodig et Jayne, 1982]

b. Conversion de la cellulose cristalline

D'après O'Sullivan [1997], il y a six polymorphes de cellulose : I, II, III_I, III_{II}, IV_I, IV_{II} et un passage de l'un à l'autre est possible (Figure 1.38)

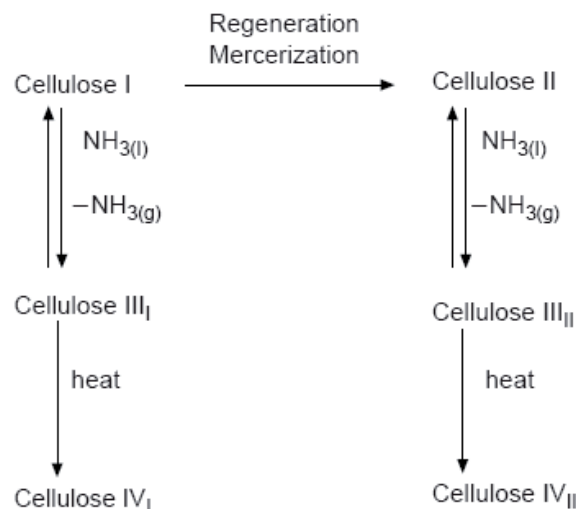


Figure 1.38 : Transformation des polymorphes de cellulose [O'Sullivan 1997]

Manhofer [1996] a également confirmé que la transformation de la cellulose I à la cellulose II peut-être expliquée par le réarrangement de l'angle de rotation de la chaîne autour des liaisons glycosidiques ainsi que les ponts hydrogènes qui connectent les chaînes de cellulose.

c. Cellulose type I : I_α et I_β

Puisque la cellulose cristalline peut changer d'état entre ses différents polymorphes, nous présentons dans ce travail le type de cellulose le plus connu, celui de la cellulose de type I.

La cellulose naturelle cristallise sous deux formes polymorphiques I_α et I_β [Navi, 2005]. Plusieurs auteurs ont travaillé pour mieux comprendre leur structure et leurs différences [Hardy, 1996 ; Heiner, 1996]. D'après Hardy [1996], la phase I_α est prédominante dans la cellulose bactérienne et la structure I_β existe plutôt dans les plantes telles que la ramie ou le coton. De plus, I_α peut être converti en I_β lorsque la température atteint 260°C et dans une ambiance alcaline, ou à 280°C dans l'atmosphère de He.

Pour illustrer la structure de la cellulose I_α et I_β , Navi [2005] a donné des polymorphes (Figure 1.39) dont la cristalline I_α est triclinique et I_β est monoclinique

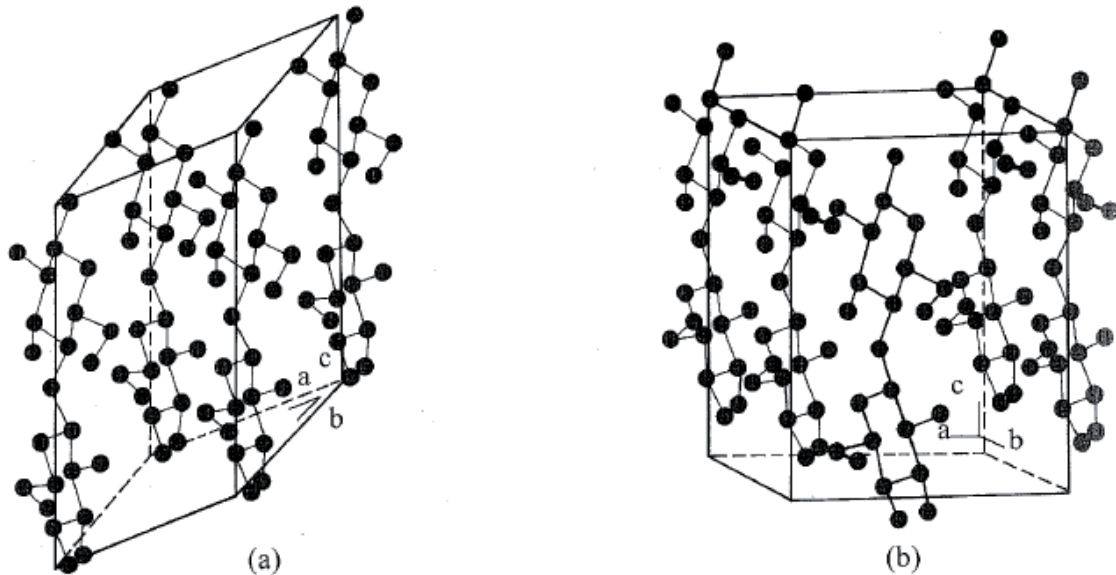


Figure 1.39 : Structure cristalline de la cellulose I_α triclinique (a) et I_β monoclinique (b) [Navi, 2005]

Dans la Figure 1.39, la forme α est indexée par une maille triclinique à une chaîne avec $a=0.674$ nm, $b=0.593$ nm, $c=1.036$ nm (axe de la chaîne), $\alpha=117^\circ$, $\beta=113^\circ$, $\gamma=81^\circ$. La forme β est caractérisée par une maille à deux chaînes avec $a=0.801$ nm, $b=0.817$ nm, $c=1.036$ nm (axe de la chaîne), $\alpha=\beta=90^\circ$, $\gamma=97.3^\circ$. Cet auteur confirme aussi que la densité de la maille triclinique (cellulose I_α) est un peu plus légère par rapport la maille monoclinique (cellulose I_β) : 1.582 g/cm³ par rapport 1.599 g/cm³. Ce résultat est comparable avec celui d'O'Sullivan [1997] : 1.59 g/cm³ pour le cas général de cellulose cristalline.

Pour caractériser la rigidité de la cellulose cristalline, Marhofer [1996] a simulé une structure mixte de 65% de cellulose I_α et de 35% de cellulose I_β à la température 300°K, le résultat calculé est de 134 GPa par rapport au 137 GPa obtenu expérimentalement par Sakurada [1962].

En déterminant le module d'Young en fonction de la cristallinité de la cellulose, McCullough et al. [1976] ont fait des calculs, appliqué sur le chanvre et le lin (Figure 1.40)

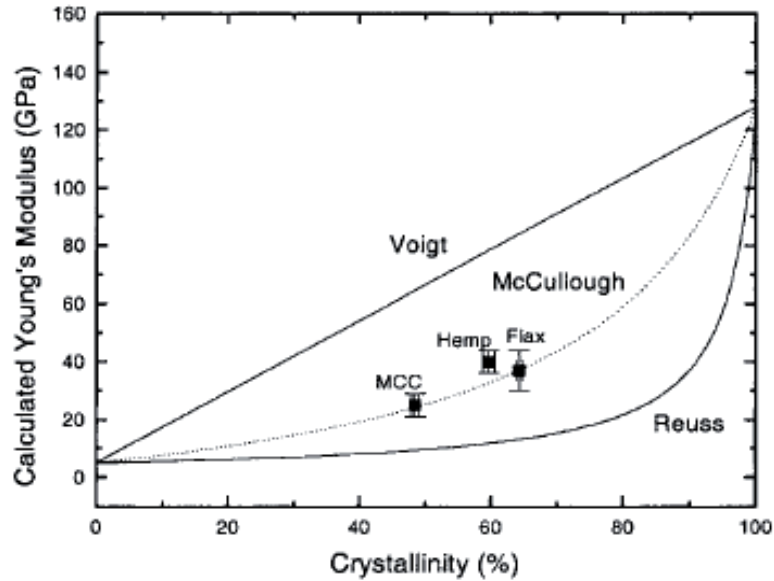


Figure 1.40 : Relation entre le module d'Young calculé et la cristallinité de microcristalline cellulose de chanvre et de lin. Les lignes solides montrent le comportement prédit du modèle Voigt (contrainte plane) et Reuss (déformation plane) ; la ligne pointillée montre la courbe de tendance de McCullough [McCullough et al., 1976 cité dans Eichhorn, 2001].

Sur cette figure, nous voyons, le module d'Young atteint une valeur de 128GPa environ pour un taux de cristallinité de 100%, ce qui est comparable avec les résultats d'autres auteurs.

IV. Conclusion

Les quelques pages de ce chapitre montrent des connaissances générales sur l'anatomie ainsi que la mécanique du bois, principalement sur le bois d'épicéa et le bois de peuplier.

A l'échelle microscopique (échelles des tissus et échelle de la paroi), la microstructure joue un rôle très important, elle détermine la résistance mécanique du matériau bois et son anisotropie.

Les chapitres suivants présenteront les essais mécaniques réalisés dans ce travail de thèse pour approfondir la relation structure/propriétés mécaniques du matériau.

Chapitre 2 Méthodes et matériels

I. Méthode

1. Mesure du Module d'Young dans la direction longitudinale du peuplier – Micro flexion 4 points

Parmi les trois directions du bois, la direction longitudinale est d'une grande importance, car c'est la direction qui permet d'en faire un matériau de structure. Le module d'élasticité dans cette direction peut atteindre jusqu'à 9.5 GPa pour le peuplier à 12% taux d'humidité à l'échelle de poutre [Guitard 1987]. A l'échelle macromolécule, le module d'Young d'une structure de cellulose cristalline peut atteindre une valeur d'environ 137 GPa [Sakurada, 1962]. Comme la capacité de notre micro- machine d'essais est limitée à une centaine Newton, elle n'est pas suffisante pour tester le bois en traction dans cette direction. C'est pourquoi des tests en flexion quatre points sont choisis pour obtenir le module d'élasticité du bois dans la direction longitudinale.

a. Principe de la flexion 4 points

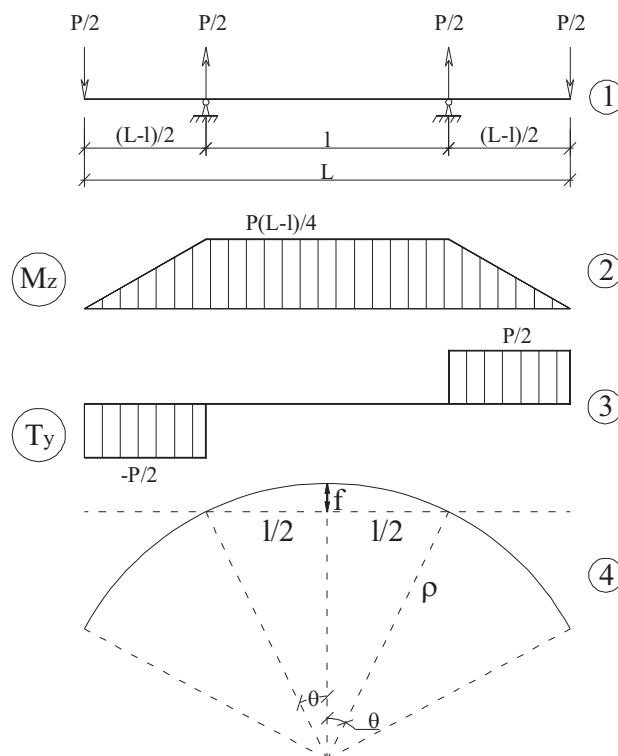


Figure 2.1 : Schéma de détermination de la flèche au milieu de l'échantillon dans l'essai de flexion quatre points.

Le module de Young (exprimé en MPa) est la quantité constante élastique qui, dans une direction donnée, lie la contrainte à la déformation. Il caractérise la raideur de la matière. Il a ici été mesuré à l'aide d'un dispositif de flexion 4 points mis au point spécialement pour des échantillons de forme 'poutres' de faibles dimensions (3 cm de long et de l'ordre du millimètre carré en section).

Principe :

La flexion quatre points permet de solliciter la poutre en flexion pure.

Le bâti se présente comme suit:

- Un banc intérieur de flexion constitué de deux appuis cylindriques horizontaux libres en rotation, distants d'une longueur l .
- Un banc extérieur comportant deux rouleaux cylindriques horizontaux, de même diamètre que les appuis intérieurs, distants d'une longueur L . Ce banc répartit symétriquement la charge totale de flexion P en deux charges égales, équidistantes des appuis intérieurs.

On considère un échantillon qui est soumis aux forces indiquées sur la Figure 2.1.

Dans cette figure, on voit que les réactions aux appuis ont pour valeurs $P/2$ car les appuis sont placés symétriquement.

Pour la détermination de l'allure de la courbe lorsqu'elle est soumise aux sollicitations, on étudiera de manière indépendante les contraintes et les déformations dans les trois parties. On effectue une coupe dans chacune de partie à une coordonnée x_i afin de déterminer les moments fléchissant et les efforts tranchants :

On obtient alors trois moments fléchissant distincts pour chacune des trois parties (diagramme 2) :

- Dans la zone où $0 < x < \frac{L-l}{2}$

$$\text{On a } M_f(x) = \frac{P}{2}x$$

- Dans la zone où $\frac{L-l}{2} < x < \frac{L+l}{2}$

$$\text{On a } M_f(x) = \frac{P(L-l)}{4}$$

- Dans la zone où $\frac{L+l}{2} < x < L$

$$\text{On a } M_f(x) = -\frac{P}{2}x + \frac{PL}{4}$$

L'effort tranchant est défini comme l'opposé du dérivé du moment fléchissant :

$$T_x = \frac{-dM_f(x)}{dx}$$

=> Les efforts tranchants à deux côtés extérieurs, en dehors de deux appuis, sont égaux à $-P/2$ (à gauche) et $P/2$ (à droite). Dans l'espace inférieur de deux appuis, ils sont nuls (diagramme 3).

On a vu que le moment fléchissant entre les appuis intérieurs est constant, et l'effort tranchant est nul. La flexion quatre points est donc un moyen simple d'éviter le cisaillement et d'obtenir de la flexion pure. Cela permet de déterminer le module de traction dans cette direction en ne considérant qu'un seul type d'effort.

Le rayon courbure de la poutre est inversement proportionnel au moment fléchissant :

$$\rho = \frac{EI}{M_f(x)}$$

Comme le moment fléchissant entre les deux appuis centraux est constant, il en est de même pour le rayon de courbure dans cette zone :

$$\rho = \frac{4EI}{P(L-l)}$$

Cette formule montre que la mesure du rayon de courbure dans la zone centrale permet d'accéder directement au module d'Young.

De cette formule, pour la détermination du module d'Young, on envisage de mesurer la flèche relative entre ces deux appuis, puis calcule la relation entre cette flèche f et le rayon de courbure ρ (diagramme 4) :

Les déformations étant petites, donc l'angle θ reste petit et on obtient les relations linéaires:

$$\sin \theta \approx \theta$$

$$\cos \theta \approx 1 - \frac{\theta^2}{2} = 1 - \frac{\sin^2 \theta}{2}$$

D'autre part, on a géométriquement :

$$\sin \theta = \frac{l}{2\rho}$$

$$\cos \theta = \frac{\rho - f}{\rho} \text{ Avec } f : \text{ flèche relative au milieu de la poutre.}$$

θ : rayon de courbure.

$$\Rightarrow \cos \theta \approx 1 - \frac{\sin^2 \theta}{2} = 1 - \frac{\left(\frac{l}{2\rho}\right)^2}{2} = \frac{\rho - f}{\rho}$$

$$\Rightarrow f = \frac{l^2}{8\rho}$$

On a calculé précédemment la relation entre le module d'Young et le rayon de courbure. On peut ainsi exprimer la flèche relative aux appuis intérieurs en fonction de ce module :

$$f = \frac{l^2(L-l)}{32EI}P \tag{1}$$

Grâce à la machine de flexion quatre points, on obtient la relation entre la flèche relative et la force appliquée, puis établit la formule entre ces deux valeurs :

$$f = \tan \alpha \cdot P \tag{2}$$

Avec α : l'angle de la droite expérimentale obtenue en reportant la flèche relative f en fonction de la force appliquée P .

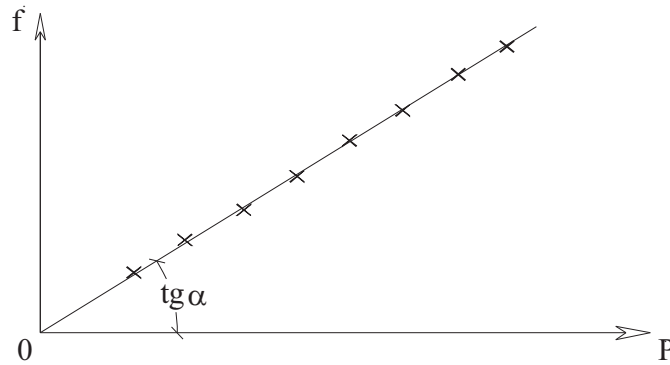


Figure 2.2 : Détermination l'angle α à l'aide du diagramme de la force en fonction de la flèche (diagramme P- f)

Des équations (1) et (2), on peut retirer la valeur du module d'Young :

$$\tan \alpha = \frac{l^2(L-l)}{32EI}$$

$$\rightarrow E = \frac{l^2(L-l)}{32I \cdot \tan \alpha}$$

b. *Protocole expérimental*

Après avoir débité les échantillons avec une épaisseur constante de l'ordre de 1 millimètre, l'essai de micro flexion quatre points est réalisé sur une micro machine conçue et développée au laboratoire (Figure 2.3).

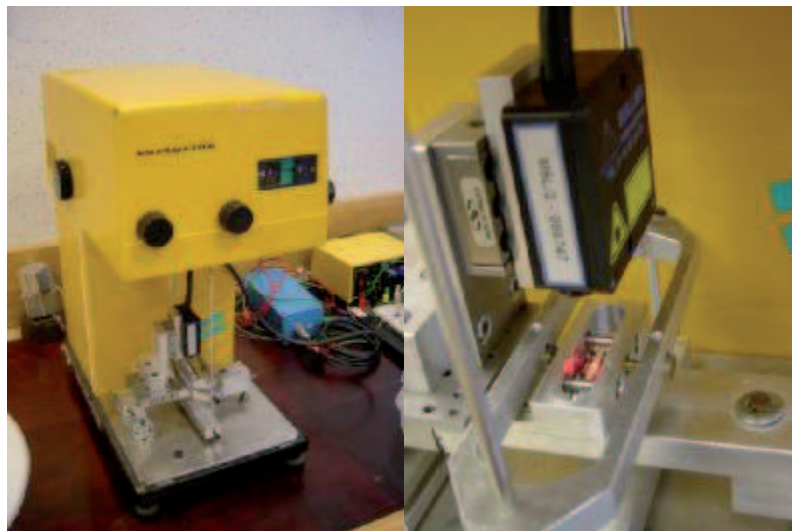


Figure 2.3 : Micro machine utilisée pour effectuer les essais de flexion quatre points.

L'échantillon de bois (de longueur L), qui peut être considéré comme une poutre, est mis sur deux cylindres fixes, libres de rotation. La force est appliquée sur l'échantillon via deux cylindres de mêmes diamètres séparés de la longueur (l) (Figure 2.4). La force est appliquée par incréments sur l'échantillon. Pour chaque niveau de charge, la flèche de l'échantillon est mesurée sans contact en utilisant un micromètre laser à triangulation ; elle est estimée de varier dans une plage de 0 à 2 mm. Un convertisseur analogique-digital convertit cette flèche en valeur numérique sur une échelle de 0 à 4096 (2^{12}), soit chaque valeur DAC correspond à 0.488 μm .

En raison de la faible taille de l'échantillon et afin de limiter le fluage, la force appliquée à l'échantillon varie de 0 à 1,5 N, par pas de 0,1 N. Pour limiter les effets viscoélastiques, chaque palier ne dure que 5 secondes. La comparaison des courbes de chargement et de déchargement permet de valider que les mesures ont été réalisées dans le domaine élastique linéaire. L'infra-densité de chaque échantillon est également déterminée (mesure du volume saturé et le masse anhydre après séchage à 103 ° C).

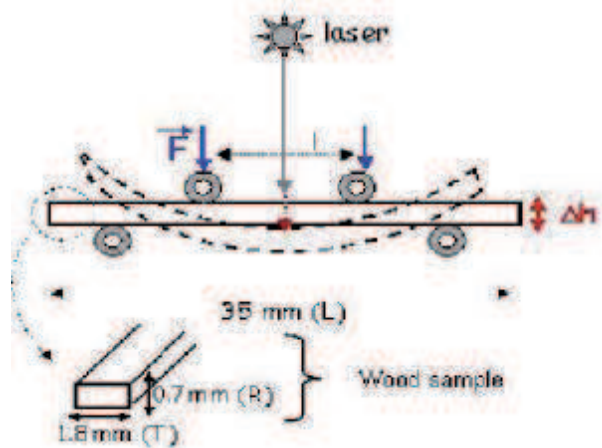


Figure 2.4 : Essai de flexion quatre points

c. *Choix de la géométrie des échantillons*

La machine a été conçue afin de pouvoir effectuer des tests sur des échantillons assez petits pour qu'ils permettent de sélectionner des tissus particuliers du bois.

Avec la machine de flexion 4 points fabriquée au laboratoire, la distance L entre deux appuis extérieurs est de 20 mm donc la longueur de l'échantillon est de l'ordre de 30 à 35 mm.

Pourtant, à partir de l'équation $f = \frac{l^2(L-l)}{32EI}P$ avec $I = bh^3/12$, on peut bien voir que la valeur

de la largeur b et surtout de la hauteur h de l'échantillon décide le moment quadratique I et donc la flèche f quand il est soumis à une charge. La flèche de l'échantillon dépend très fortement de la hauteur h de ce dernier. Pour obtenir des flèches faciles à mesurer, il est donc nécessaire de diminuer la hauteur de l'échantillon. Avec un support d'échantillon spécialement conçu pour ce travail et une polisseuse à plateau de verre, il a été possible d'atteindre un échantillon avec une épaisseur régulière de 0.5 mm sur toute sa longueur.

Après avoir testé et calibré la machine avec la charge maximale est de 1,5N (poids d'une masse de 150 g), nous avons décidé de mesurer le module d'Young longitudinal sur des éprouvettes de dimensions 30 x 1.8 x 0.7 mm (L x b x h)

d. *L'infra-densité et la masse volumique des échantillons*

i. *Généralités*

Après avoir terminé chaque essai mécanique, nous avons mesuré l'infra-densité des échantillons.

La masse volumique du bois n'est pas une chose aisée à définir en raison du caractère hygroscopique du matériau (masse variable) et de ses propriétés de retrait/gonflement (volume variable). L'infra-densité, exprimée en kg/m^3 , est définie comme le rapport entre la

masse anhydre et le volume saturé de l'échantillon. Cette grandeur est importante en sciences du bois car elle représente, pour chaque échantillon, le rapport de deux valeurs constantes contrairement à la masse volumique, qui peut varier en fonction du taux d'humidité. L'infra-densité est donc définie par la formule suivante et fait l'objet d'une norme :

$$Id = \frac{M_0}{V_s}$$

M_0 : masse anhydre de l'échantillon

V_s : volume saturé

On mesure le volume de l'échantillon, à l'état de saturation grâce à la loi d'Archimède. Nous considérons un échantillon quelconque dans un réservoir de l'eau (Figure 2.5). Il est soumis à la force de tension T du fil, à son poids propre P et la force d'Archimède F_A .

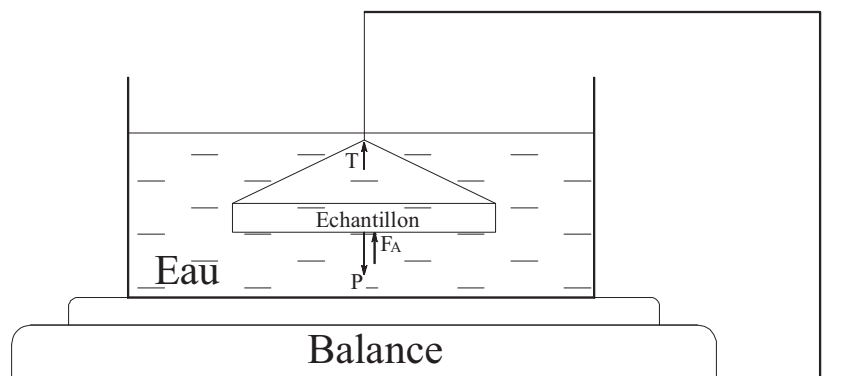


Figure 2.5 : Mesure de l'infra-densité de l'échantillon

La force d'Archimède : $F_A = \rho \cdot Vg$

Avec ρ : masse volumique du fluide déplacé

V : Volume du fluide déplacé

g : accélération de gravité

Pour la stabilité de l'échantillon dans l'eau, il faut que le poids soit plus grand en module que la poussée d'Archimède (densité supérieure à l'unité).

On voit que l'eau applique sur l'échantillon une force Archimède F_A , donc selon le théorème 3 de Newton, l'eau est subit une même force F_A . Cette force applique sur la balance et elle provoque le changement de l'indice sur écran de la balance.

L'unité sur l'écran de la balance est gramme, et le poids propre de l'eau $\rho_{\text{eau}} = 1 \text{ g/cm}^3$

=> Volume saturé de l'échantillon = changement sur l'écran de la balance / ρ_{eau} (cm^3)

Cette définition est représentative de la qualité de matière présente au sein du matériau. En pratique, il faut donc mesurer les deux grandeurs. La masse anhydre s'obtient par pesée après un séchage en étuve sèche à 103°C jusqu'à ce que la masse soit stabilisée (environ 24h pour nos petits échantillons). Les modifications irréversibles produites pendant ce séchage imposent que la mesure de la masse anhydre soit effectuée en fin de protocole, après que toutes les autres mesures aient été réalisées. Le volume saturé s'obtient également par pesée grâce au principe d'Archimède. Pour obtenir effectivement le volume saturé, l'échantillon doit être saturé, c'est-à-dire que son taux d'humidité doit être supérieur au point de saturation

des parois cellulaires. En pratique, nous avons vu qu'il faut aussi que la densité soit supérieure à l'unité. Pour remplir ces deux conditions, les éprouvettes sont plongées dans l'eau d'une cloche maintenue sous vide. Plusieurs cycles de mise sous vide-rupture du vide sont réalisés jusqu'à ce que l'on puisse observer l'arrêt de l'extraction de l'air contenu dans les lumens et que les échantillons coulent.

ii. La mesure de l'infra-densité pour ces séries d'essais

Il faut cependant bien savoir que ce principe est difficile à appliquer pour des échantillons très petits. En effet, pour une mesure précise avec un échantillon qui pèse de l'ordre de 20 mg, il faut une balance à au moins 10^{-5} g. Dans ce cas, l'eau présente à la surface de l'échantillon et l'évaporation de l'eau au cours de la mesure perturbent les valeurs mesurées.

Pour des échantillons de cette taille, une mesure directe de l'infra-densité a été adoptée. Les dimensions de l'échantillon à l'état saturé sont déterminés à l'aide d'un pied à coulisse et le volume saturé de l'échantillon est calculé par la formule géométrique comme pour un parallélépipède: $V = b \times h \times L$. Pour cette solution, le résultat est moins précis que celui à la méthode d'Archimède (il suppose que des faces planes, parallèles et à angle droit), mais il est moins risqué.

2. Mesure du Module d'Young de traction dans le plan transversal sous microscope optique

Afin de déterminer le comportement mécanique linéaire à l'échelle cellulaire dans le plan transversal, une petite machine d'essai de traction munie d'un capteur de force est disposée sous un microscope optique. Après avoir obtenu les images de l'essai lors du chargement, on utilise la méthode de corrélation d'image pour obtenir le champ de déformation.

a. *Préparation des outils*

i. Microscope optique

Dans ces essais, les échantillons sont observés par un microscope optique en réflexion. Dans ce cas, l'échantillon est illuminé du même côté que l'observateur, soit par le dessus pour un microscope droit et par le dessous dans le cas des microscopes inversés utilisés en métallographie ou en cristallographie. La lumière produite par la source passe une première fois par l'objectif, arrive sur l'échantillon, est réfléchiée et repasse par l'objectif pour observation ce qui nécessite plusieurs jeux de miroirs, prismes et miroir semi-transparents.

La microscopie en réflexion permet d'examiner des objets opaques, ou trop épais pour la transmission. En contrepartie bien entendu, elle ne peut donner que des informations sur la surface de l'échantillon dans le cas de l'observation en lumière blanche ; en lumière polarisée, elle permet de révéler les orientations de grains des constituants des minéraux ou métaux.

Cet examen nécessite une préparation soignée de la surface. Le pouvoir de résolution du microscope optique est limité par la longueur d'onde de la lumière utilisée. Cet appareil n'autorise pas des grossissements supérieurs à 150 environ. Diverses techniques comme le contraste différentiel ou l'examen en lumière polarisée sont souvent utiles.

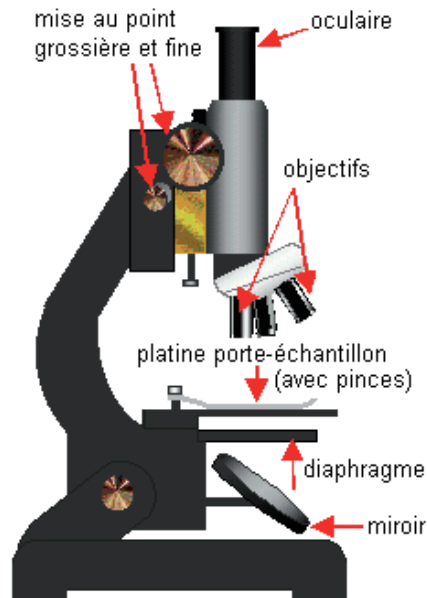


Figure 2.6 : Schéma d'un microscope optique

Pour observer des échantillons de bois avec cette technologie, les échantillons doivent être soigneusement préparés. Au laboratoire, nous observons des surface préparées grâce à un microtome à glissière ou des échantillons polis à l'aide de papiers abrasifs de plus en plus fin disposés sur des disques en verre d'une excellente planéité. C'est cette dernière méthode qui a été utilisée pour nos essais mécaniques.

ii. Protocole de réalisation de l'essai

On réalise une série d'incrément de déplacements manuels de la platine de sollicitation. A chaque incrément, la force obtenue est notée. La contrainte est calculée à partir de cette force en supposant une contrainte uniforme sur toute la section de l'éprouvette. Une caméra digitale fixée sur un microscope permet la prise d'une image de la surface de l'échantillon et sa sauvegarde sur un disque dur après chaque déplacement. La série d'images permet de déterminer la déformation par corrélation d'image (voir ci-dessous). Ensuite, grâce à la valeur de la force liée à chaque cliché, il est possible de tracer le diagramme de déformation en fonction de la contrainte. Ce diagramme permet alors l'obtention du module d'Young de chaque échantillon. Les mesures sont réalisées sur bois sec.

- Le micro échantillon est tenu par deux mors spéciaux fixés par des rotules sur la platine de traction. Tout le système est disposé sous le microscope optique équipé de la caméra digitale.

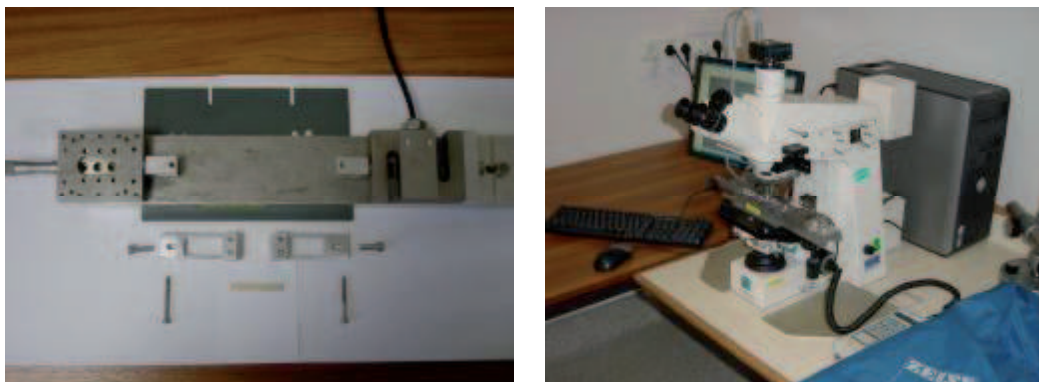


Figure 2.7 : Détail de la platine de traction et tout système sous microscope optique

Cet essai est imposé par déplacement. Une mollette sur la platine permet d'incrémenter le déplacement à raison de 20 μm par graduation. Après chaque incrément, le focus et le champ de l'image sont modifiés. Il faut donc recentrer l'image sur la zone d'intérêt et refaire le focus avant d'enregistrer l'image.

- La caméra digitale utilisée, de marque Basler, permet deux modes de fonctionnement : le mode film et le mode de photo ; dans le cadre de cet essai, le mode de photo est souvent utilisé. Une chaîne d'images enregistrée permet de synthétiser la déformation entre les différentes images (ce qui correspond à chaque pas d'incrément de force durant l'essai).

Après chaque déplacement, diverses actions doivent être réalisées : inscription sur le cahier de laboratoire du déplacement total depuis le début de l'essai, inscription de la force correspondant à ce déplacement, prise d'un cliché et sauvegarde de celui-ci sous un nom de fichier particulier [valeur du déplacement-force]. Ces essais requièrent donc la présence de deux opérateurs. L'un d'eux effectue le déplacement, les notations déplacement/force sur le cahier et le recentrage de la zone d'échantillon examinée ; l'autre refait la mise au point de l'image, prend le cliché et le sauvegarde sous son nom caractéristique.

b. Choix de la géométrie des échantillons dans la direction radiale – mors de serrage

Avec la rondelle du peuplier comportant du bois de réaction utilisée pour ces essais (Figure 2.9), nous avons décidé de déterminer ses caractéristiques au niveau de troisième cerne car il est le plus large pour les 3 types de bois : tendu, opposé et normal.

La capacité de la platine joue un rôle important pour l'échantillonnage. La limite de capteur de force est de 100 N, donc bien adaptée en direction transverse à de sections de quelques mm^2 . Après plusieurs tests sur le peuplier de tension, on a trouvé que cette valeur doit être inférieure à 10 mm^2 , ce qui est obtenu avec une largeur $b \sim 5\text{mm}$ et une épaisseur $h \sim 2\text{mm}$. De plus, pour les échantillons dans la direction radiale, la longueur ne joue pas un rôle très important. Il faut juste faire attention à ce que la position du 3^e cerne soit au milieu de l'échantillon, dans la zone observée par l'objectif du microscope durant l'essai.

L'échantillon obtenu après usinage et ponçage doit non seulement être bien régulier en épaisseur mais également fournir une excellente image à l'observation microscopique. Il est serré par deux mors spéciaux réalisés dans notre équipe 3B (Figure 2.8). La zone de contact mors/échantillon a été revêtue de papier de verre, cela afin d'augmenter le frottement entre le mors et l'échantillon et donc prévenir tout risque de glissement. En effet, tout glissement de l'échantillon durant les mesures serait préjudiciable car il impliquerait une chute immédiate de la contrainte.

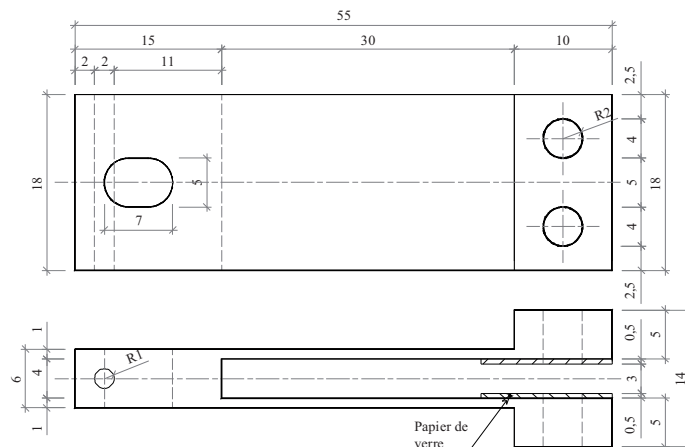


Figure 2.8 : Dimensions du mors de serrage

Dans un premier temps, chacun des mors de serrage est fixé à une extrémité de l'éprouvette en s'assurant que l'ensemble mors/éprouvette/mors soit parfaitement aligné. Puis, cet ensemble est fixé sur la platine de traction. Enfin, la platine est fixée sur la platine du microscope à l'aide de deux vis.

c. Choix de la géométrie des échantillons dans la direction tangentielle – mors de collage

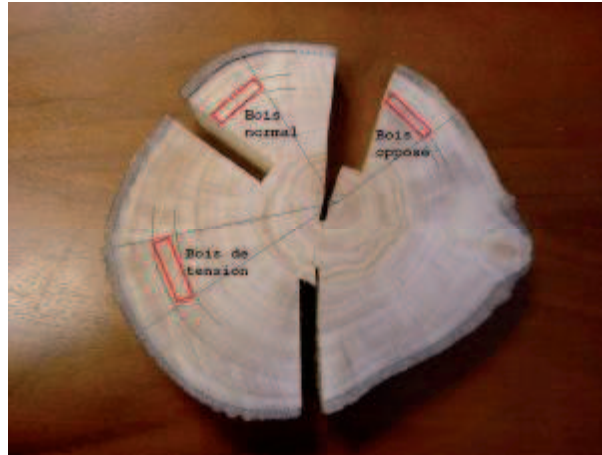


Figure 2.9 : Position des échantillons sur la rondelle - direction tangentielle

Pour des tests dans la direction tangentielle, la zone testée est beaucoup plus sensible à la découpe de l'échantillon. Comme le montre des traces des échantillons sur la rondelle de bois (Figure 2.9), on peut voir que l'échantillon dans la partie opposée est plus difficile à localiser, car la largeur du cerne est vraiment faible. On voit également que les 2 extrémités de l'échantillon passent dans le 2^e cerne si l'échantillon est trop long. Donc il faut diminuer la longueur de l'échantillon au maximum. Ceci génère un autre problème : pour visualiser l'échantillon sous le microscope optique, il faut approcher l'objectif par rapport la surface de l'échantillon. Cette distance dépend du grossissement de l'objectif (1 mm environ avec l'objectif x20). La longueur minimale de l'échantillon est alors imposée par le diamètre de l'objectif, de l'ordre de 20 mm.

Il faut donc prolonger l'échantillon pour que l'objectif puisse accéder à l'espace entre les deux mors. La solution adoptée consiste à utiliser des mors additionnels collés. Ce sont deux mors en plastique, d'une épaisseur voisine de celle de l'échantillon, tels que présentés à la Figure 2.10

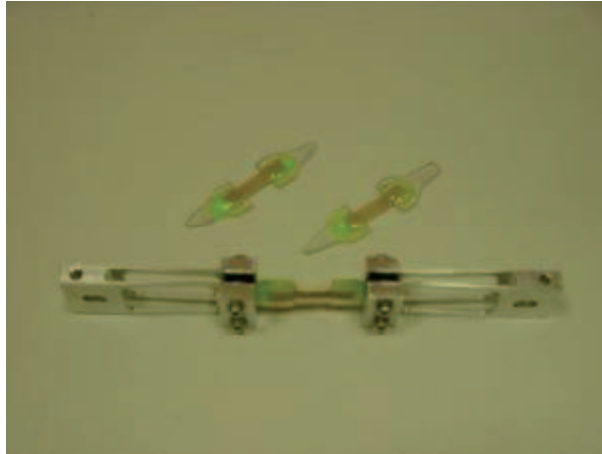


Figure 2.10 : Utilisation de mors collés pour prolonger la longueur des échantillons en direction tangentielle.

Une colle bi-composante est utilisée pour fixer l'échantillon au mors plastiques. Il faut les laisser dans 24 h à la température ambiante pour une prise suffisante. Après 24 h ou plus, on peut serrer le mors plastique (et l'échantillon de bois) dans les mors de la machine de test pour réaliser l'essai de traction tel que décrit plus haut.

d. *Protocole expérimental*

i. Test du fonctionnement du mors de serrage

Dans le mors de serrage, on a collé une nappe de toile de verre dans la zone de contact entre le mors et l'échantillon. Cette nappe de toile joue un rôle important pour tenir l'échantillon au moment de la sollicitation en traction de l'échantillon. En principe, le mors de serrage doit assurer qu'il n'y a pas le mouvement relatif entre l'échantillon et le mors pendant le chargement. L'essai de traction simple étant réalisé par déplacement de la platine de traction, (20 μm chaque graduation dans cet essai), s'il y a un mouvement relatif important entre mors/échantillon, l'augmentation de 20 μm par graduation n'est plus assuré, et peut être cette sollicitation (20 μm par graduation) n'est pas stable dans toute la procédure de l'essai.

Pour le traitement des résultats, on peut calculer la déformation de l'échantillon par une formule classique : $\text{déformation} = \frac{\text{déplacement}}{\text{longueur}_{\text{totale}}}$

Ensuite on prend la valeur de capteur de force qui est installé sur la platine de traction pour tracer la courbe contrainte/déformation et obtenir la valeur de module d'élasticité (module d'Young). Il est également possible d'utiliser le logiciel *MeshPore* [Perré, 2005 ; 2007] pour calculer la déformation de l'échantillon par la corrélation d'image afin d'obtenir la courbe contrainte/déformation.

Un test est réalisé pour comparer les résultats obtenus par les deux solutions citées ci-dessus. Il est réalisé sur un échantillon d'épicéa selon la direction radiale, dont les dimensions sont $L=20.49$; $h=1.77$; $h=4.31$ (mm^3)

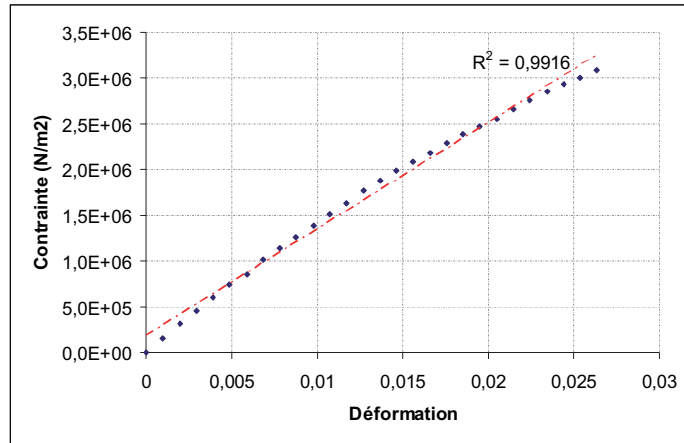


Figure 2.11 : Courbe Contrainte – Déformation obtenue avec le capteur de déplacement (Echantillon d’*épicéa* – direction radiale).

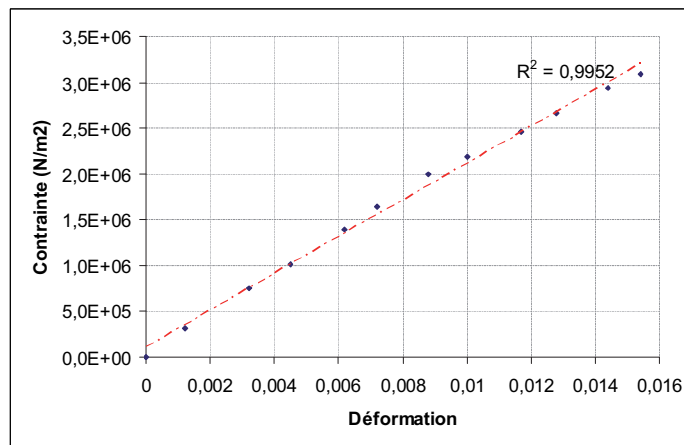


Figure 2.12 : Courbe Contrainte – Déformation calculé par corrélation d’image directement sur l’échantillon (avec le logiciel *MeshPore*, Echantillon d’*épicéa* – direction radiale).

Dans cet essai, on a sollicité en déplacement jusqu’à 540 μm .

Dans la Figure 2.11, la déformation de l’échantillon atteint la valeur d’environ 0.027 alors que dans la Figure 2.12, elle est d’environ 0.016 seulement. La différence s’explique par l’utilisation de deux moyens de mesure différents.

Avec les mêmes résultats expérimentaux, si l’on fait le traitement de résultat en utilisant la valeur de déplacement identique à celle de sollicitation (20 μm par graduation) pour calculer la déformation, on ajoute donc le déplacement relatif entre le mors et l’échantillon. Pour un essai au niveau microscope comme celui-ci, on ne peut pas éviter le déplacement relatif entre les différentes parties de l’instrument. Ceci confirme donc que, même pour des essais micro-mécaniques, on ne peut pas se fier au déplacement des mors.

La méthode de corrélation d’image mise en place grâce au logiciel *MeshPore* est donc la méthode judicieuse à employer. Elle permet de déterminer sans contact, donc sans perturbation, la déformation de la partie sollicitée de l’échantillon. Le même principe a déjà été utilisé avec succès dans la même équipe (Lahbabi, 1995, Farruggia et Perré, 2000)

Dans le Figure 2.12, la courbe expérimentale de contrainte/déformation donne une courbe de tendance avec un coefficient de corrélation $R^2=0.9952$. Elle est donc proche d’une droite, ce qui est l’expression d’un comportement élastique linéaire.

ii. Test du fonctionnement du mors de collage

Pour l'essai de traction selon la direction tangentielle, on ajoute un mors de collage pour allonger la longueur totale de l'échantillon. Comme pour le test des mors de serrage, il est intéressant de vérifier le comportement mécanique de ces mors.

Echantillon utilisé dans ce test:

- Peuplier dans la direction tangentielle
- Dimensions : $L \times b \times h = 8.53 \times 3.65 \times 1.78 \text{ (mm}^3\text{)}$

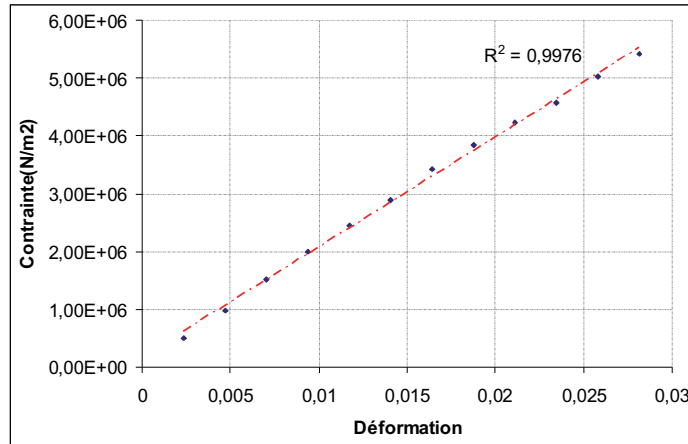


Figure 2.13 : Courbe Contrainte – Déformation obtenue avec le capteur de déplacement (Echantillon de peuplier – direction tangentielle).

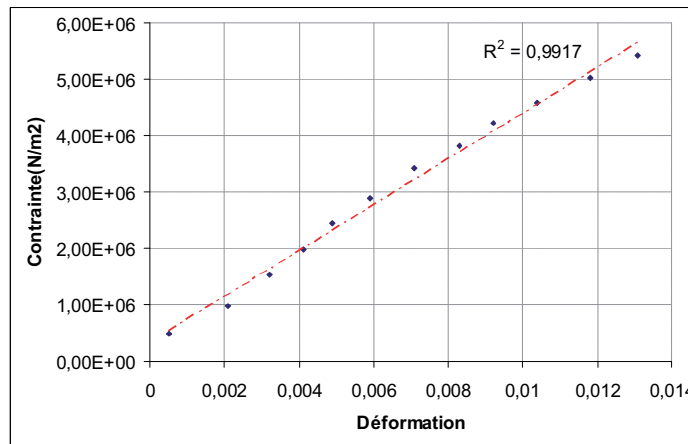


Figure 2.14 : Courbe Contrainte – Déformation calculé par corrélation d'image directement sur l'échantillon (avec le logiciel MeshPore, Echantillon de peuplier – direction tangentielle).

Dans cet essai, l'échantillon est sollicité jusqu'à 360 μm (échantillon cassé) mais pour s'assurer que l'on reste dans la zone d'élasticité du bois, on prend les données de l'essai jusqu'à un déplacement de 240 μm .

Comme dans le test avec le mors de serrage, nous constatons un déplacement relatif important entre le mors de serrage et le mors de collage (mors en plastique). La déformation de la colle pendant le chargement permet d'expliquer pourquoi les déformations maximales des deux traitements sont différentes ($\epsilon = 0.027$ si l'on utilise le déplacement des mors et $\epsilon = 0.013$ avec la corrélation d'image).

e. *Mesure de l'infra-densité des échantillons*

Les échantillons ont une longueur importante (30 mm selon la direction radiale ou 12-15 mm selon la direction tangentielle), donc si l'on mesure l'infra-densité de l'échantillon, on mesure la valeur moyenne sur toute la longueur, qui n'est donc pas représentative de la zone testée.

De plus, dans cet essai surtout dans la direction tangentielle, les échantillons sont cassés après la terminaison de l'essai. Il est difficile de récupérer les morceaux du bois pour mesurer l'infra -densité.

Cependant, ces essais de traction et ceux de flexion quatre points (voir ci-dessus) sont réalisés dans le même tronc d'arbre, dans deux rondelles voisines similaires. Pour cette raison, nous avons décidé de prendre les valeurs d'infra-densité obtenues lors des essais de flexion (présentées ci-dessus), mesurées elles-aussi sur le troisième cerne (bois de tension, bois opposé et bois normal).

f. *Calcul de la déformation de l'échantillon par la méthode de corrélation d'image*

i. Introduction

Pour une étude de déformation dans les essais mécaniques, on utilise généralement des jauges et des extensomètres que l'on colle directement sur l'échantillon. Cependant, les techniques anciennes utilisant des extensomètres fournissent uniquement une mesure en un point et ne permettent pas la détermination d'un champ à l'échelle de la structure sans la disposition d'une multitude de capteurs de mesure. Depuis les années 1980, avec les besoins naissants de mesure d'hétérogénéités de déformation dans les structures, les techniques de mesure de champ de déformation se sont développées [Doumalin, 2000]. Elles ont permis d'étudier la répartition des déformations en fonction de la géométrie des pièces. Ces techniques reposent sur le principe d'une mesure sans contact avec l'échantillon. Elles permettent donc d'éviter les interactions mécaniques de l'appareil de mesure sur la pièce, ce qui est notamment un avantage pour les échantillons souples ou de petites dimensions.

Dans notre étude, il n'est pas possible d'utiliser ni des jauges ni des extensomètres. Les échantillons étudiés étant de petite taille, il est en effet difficile d'y coller l'appareil de mesure. Même si ce collage était possible, l'échantillon serait imprégné de colle changeant alors son comportement lors de l'essai [Badel et Perré, 1999, Farruggia et Perré, 2000]. Pour cette étude, nous décidons donc d'utiliser la méthode de corrélation d'images qui permet de mesurer le champ de déformation sans contact avec l'échantillon.

ii. Principe de la corrélation d'images

La corrélation d'images est une méthode optique de mesure de déformation de la surface d'un objet entre un état initial et un état déformé. La méthode consiste à suivre les niveaux de gris d'un secteur au voisinage d'un point (en rouge sur la Figure 2.16), appelé « subset » en anglais (traduit par « imagerie » en français), pendant la déformation.

La réussite de cette technique est basée sur deux hypothèses [Doumalin, 2000] :

- Le fondement même de la technique de corrélation suppose que le petit domaine de pixels soit identifié et identifiable par rapport à d'autre domaine dans une même image.
- Les niveaux de gris se conservent de l'image initiale à l'image de la configuration déformée. En pratique, il faut s'assurer que les mécanismes responsables de la déformation du matériau n'entraînent pas de modifications de contraste.

On rencontre dans la littérature plusieurs auteurs qui utilisent la méthode de corrélation d'images pour exploiter leurs résultats [Sun, 1996, Samarasinghe, 2004, Danvind, 2005]. Généralement, on utilise un nombre de point pour créer une chaîne sur l'image, la déformation est alors calculée grâce à la transformation de ces points depuis un état initial jusqu'à un état déformé. Pour illustrer rapidement le principe de cette méthode, une transformation d'une ligne (2 points) de l'état initial (A_0A) à l'état déformé (M_0M) [Perré et Huber, 2007] est présentée ci-dessous :

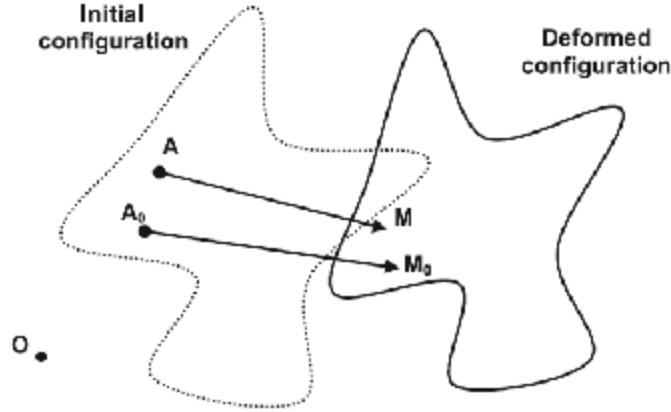


Figure 2.15 : Transformation d'un objet déterminé par deux points de l'état initial (A_0A) à l'état déformé (M_0M) [Perré et Huber, 2007]

Si le point A_0 et A sont assez proches, il existe un tenseur de transformation $\overline{\overline{F}}$ pour satisfaire la transformation : $\overline{\overline{M_0M}} = \overline{\overline{F}} \overline{\overline{A_0A}}$ (3)

Remarquons que dans notre application, nous supposons que la déformation est constante sur toute image entière donc $\overline{\overline{F}}$ ne dépend pas de A_0 , le développement de l'équation (3) est validé pour tous les points sur l'image. Dans notre cas de petite déformation, nous pouvons toujours décomposer le tenseur de transformation $\overline{\overline{F}}$ par la somme d'un tenseur d'identité $\overline{\overline{I}}$, un tenseur symétrique de déformation $\overline{\overline{\varepsilon}}$ et un tenseur antisymétrique de rotation $\overline{\overline{\Omega}}$:

$$\overline{\overline{F}} = \overline{\overline{I}} + \overline{\overline{\varepsilon}} + \overline{\overline{\Omega}} \text{ ou bien } \overline{\overline{F}} - \overline{\overline{I}} = \overline{\overline{\varepsilon}} + \overline{\overline{\Omega}} \quad (4)$$

Avec l'origine quelconque O , on a l'équilibre :

$$\overline{\overline{OM}} = \overline{\overline{OA}} + \overline{\overline{AA_0}} + \overline{\overline{A_0M_0}} + \overline{\overline{M_0M}} \quad (5)$$

Si (a,b) ; (x,y) et (a_0,b_0) ; (x_0,y_0) sont les coordonnées du point A ; M et A_0 ; M_0 dans l'image initiale et déformée, à partir des équations (3), (4) et (5), on a la relation :

$$\begin{aligned} \overline{\overline{OM}} &= \overline{\overline{OA}} + \overline{\overline{AA_0}} + \overline{\overline{A_0M_0}} + \overline{\overline{M_0M}} \\ \Leftrightarrow \overline{\overline{OM}} &= \overline{\overline{OA}} + \overline{\overline{AA_0}} + \overline{\overline{A_0M_0}} + \overline{\overline{F}} \overline{\overline{A_0A}} \\ \Leftrightarrow \overline{\overline{OM}} &= \overline{\overline{OA}} + \overline{\overline{AA_0}} + \overline{\overline{A_0M_0}} + (\overline{\overline{\varepsilon}} + \overline{\overline{\Omega}} + \overline{\overline{I}}) \overline{\overline{A_0A}} \\ \Leftrightarrow \overline{\overline{OM}} &= \overline{\overline{OA}} + \overline{\overline{A_0M_0}} + \overline{\overline{\varepsilon}} \overline{\overline{A_0A}} + \overline{\overline{\Omega}} \overline{\overline{A_0A}} \\ \Leftrightarrow \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 - a_0 \\ y_0 - b_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a - a_0 \\ b - b_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a - a_0 \\ b - b_0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

Car nous avons supposé que la déformation est constante sur toute image, donc il ne faut pas demander le point A_0 est situé à côté du point A. En plaçant le point A_0 dans l'image initiale vers l'origine O, l'équation (6) est simplifiée :

$$\begin{cases} x \\ y \end{cases} = \begin{cases} a \\ b \end{cases} + \begin{cases} x_0 \\ y_0 \end{cases} + \begin{cases} \varepsilon_{11}a + (\varepsilon_{12} + \omega)b \\ \varepsilon_{22}b + (\varepsilon_{12} - \omega)a \end{cases} \quad (7)$$

Sur chaque paire d'images, le tenseur de déformation $\bar{\varepsilon}$ est déterminé en utilisant une série de points de référence dont les positions sont connues sur la configuration de référence A_i et la configuration déformée M_i . Les points sont choisis grâce aux marquages anatomiques sur l'image.

Pour extraire des valeurs de déformation de chaque paire de chaîne, Perré représente dans son travail [Perré et Huber 2007] une méthode qui consiste à minimiser la différence entre la position déformée déterminée à partir de l'image et le calcul de cette position en utilisant l'équation (7), cette différence F déterminée par la somme des carrés des distances.

$$F(x_0, y_0, \varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{12}, \omega) = \sum_{i=1}^{n-1} [(x_i^{mes} - x_i^{cal})^2 + (y_i^{mes} - y_i^{cal})^2]$$

$$\text{Avec : } x_i^{cal} = a_i + x_0 + \varepsilon_{11}a_i + (\varepsilon_{12} + \omega)b_i$$

$$y_i^{cal} = b_i + y_0 + \varepsilon_{11}b_i + (\varepsilon_{12} - \omega)a_i$$

Pour un nombre total de points égal à n, la somme s'arrête à n-1 car toutes les chaînes sont fermées. Ainsi F est une fonction de six variables indépendantes. Au minimum de la fonction, la dérivée partielle par rapport à chacune des variables doit être égale à zéro. Grâce à l'hypothèse des petites perturbations, cette condition génère un système linéaire de six équations à six inconnues (les six variables de la fonction F), avec :

x_0 et y_0 : translation de l'origine, ne sont pas importantes

ω : rotation, toujours proche de zéro quand les chaînes sont fixées sur une large base

ε_{12} : contrainte de cisaillement, toujours proche de zéro dans l'essai de traction-compression

ε_{11} et ε_{22} : paramètres à calculer, ils représentent les valeurs de déformation dans les directions x et y.

iii. Logiciel *MeshPore* – Principe et mode d'emploi

Le logiciel *MeshPore* est développé entièrement en FORTRAN 90 par Patrick Perré [Perré, 2005 ; Perré and Huber, 2007]. Il utilise des images sous format bitmap, qui sont générées par essai mécanique sous un microscope optique ou dans la chambre d'un microscope électronique, comme les données d'entrées. *MeshPore* permet l'analyse de celles-ci et fournit en résultat la déformation des cellules de l'échantillon.

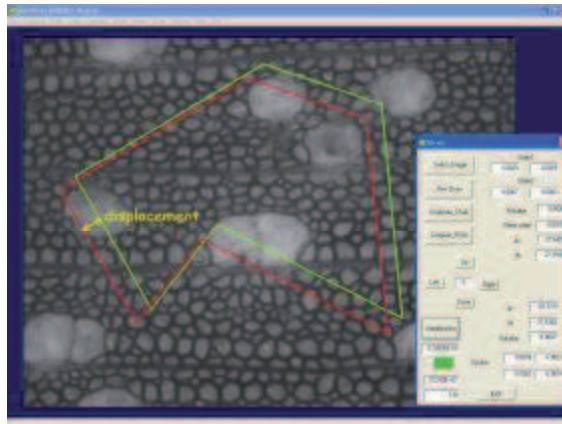


Figure 2.16 : Corrélation d'image par le MeshPore

Le travail sur un couple d'images consiste d'abord à tracer une chaîne fermée, basée sur des points remarquables, sur l'image initiale. Une deuxième chaîne, basée sur les mêmes points sélectionnés, sera tracée en passant à l'image déformée. Le passage rapide d'une image à l'autre (image initiale à image déformée et à l'inverse) est souvent utilisée au cours de cette phase: il permet de vérifier la mise en place des points de références sur l'image déformée par rapport à ceux de l'image initiale.

Au cours de cette procédure, plusieurs fonctions dans le logiciel *MeshPore* sont mises à contribution:

- Déplacement d'un point de la chaîne
- Ajout d'un point
- Suppression d'un point
- Zoom sur les zones problématiques
- Translation de la zone de zoomée, avec la mise à jour automatique des deux chaînes de points de référence et des deux images
- Etc.

A l'usage, certains des points de référence choisis sur l'image initiale sont difficiles à détecter ou invisibles sur l'image déformée. Dans ces cas, il est donc nécessaire de modifier les points de référence (changement, ajout, suppression) sur l'image initiale avant de retourner à l'image déformée. Avant de valider les chaînes pour le calcul de déformation, chaque point de référence est vérifié rapidement grâce à un simple passage d'une image à l'autre (les deux chaînes sont toujours visibles sur l'écran)

Grâce aux valeurs fournies par *MeshPore* et celles de force relevées en cours d'essai, il est possible de tracer la courbe F (Force) = f (Déformation) qui permet ensuite l'obtention du module d'Young.

3. Essai de compression en grandes déformations sous le microscope électronique

a. Microscope électronique à balayage environnemental

Le fonctionnement du microscope électronique à balayage (MEB) est bien présenté dans le travail de Doumalin [2000], il repose sur la physique de l'interaction électron/matière. L'observation d'un échantillon est basée sur le bombardement de la surface d'un objet par un

faisceau d'électrons formé dans un canon (*Figure 2.17*). Les électrons sont émis d'un filament C, ils sont ensuite accélérés par une différence de potentiel créée entre une cathode W, placée très proche de la pointe du filament (appelée wehnelt), et une anode A, disposée à quelques millimètres en avant en sachant que ces deux éléments sont percés en leur centre pour laisser passer le faisceau. Cette tension accélératrice est celle que l'on règle sur le pupitre de commande (de 5 kV à 30 kV). La taille du faisceau est modifiée par les lentilles électromagnétiques L_1 et L_2 , habituellement au nombre de deux, appelées condenseurs. En jouant sur la valeur du courant de la tension accélératrice qui traverse ces deux lentilles, on ajuste la taille du faisceau ; plus le courant est faible, plus la taille du faisceau est fine. Le faisceau est supposé cylindrique et son diamètre après focalisation est inférieur à 100 nm. On règle la valeur désirée sur le pupitre.

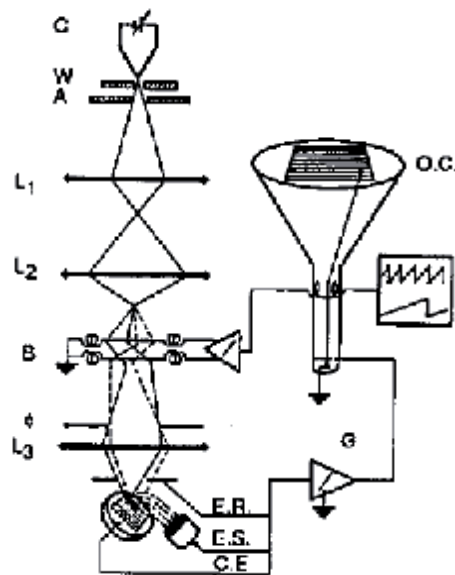


Figure 2.17 : Schéma du principe de travail du MEB [Doumalin, 2000]

Comme l'interaction électron/matière a lieu au point où le faisceau se situe, l'analyse d'une certaine zone n'est possible qu'en la balayant avec le faisceau. Deux lentilles électromagnétiques B (une pour chaque direction du plan) sont disposées à la suite des condenseurs et deviennent le faisceau dans les deux directions. Celui-ci décrit ligne par ligne la surface de l'échantillon. En couplant ce balayage et celui d'un écran cathodique OC, une image de la surface est produite. Cette image apparaît sans interruption quand on choisit une vitesse de balayage rapide parmi les différentes valeurs disponibles. La modification de l'amplitude de deux balayages permet d'analyser la surface plus ou moins fine et de la voir plus ou moins grande. Le dernier dispositif rencontré par le faisceau est une autre lentille électromagnétique L_3 dont la fonction consiste à focaliser le faisceau à la surface de l'échantillon placé à une certaine distance de celle-ci. Le réglage s'effectue en agissant sur le bouton *focus* [Doumalin, 2000].

Dans le cadre de ce travail, nous utilisons un *microscope électronique à balayage environnemental* (ESEM), Quanta 200 société FEI (*Figure 2.18*). Il est capable de fonctionner à une pression pouvant aller jusqu'à 50 Torr dans sa chambre d'observation. En remplissant la chambre de vapeur d'eau, ce mode de fonctionnement permet donc de contrôler l'humidité relative vue par l'échantillon. Il est même possible d'éviter la deshydratation des échantillons et d'observer de l'eau libre. De plus, le dispositif de contrôle de faisceau d'électron et de détection permet de former des images à base de tension et donc de pouvoir observer des matériaux non conducteur sans métallisation. Les charges sont alors drainées par le gaz de la chambre, ionisé à la périphérie de l'échantillon.



Figure 2.18 : Microscope électronique à balayage environnemental de la société FEI
(Source site FEI)

b. Platine de compression

La micro-platine de traction-compression est une machine d'essais mécaniques compacts qui peut se placer dans la chambre de l'ESEM. Son boîtier de contrôle est connectée à un ordinateur et pilotée à l'aide d'un programme écrit en Visual Basic

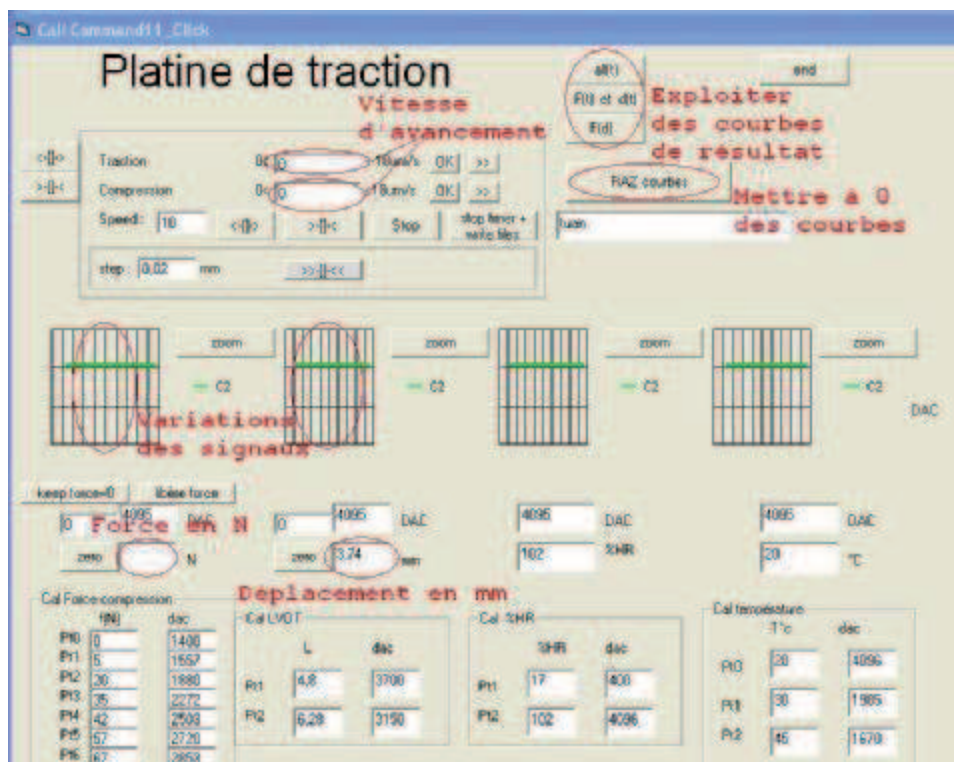


Figure 2.19 : Interface du programme qui pilote la micro-platine de traction-compression.

L'échantillon est tenu par deux mors en métal, puis il est mis en charge grâce au moteur de la platine. Les essais peuvent être effectués en traction ou en compression, mais dans cette partie, tous les essais sont effectués en compression.

Grâce à la translation obtenue par la rotation des vis d'entraînement, l'échantillon est sollicité par déplacement et la valeur de force correspondante est collectée par deux capteurs de force placés en parallèle, d'une capacité maximale de 200N pour chaque capteur. Un convertisseur

analogique-digital (DAC) convertit ces forces en valeurs numériques sur une échelle de 0 à 4096 (2^{12}).

La plage de 0 à 4096 DAC est utilisée aussi bien en traction qu'en compression. C'est pour cela que le zéro de force est disposé au milieu de cette plage du DAC.

i. Calibration de la platine de traction- compression

Dans sa conception initiale, la platine d'essais mécaniques ne comportait qu'un capteur de force, placé en série avec l'échantillon. Cette configuration est bien adaptée aux essais de traction et de compression avec des petits chargements. Cependant, dans la configuration de nos essais, nous avons constaté des effets de flexion dès que l'échantillon n'était pas parfaitement placé en série avec le capteur.

Pendant les essais mécaniques sur les micro- échantillons, il peut y avoir un « effet de bord ». C'est à dire qu'il y a l'apparition de contraintes de cisaillement si la charge est excentrée par rapport à l'échantillon. Afin de réaliser des essais de traction- compression pur, il était donc nécessaire de s'assurer que le chargement était parfaitement centré.

Nous décidons donc d'utiliser deux capteurs de force, modèle XFTC 300, en acier inoxydable ; son étendue de mesure comprise entre 0 N et 200 N (Figure 2.20). Ils sont branchés/fixés parallèlement aux deux bouts du mors. L'échantillon testé est placé dans la zone au milieu de ces deux capteurs de force, il nous permet alors de réaliser nos essais mécaniques en évitant « l'effet de bord ».

En utilisant ces deux capteurs en parallèle, il faut donc s'assurer qu'ils fonctionnent de manière identique dans une même plage de force.

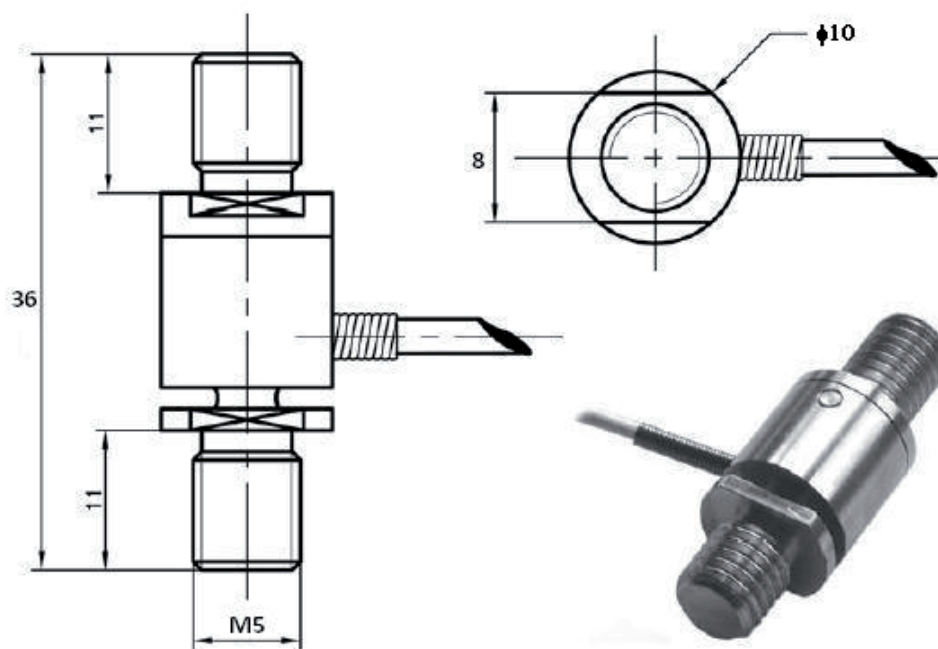


Figure 2.20 : Capteur de force utilisé, modèle XFTC300

Chaque capteur de force porte deux variations de « Gain » et d'« Offset » (Figure 2.21). L'« Offset » détermine le point de commencement de la force et le « Gain » détermine la vitesse de la variation la réponse (tension) lors du changement de sollicitation (force).

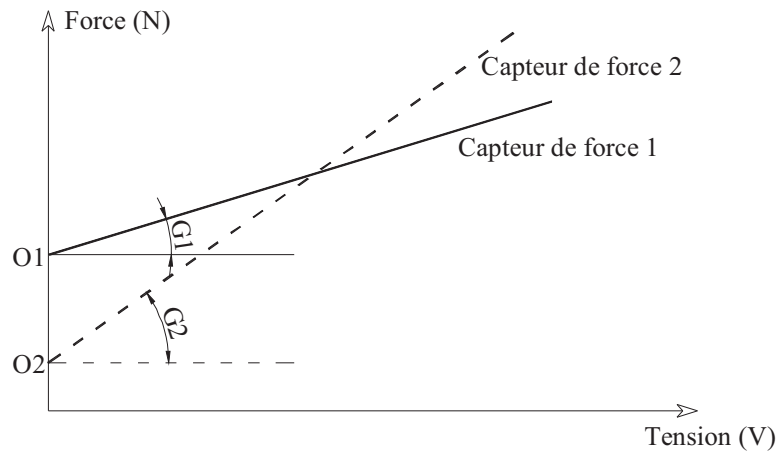


Figure 2.21 : Diagramme de comportement de deux capteurs avant la calibration

Grâce à ce diagramme (Figure 2.21), on voit bien que pour que les deux capteurs fonctionnent à l'identique, il faut mettre les valeurs de G_1 , G_2 et O_1 , O_2 similaires pour que les deux capteurs soient bien étalonnés.

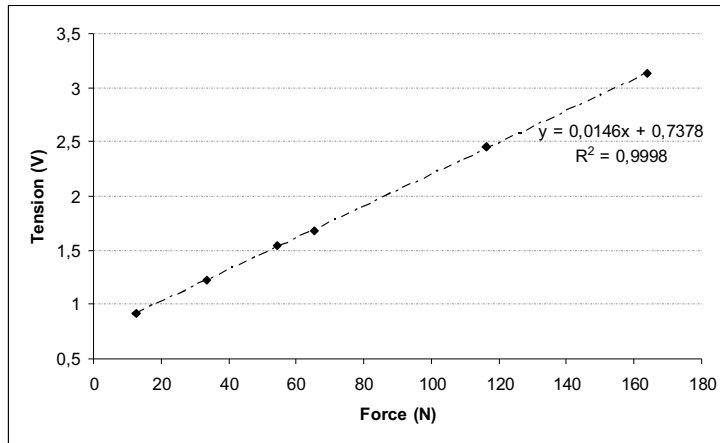
ii. Calibration des capteurs de force

Chaque capteur de force est calibré indépendamment l'un de l'autre. Au départ, ces valeurs « Gain » et « Offset » par défauts sont différents. La calibration consiste à les placer sous une presse, qui incrémente l'effort par palier de 0.05N jusqu'à une force maximale $F_{\max}=1T$, puis chargés.

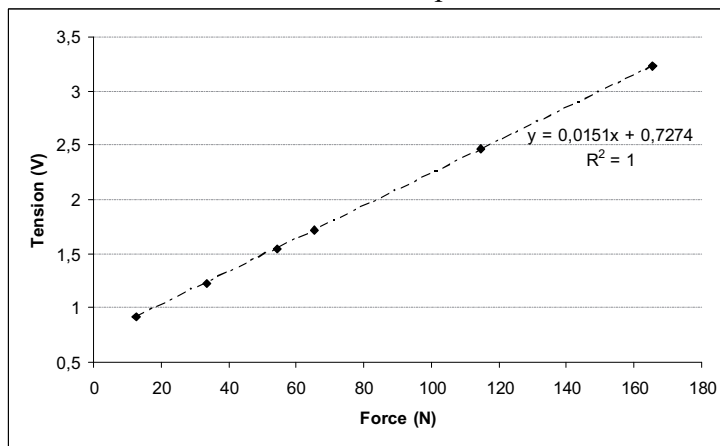


Figure 2.22 : Calibration des capteurs de force sous une machine de compression

Pour chaque capteur, on obtient alors une courbe de calibration représentant la tension (variation des signaux du capteur, en Volt) en fonction de la force appliquée (en Newton). Ces courbes sont ensuite pondérées grâce à une carte d'acquisition que l'on a fait à l'équipe 3B-LERFoB afin d'obtenir des courbes de charge-décharge similaires pour chaque capteur testé indépendamment.



Calibration du capteur 1



Calibration du capteur 2

Figure 2.23 : Calibration les capteurs de force de la platine de traction- compression

La *Figure 2.23* montre la courbe de la tension en fonction de la force exercée. Il semble que les deux courbes sont quasi-superposables, c'est-à-dire qu'après la calibration, les deux capteurs possèdent la même réponse de travail sur une même plage de force.

c. Détermination de l'effet du bâti

Afin d'éviter l'influence de l'effet du bâti sur notre mesure, un essai à blanc a été réalisé sur notre platine de compression. En effet, nous avons utilisé un échantillon en acier inoxydable (échantillon indéformable) qui possède les mêmes dimensions par rapport à nos échantillons définitifs, soit $L \times B \times H = 6 \times 3 \times 2 \text{ mm}^3$. Le résultat obtenu (déplacement en fonction de la force) est présenté dans la *Figure 2.24*

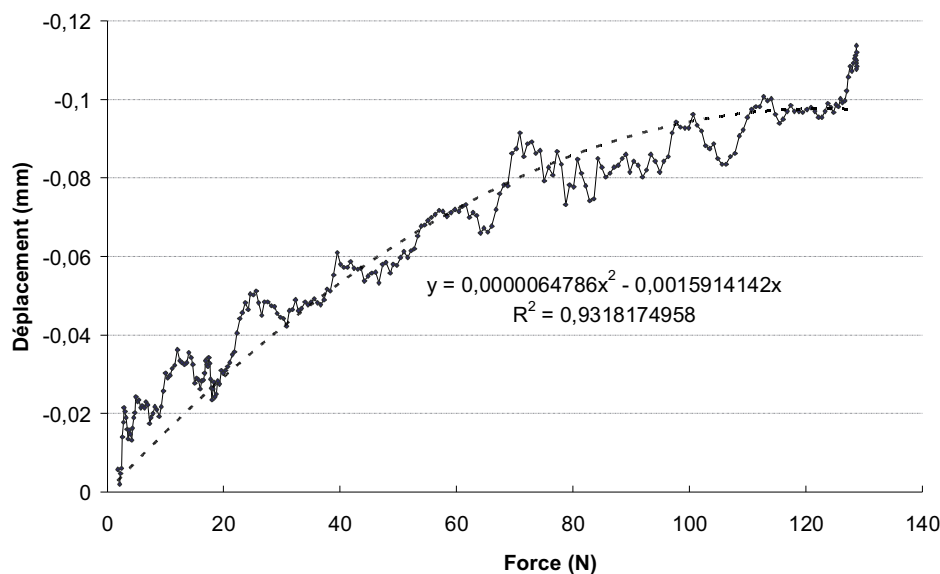


Figure 2.24 : Effet du bâti dans l'essai de compression en grande déformation

Grâce à la fonction présentée dans la Figure 2.24, nous pouvons déterminer le déplacement du mors en fonction de la force sollicitée. Le déplacement réel de l'échantillon est donc déterminé :

$$D_{\text{réel}} = D_{\text{obtenu}} - D_{\text{mors}}$$

d. *Mesure de la densité et de l'infra-densité des échantillons*

Dans ces essais, l'échantillon après un essai en grandes déformations est a perdu sa masse et sa géométrie initiale (essai destructif), ce qui nous empêche de mesurer son volume, tant par une méthode géométrique que par poussée d'Archimède.

Pour ces raisons, nous avons mesuré la densité et l'infra-densité des échantillons qui possèdent la même taille et les mêmes caractéristiques mécaniques des échantillons testés. En effet, ce sont les échantillons définitifs mais leur surface ne sont pas très propres afin d'obtenir l'image sous l'ESEM. Ils sont donc utilisés en tant qu'échantillons témoins.

Compte tenu du poids faible de nos échantillons (au tour de 10 mg) ainsi que la précision de la balance utilisée (10^{-2} mg), nous réalisons des mesures sur 3 échantillons de peuplier et 4 échantillons d'épicéa à la fois. Dans ce cas, le poids mesuré est plus élevé donc moins d'erreur.

Les caractéristiques des échantillons testés sont présentées dans le Tableau 2.1

	V. mesuré mm ³	V. saturé mm ³	M. mesurée mg	M. saturée mg	M. anhydre mg	Humidité %	Densité kg/m ³	Infradensité kg/m ³
Peuplier	74,2	81,15	34,2	79,2	31,26	9,40	461	385
Epicéa	127,9	135,4	36,4	131,2	33,79	7,72	285	250

Tableau 2.1 : Caractéristiques des échantillons utilisés dans l'essai de compression en grande déformation

II. Matériel végétal

Le retrait du bois pose de gros problèmes durant son séchage, en particulier pour des mesures sur micro-échantillons. En raison des hétérogénéités, les fibres se courbent durant le séchage et provoquent la déformation de l'échantillon. Il est donc nécessaire de faire sécher à l'air libre l'ensemble de la rondelle d'arbre avant tout prélèvement d'échantillons puis d'y découper les échantillons définitifs seulement après séchage complet, ceci afin de bien conserver la structure interne du bois.

1. Généralités

Dans le chapitre précédent (Chapitre 1 : Bibliographie), nous avons présenté des catégories botaniques du bois des résineux et du bois des feuillus ainsi que leurs différents anatomiques et mécaniques. Afin de les mieux comprendre, nous avons choisi deux essences du bois, peuplier et épicéa (un feuillu et un résineux), pour les caractériser dans le cadre de ce travail. Une série d'essais de compression en grande déformation sur ces deux essences du bois a été réalisée, présentée dans le chapitre 4.

De plus, comme on le sait, le comportement mécanique du bois est modifié quand un arbre est courbé naturellement ou artificiellement (bois de compression chez les résineux et bois de tension chez les feuillus). Afin d'étudier ces modifications et de comparer son comportement mécanique avec celui d'un arbre normal, nous avons utilisé la rondelle d'un arbre de peuplier qui a été volontairement incliné durant sa croissance. Cet arbre a été fourni par Gilles Pilate, de l'Unité de Recherche Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières (UR AGPF) – INRA Orléans. Une série d'essais de flexion 4 points et de traction a été réalisée et présentée dans le chapitre 3.

2. Usinage des micro-éprouvettes

L'échantillonnage est bien entendu une opération clé de ce travail de caractérisation à l'échelle des tissus. Dans tous les cas, il faut d'abord débiter le bois à partir des tronçons ou des rondelles du bois. Dans cette étape, nous utilisons une scie circulaire ou une scie à ruban.

a. Essai de flexion quatre points

i. Zones d'échantillonnage

L'échantillonnage est effectué afin de distinguer trois zones dans chaque rondelle :

- bois de réaction est repérable à l'œil nu par sa différence de couleur et une propriété de réflexion de la lumière différente des autres parties de la rondelle.
- bois opposé est défini comme situé diamétralement opposé au bois de réaction.
- bois normal est situé entre les deux.

ii. Usinage

L'usinage est effectué en deux principales étapes.

Dans un premier temps, nous réalisons une tranche selon le plan radial-longitudinal, de faible épaisseur dans la direction tangentielle. Nous utilisons pour cela une micro-tronçonneuse (Figure 2.26). Cet outil de précision agit comme une scie circulaire et permet de réaliser des coupes (sous aspersion d'eau ou non) avec une grande qualité de planéité. La vitesse de rotation de la scie et la vitesse d'avancement de l'échantillon peut être ajustées pour obtenir les

meilleurs résultats. Typiquement la vitesse de rotation est d'environ 800-1200 tours/min et la vitesse d'avancement est environ 150-250 $\mu\text{m}/\text{sec}$.

A ce stade les dimensions longitudinale et tangentielle du futur échantillon sont finalisées. Dans un deuxième temps, il s'agit d'extraire de cette plaque les échantillons selon la direction radiale en prenant soin à leur dimension radiale. Cette opération n'est pas possible à l'aide de la micro tronçonneuse dont la lame est trop épaisse (perte de matière dû au trait de scie d'environ 2 mm) pour pouvoir envisager plusieurs découpes au sein du même accroissement annuel.

Nous avons donc élaboré le processus suivant :

- On sépare "grossièrement" les différents échantillons à l'aide d'un cutter. Si nous avons bien pris soin auparavant d'orienter les découpes selon le fil du bois, cette opération permet presque d'obtenir l'éprouvette finale.
- Les dimensions finales selon la direction radiale sont obtenues à l'aide d'une ponceuse à plateau tournant (Figure 2.26). La planéité du plateau de verre sur lequel est collé l'abrasif et le choix du grain permettent un ponçage plan de grande qualité. La difficulté tient à la garantie de la dimension finale désirée. Nous avons donc conçu un porte-échantillon en bois dur qui permet de serrer la pièce de bois entre 2 plaques espacées de l'exacte épaisseur tangentielle de la pièce de bois. Une troisième plaque coulissante permet de régler la profondeur (Figure 2.26). Il suffit ensuite de poncer le surplus afin d'obtenir ce qui sera la dimension finale selon la direction radiale.

Le processus d'échantillonnage est représenté dans la Figure 2.25

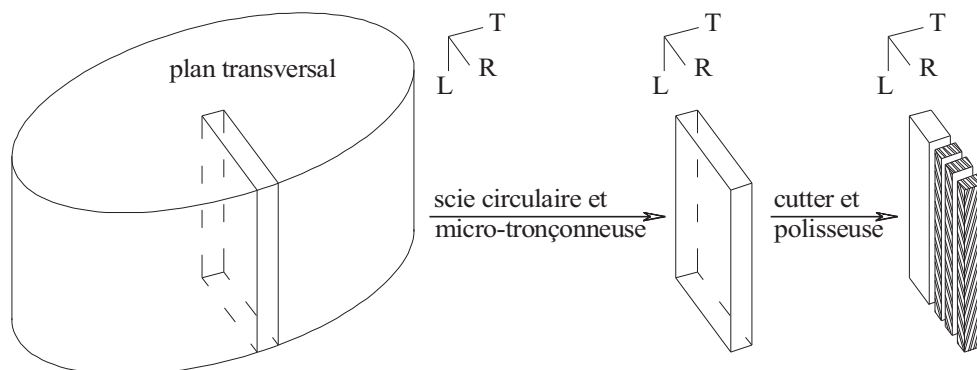


Figure 2.25 : Usinage des échantillons du bois pour l'essai de flexion 4 points

Finalement, les éprouvettes sont taillées avec une épaisseur finale assez faible pour l'essai de flexion. Il s'agit, dans les gammes de module d'Young que nous serons amenés à mesurer, d'optimiser les sections afin de garantir une flèche suffisante à la mesure tout en gardant à l'esprit qu'une réduction trop drastique de l'épaisseur entraîne une erreur sur celle-ci dont l'effet est en puissance 3 sur le résultats lors du dépouillement. Un compromis a été trouvé avec une hauteur de section de 0,7 mm.

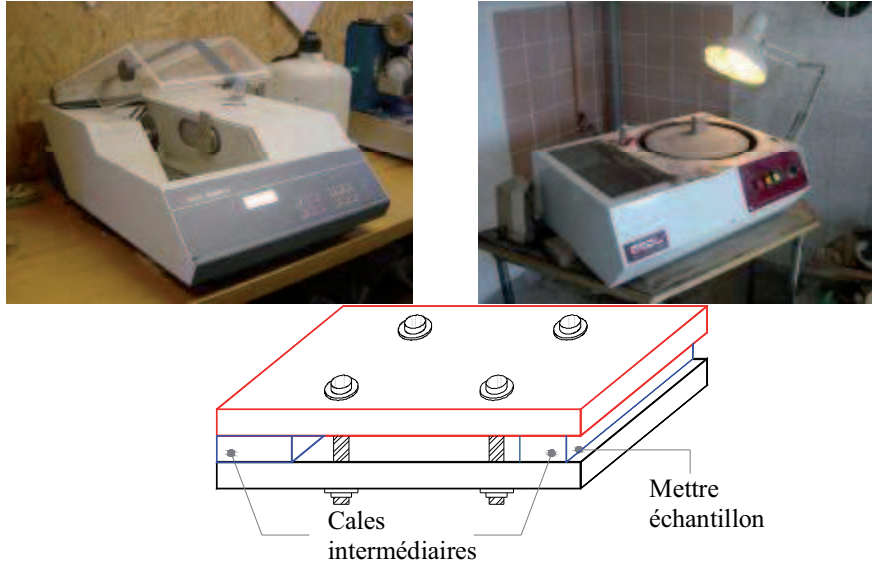


Figure 2.26 : Micro tronçonneuse, Struers Accutom-5, Polisseuse et Porte-échantillon

b. Essai de traction simple

Lors des essais de traction en observant des images de l'état de surface des échantillons au niveau microscopique, l'échantillonnage a un rôle très important et influera beaucoup sur les résultats de l'essai. Premièrement, en utilisant la méthode de corrélation d'images pour le calcul de déformation de l'échantillon, nous devons assurer que les images de l'état de surface des échantillons soient belles. Deuxièmement, la zone considérée et visée par microscope optique est le 3^{ème} cerne donc elle doit se situer au milieu de l'échantillon. De plus, en supposant que la contrainte soit constante sur toute la longueur de l'échantillon, il faut assurer que sa section (largeur et épaisseur) soit identique sur toute sa longueur. Pour ces raisons, l'échantillonnage doit être réalisé avec grand soin.

i. Zone d'échantillonnage

Ces essais sont réalisés en association avec les essais de flexion quatre points, prélevés juste au-dessus en direction longitudinale, afin d'obtenir une caractérisation complète du comportement mécanique du bois au niveau microscope dans les trois directions (R, T, L). Ils sont donc réalisés sur le même matériel et les mêmes zones d'échantillonnage (bois de tension, bois normal et bois opposé).

ii. Usinage

La rondelle de tronc d'arbre, lorsqu'elle comporte du bois de réaction, se divise en trois zones : le bois de tension, le bois normal, le bois opposé (à comprendre comme "opposé" au bois de tension). Pour chaque type de bois, on prélève deux blocs : l'un dans la direction tangentielle et l'autre dans la direction radiale. Le débit du bloc s'effectue ensuite dans la direction longitudinale pour obtenir les échantillons définitifs (Figure 2.27).

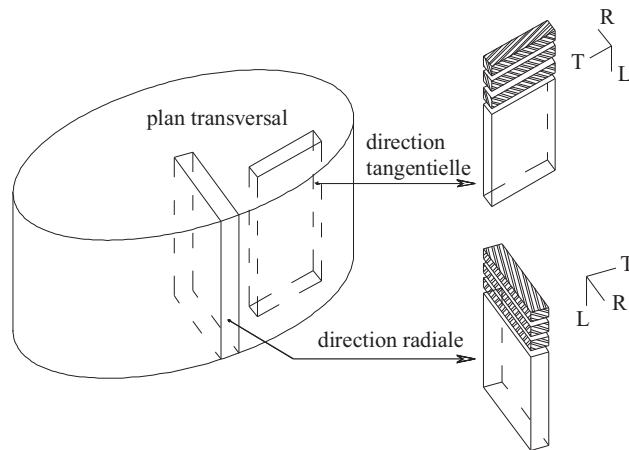


Figure 2.27 : Débit des échantillons du bois pour l'essai de traction

Du fait de la faible épaisseur de la rondelle que nous avons en notre possession, il est nécessaire d'employer une méthode de coupe permettant d'économiser la matière. La micro-tronçonneuse est très rapide (quelques secondes par échantillon) mais enlève beaucoup de bois à chaque coupe (2,1 mm), ce qui équivaut approximativement à un échantillon (2 mm) perdu à chaque passage. La scie à fil diamanté (Figure 2.28) est beaucoup plus économique et n'enlève que 0,3 mm de bois à chaque passage. Ses inconvénients sont la durée de coupe (plus de 30 minutes par échantillon) ainsi que le prix élevé du fil.

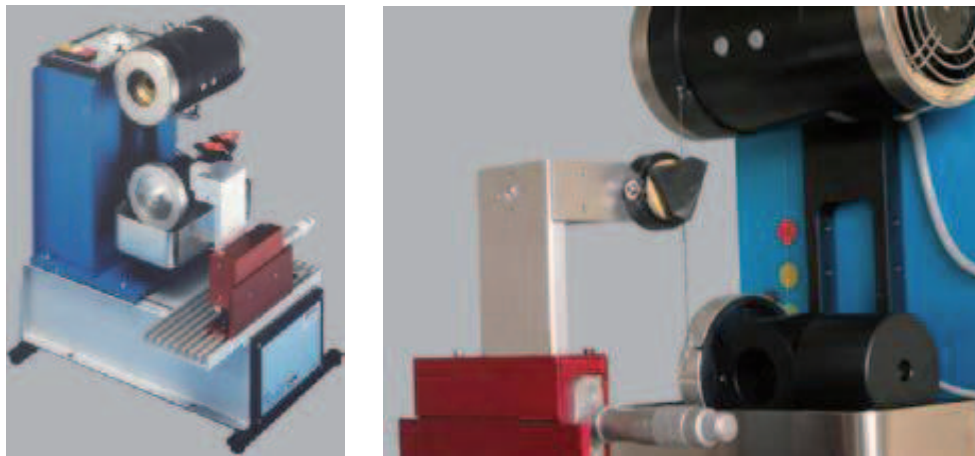


Figure 2.28 : Scie à fil diamanté W3241

Après le débit des échantillons définitifs, l'une de leurs deux faces transversales doit être soigneusement polie afin d'obtenir un bon état de surface permettant l'observation et la mesure du champ de déformation sous un microscope optique.

Le ponçage est réalisé avec grand soin grâce à un porte-échantillon spécialement réalisé pour ce travail. Ce dernier permet l'encastrement d'une épaisseur connue d'échantillon sur toute sa longueur ; ainsi, un ponçage sur la polisseuse jusqu'au porte-échantillon assure-t-il une épaisseur régulière sur toute la longueur.

c. Essai de compression

Ces essais sont réalisés sur la platine de compression dans la chambre d'observation du microscope électronique à balayage environnemental FEI QUANTA 200. Dans ce cas, la qualité d'image obtenue par polissage est de très mauvaise qualité. Pour obtenir de belles

images dans ces essais, la surface des échantillons est préparée à l'aide d'un microtome à glissières MICROM HM 440^E muni d'un porte-lame. Chaque partie de la lame jetable est à usage unique.

Les essais sont réalisés selon les directions radiale et tangentielle de bois de peuplier (feuillu) et d'épicéa (résineux). Les images obtenues sous microscope permettent de visualiser les mécanismes de déformation du bois durant l'essai, du domaine élastique au collapse complet des cellules en passant par un domaine de grandes déformations.

i. Rondelle d'épicéa

L'arbre choisi pour l'échantillonnage à 22 ans, il présente 5 cernes de bois de réaction formés après la tempête de 1999.

La largeur du cerne utilisé doit être assez grande pour que l'échantillon soit entièrement dans un cerne: la largeur maximale de cerne disponible ici est de 7 mm.

Pour un essai de traction-compression simple sur un échantillon bois dans le plan transversal, il y a une grosse différence quand on le sollicite selon le sens radial ou tangentiel (**Figure 2.29**). Selon la direction radiale, il ne pose pas de grand problème au niveau de contrainte pure, on peut bien imposer une contrainte normale sur l'échantillon si l'échantillon est bien débité selon la direction radiale. Pourtant, quand on réalise cet essai selon la direction tangentielle, il faut faire attention forcément. D'une part, le bois est un matériau hétérogène et anisotrope, notamment au niveau de la limite de cerne, il y a donc une forte différence au niveau mécanique et anatomique entre le bois d'hiver d'un cerne par rapport le bois de printemps du cerne prochain. D'autre part, il existe l'effet du rayon courbure du cerne. A cause de ces raisons, quand un échantillon est soumis à une sollicitation dans cette direction, il sera apparu une contrainte de cisaillement au niveau de cerne, et la contrainte totale qui apparaît dans l'échantillon n'est pas vraiment normale, l'essai que l'on réalise n'est pas un essai de traction- compression pur.

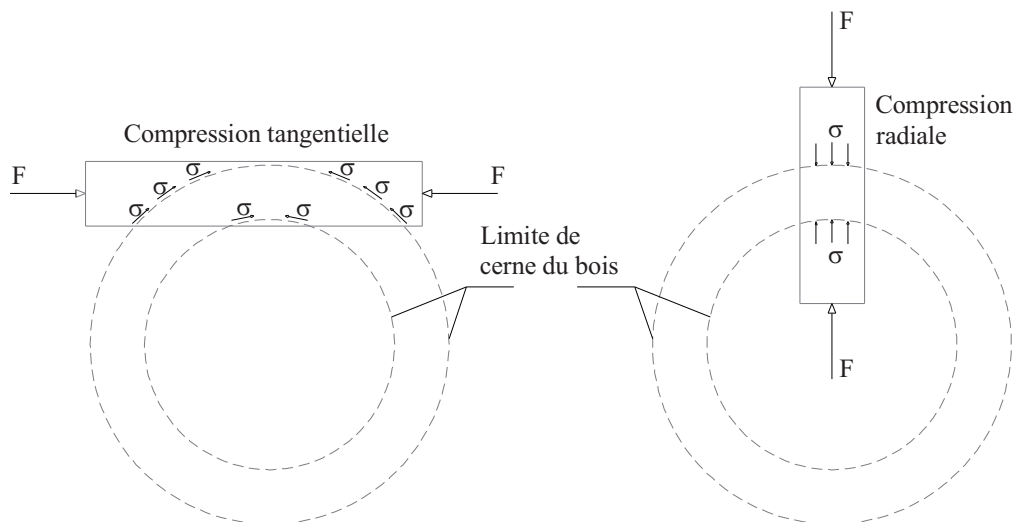


Figure 2.29 : Contrainte au niveau de la limite de cerne de l'échantillon dans l'essai de compression simple

Compte tenu des conditions citées ci-dessus, l'échantillonnage doit réaliser à un cerne assez grand pour que l'échantillon soit à un seul cerne. En évitant maximum possible la partie du bois juvénile, les échantillons sont prélevés au 11^{ème} cerne compté de la moelle. La zone du débit d'échantillon est présentée dans la **Figure 2.30**

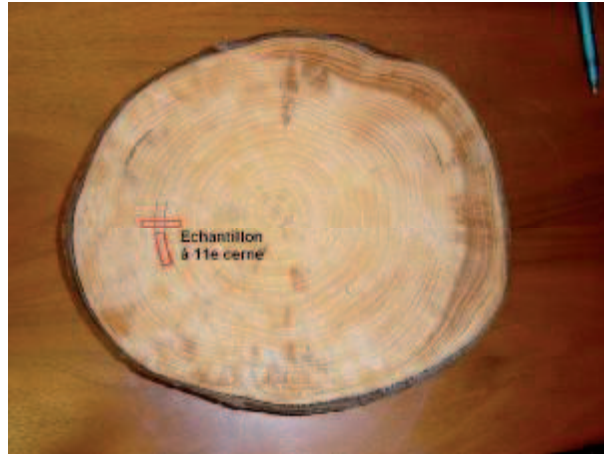


Figure 2.30 : Rondelle de l'épicéa utilisée pour les essais de compression sous microscope électronique à balayage.

ii. Rondelle de peuplier

L'arbre est ici âgé de 10 ans. Pour les mêmes raisons que celles citées précédemment, les échantillons sont débités dans le 8^e cerne compté à partir de la moelle.



Figure 2.31 : Rondelle du peuplier utilisée pour les essais de compression sous microscope électronique à balayage.

iii. Prélèvement et préparation des échantillons

La procédure de cet échantillonnage est résumée dans la Figure 2.32

A partir de la rondelle de bois, une tranche est débitée selon la direction radiale grâce à la scie à ruban avec une épaisseur d'environ de 8 mm. Donc on obtient une tranche du bois avec 8mm d'épaisseur (R ou T), 3 cm de largeur (T ou R) et 5 cm de longueur (épaisseur de la rondelle du bois, direction longitudinale). Puis cette tranche est passée la polisseuse pour ajuster son épaisseur. Le porte-échantillon assure que les deux faces de cette tranche sont parallèles avec une épaisseur identique sur toute la longueur de l'échantillon.

Après, cette tranche du bois est coupée par la micro tronçonneuse, on obtient donc un bâtonnet selon la direction longitudinale. Sa section est dans le plan transversal et c'est le plan d'observation des images lors de l'essai. Finalement, la surface de la section du bâtonnet est préparée grâce au microtome et son état de surface est vérifié par microscope optique. Le dernier travail à effectuer est le débit d'une petite épaisseur du bâtonnet pour obtenir

l'épaisseur souhaitée de l'échantillon. Durant cette découpe, la surface préparée au microtome doit être préservée : la scie à fil diamantée permet de réaliser ce travail délicat.

III. Conclusion

Le matériel du laboratoire et l'enceinte conçue pour cette étude du bois ont permis de réaliser des essais pour lesquels on s'affranchit des comportements mécaniques du bois à l'échelle des tissus. On peut dire que les résultats obtenus dans les chapitres suivants dépendent beaucoup de l'échantillonnage. Plusieurs expériences nous montrent que pour les essais de micromécanique du bois, notamment les résultats exploités par le traitement d'images (corrélation d'images), la qualité de l'image initiale et des images déformées décident la précision de résultat final.

En plus, pour les essais qui caractérisent le comportement dans un cerne de bois, l'échantillonnage doit être réalisé soigneusement en tenant compte l'anisotropie, l'hétérogénéité du bois dans le plan transverse, ainsi que l'effet du rayon courbure du cerne.

Une présentation du débit de microéchantillon pour l'essai sous microscope est illustrée dans la *Figure 2.32*

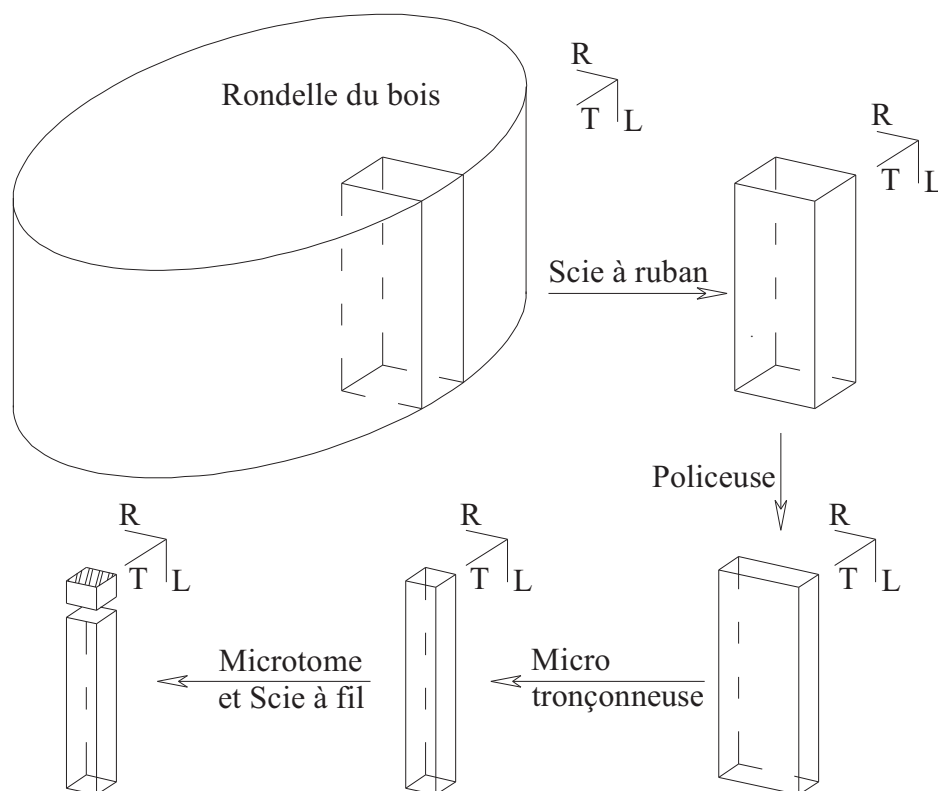


Figure 2.32 : Usinage des échantillons du bois pour l'essai de compression sur une micro platine dans la chambre d'un microscope électronique à balayage

Chapitre 3 Caractérisation mécanique du bois de peuplier à l'échelle des tissus (bois normal, de réaction et opposé).

Introduction :

Le bois est un matériau hétérogène et fortement anisotrope. C'est pourquoi les trois directions matérielles sont incontournables pour définir son comportement: Longitudinale (L) Tangentielle (T) et Radiale (R), de même que la position de prélèvement dans l'arbre (aubier/duramen, bois initial/bois final, bois normal/bois de réaction). Il est bien connu que la largeur de chaque cerne d'accroissement (correspondant à une saison de végétation) est de quelques millimètres et comprend du bois de printemps et du bois d'été qui ont des comportements très contrastés, notamment chez les résineux et les feuillus à zone initiale poreuse. Pour toutes ces raisons, les essais mécaniques sur micro-échantillons sont indispensables pour obtenir des renseignements sur le comportement du bois au niveau microscopique. L'objectif ultime de tels essais est de réussir des mesures selon les trois directions matérielles du bois à l'échelle des tissus.

Les travaux proposés dans ce chapitre concernent le comportement mécanique du bois de peuplier dans la direction longitudinale selon la position de l'échantillon dans un cerne annuel, ainsi que la comparaison du comportement élastique dans les trois directions L, R, T du bois normal, tendu et opposé de peuplier.

Ce chapitre présente aussi des résultats du comportement mécanique en traction et en flexion dans la zone élastique du bois de peuplier de tension à l'échelle des tissus dans ses trois directions.

I. Essais de flexion quatre points du peuplier dans la direction longitudinale

1. Matériel végétal

Cette étude a été réalisée sur un arbre de peuplier grisard hybride (*Populus tremula* X *Populus alba*), clone femelle INRA # 717-1B4, âgé de dix ans et provenant d'essais expérimentaux conduits à l'INRA d'Orléans. Planté en 1996, il a été courbé artificiellement à partir de 1998 afin de forcer l'arbre à produire une zone de bois de tension située dans la section transversale (plan transversal). En raison du faible diamètre de l'arbre et de son âge, les échantillons sont tous issus du bois juvénile.



Figure 3.1 : Photo avant abattage de l'arbre de peuplier courbé artificiellement (Cliché par Assor C.)

Trois types de bois ont été considérés dans cet arbre: bois de tension, bois opposé (180 ° de la zone de bois de tension) et bois normal (90 ° de la zone de bois de tension). D'un point de vue anatomique, les vaisseaux du bois de tension sont moins nombreux [Jourez, 1997] et plus petits en diamètre que ceux de la zone opposée et de la zone normale. Grâce au logiciel « ImageJ », nous observons que le diamètre tangentiel des vaisseaux du bois de tension varie de 20µm à 35µm. En revanche, il est varié dans la plage de 30µm à 50µm dans la zone du bois opposé et du bois normal. Le bois de tension présente aussi des parois des cellules du bois plus épais (avec des contours très ronds) par rapport celles des cellules du bois dans la partie normale et la partie opposée. L'observation microscopique (ESEM) des cellules du bois de tension montre la présence d'une couche gélatineuse G (Figure 3.2).

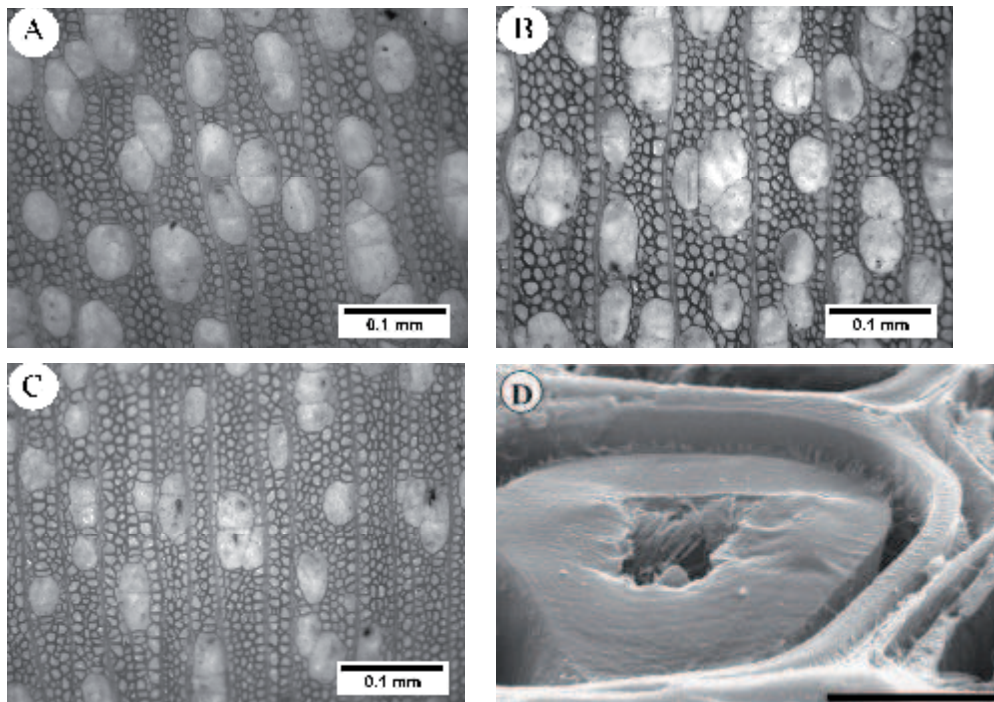


Figure 3.2 : Images sous microscope optique avec un grossissement x20 de peuplier inclin (A : bois normal ; B : bois opposé ; C : bois de tension) et couche G de peuplier de tension sous microscope électronique (D : barre d'échelle 5µm [Clair B., 2001])

Dans l'essai de flexion quatre points, l'épaisseur de l'échantillon est faible (0,7 mm environ) afin de faciliter le chargement. La largeur de cerne étant de quelques millimètres environ, on peut prélever plusieurs échantillons dans un cerne (Figure 3.3) afin de considérer la variabilité de caractéristiques mécaniques du bois dans le cerne.

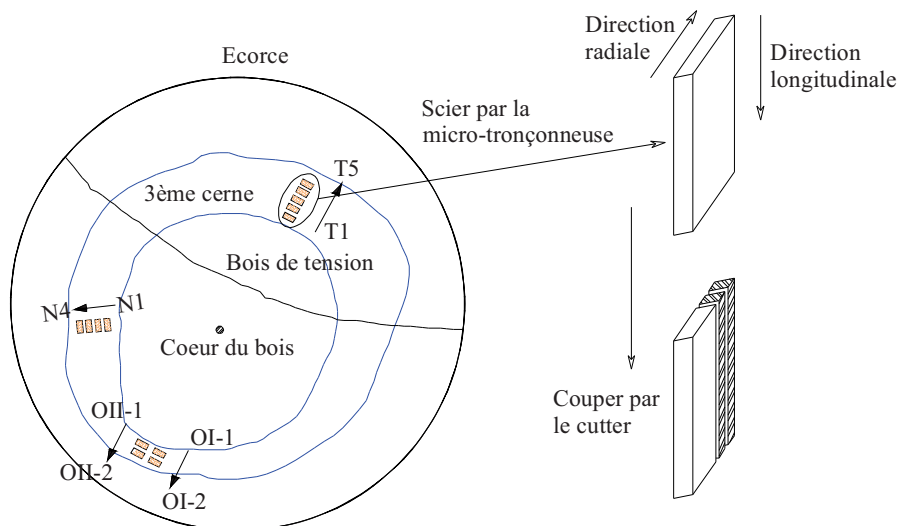


Figure 3.3 : Échantillonnage des échantillons par la micro-tronçonneuse et par le cutter
Abréviations utilisées dans ce texte :

T1 : Échantillon 1 dans la partie tendue du bois

N1 : Échantillon 1 dans la partie normale du bois

OI-1 : Échantillon 1 de la tranche I (selon la direction radiale) dans la partie opposée du bois (Figure 3.3)

L'échantillonnage a été présenté au chapitre 2 (Matériel et méthode).

2. Tests de flexion 4-points

a. Essais sur bois saturé

Pour tous les essais de flexion, le bois humide a posé de gros problèmes expérimentaux. En effet, le phénomène de fluage est particulièrement important lorsque l'eau joue son rôle de plastifiant. Il devient alors très difficile d'évaluer la part de déformation élastique de celle du fluage. Pour illustrer ce phénomène, la Figure 3.4 montre l'évolution de la flèche lors d'un essai de flexion 4-points avec une charge de 1.5 N, puis le phénomène de recouvrement partiel après la décharge complète.

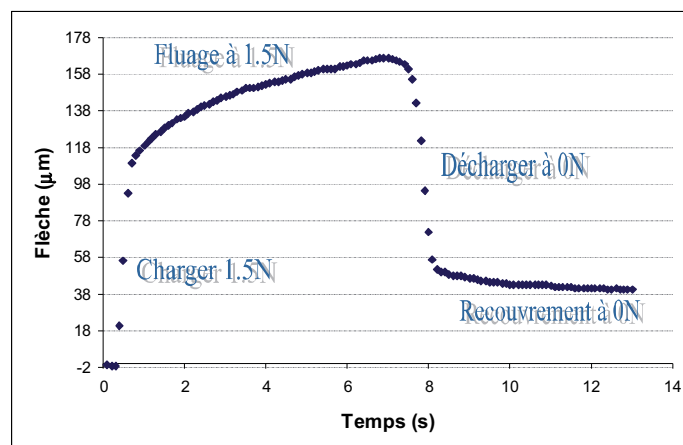


Figure 3.4 : Fluage (et recouvrement) après une charge (puis une décharge) de 1.5 N pour un échantillon de peuplier humide.

Afin de parvenir à effectuer des mesures en dépit de cette perturbation, nous avons procédé à des mesures plus rapides. A chaque incrément de force, les mesures de flèche sont acquises

pendant seulement 3 secondes à raison d'un point tous les dixièmes de seconde. La valeur moyenne des 30 acquisitions est alors retenue comme point de mesure pour cette valeur de force.

Pour caractériser plus en détail le phénomène de fluage, nous avons testé un échantillon humide en charge cyclique (Figure 3.5). Afin de limiter les effets importants de fluage lors de chargement, nous limitons ici la valeur maximale de force appliquée à 0.7 N, l'incrément de force est toujours de 0.1N pour chaque palier durant 3 secondes. Dans ces conditions, la courbe de la flèche en fonction du temps (Figure 3.5) montrent que l'échantillon du bois humide présente fortement un comportement visqueux

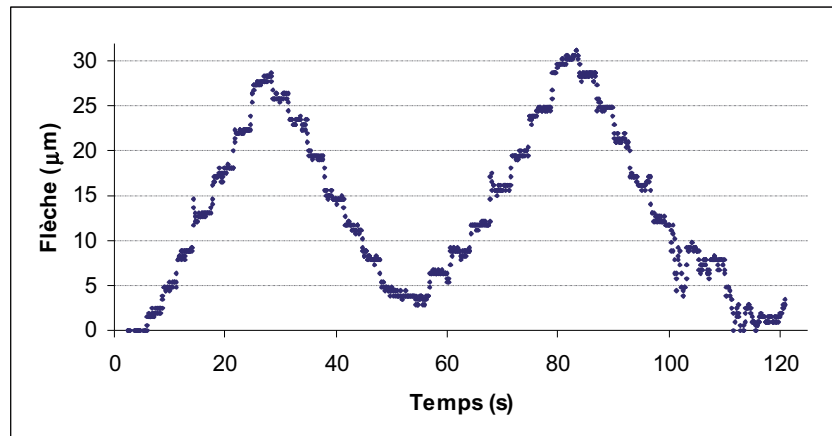


Figure 3.5 : Charge et décharge en palier pour l'échantillon saturé de peuplier jusqu'à 0.7N, l'incrément de force est de 0.1N toutes les 3 secondes

L'évolution du déplacement en fonction de la force appliquée de cet essai est représentée dans la Figure 3.6. Elle nous montre qu'au début de chaque période, charge ou décharge, le déplacement est toujours inerte vis-à-vis de la force appliquée.

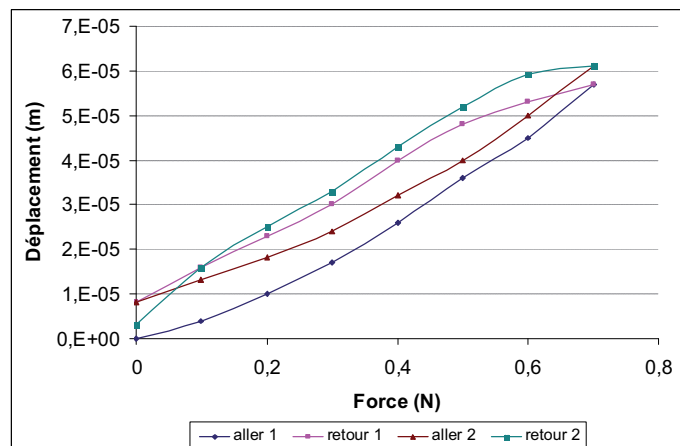


Figure 3.6 : Essai de charge cyclique sur bois humide

On voit aussi que le cycle aller-retour n'est pas fermé. Cependant, la valeur à la fin du cycle, pour une charge nulle, ne varie pas énormément. Ces problèmes peuvent être dû à la fois à des frottements entre échantillon/rotules et à une partie de comportement visqueux.

Par ailleurs, les courbes « aller- retour » sont bonnes sauf le premier et le dernier point (à cause de frottement, comportement visqueux etc.). Donc il faut juste supprimer les mauvais points et tracer les courbes de tendance à partir des points qui restent. La Figure 3.7 montre les courbes de tendance « aller- retour » après la correction.

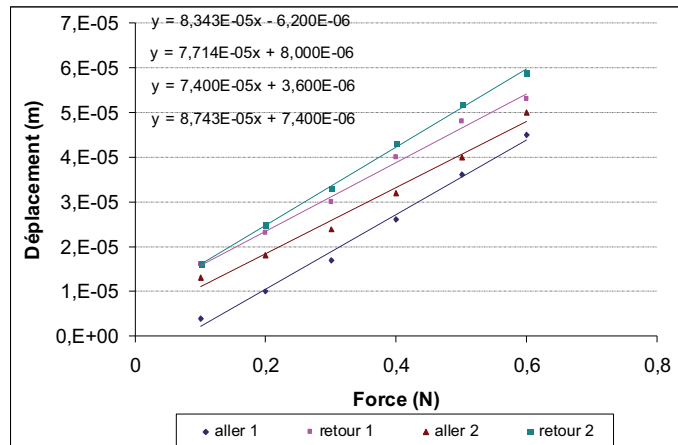


Figure 3.7 : Exploitation des résultats bruts de peuplier humide : Le module d'Young est déterminé par la pente de la courbe tendance (les équations de haut en bas : aller 1 ; retour 1 ; aller 2 ; retour 2)

Les courbes tendances corrigées sont presque parallèles et donc leurs pentes ($\tan\alpha$) portent des valeurs voisines. De plus, les erreurs lors de l'essai sont cumulées au résultat de chaque période de chargement/déchargement. Pour ces raisons, nous choisissons donc la première courbe de tendance (aller 1) pour déterminer le module d'Young de l'échantillon humide de cet essai.

b. Essais sur bois sec

Les essais sur bois sec sont plus faciles à conduire car, dans la plage de forces exercées, les contributions du fluage et du recouvrement à la flèche totale observée restent faibles. Cette conclusion peut être confirmée par essai sous chargement cyclique. L'échantillon est chargé jusqu'à 1,2 N, soit 12 paliers de charge. Visiblement, l'aller et le retour dans l'essai sur bois sec sont similaires.

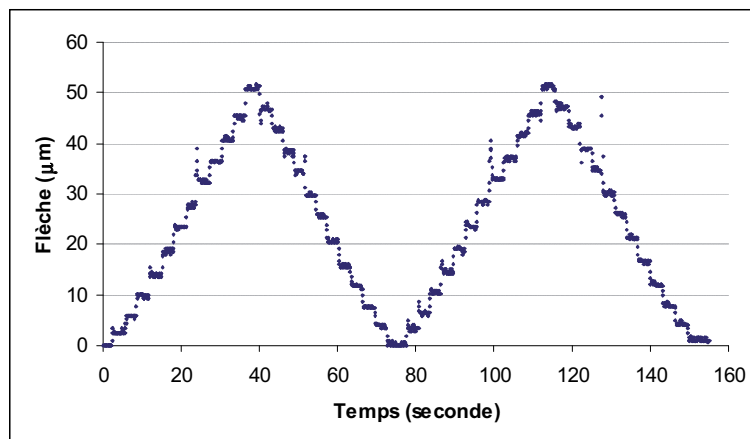


Figure 3.8 : Charge et décharge en palier pour l'échantillon sec de peuplier jusqu'à 1,2 N, l'incrément de force est de 0,1N chaque 3 secondes

Les résultats bruts, tels qu'indiqués sur la Figure 3.8 sont ensuite traités afin d'obtenir la variation de la flèche à mi-longueur de l'échantillon en fonction de la force sollicitée. Le Figure 3.9 montre quatre séries de résultats ainsi que leurs courbes de tendance qui correspondent aux allers/retours lors de l'essai sous chargement cyclique. Ces quatre séries de résultats semblent pareilles, elles présentent des courbes de tendance parfaitement linéaires donc on est certainement dans la zone élastique linéaire du bois.

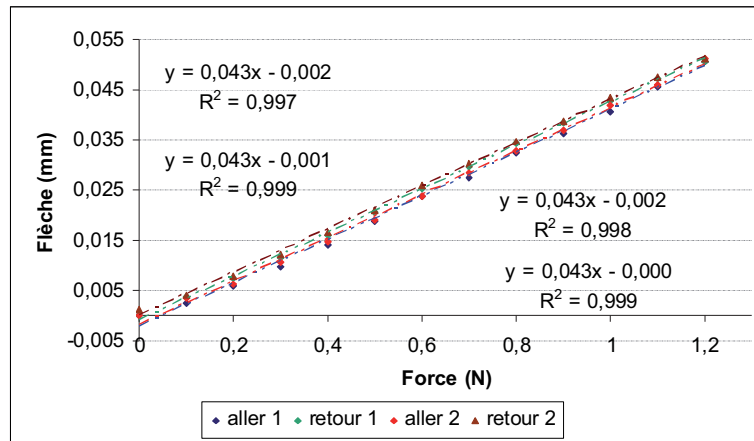


Figure 3.9 : Exploitation des résultats bruts de peuplier sec : Le module d'Young est déterminé par la pente de la courbe de tendance (les équations de haut en bas : aller 1 ; retour 1 ; aller 2 ; retour 2)

Le module d'Young en fonction de la géométrie de l'échantillon (section et longueur) déterminé à partir de la formule ci-dessous :

$$E = \frac{l^2(L-l)}{32I \cdot \tan \alpha}$$

Avec : L et l : distance entre les appuis extérieurs et intérieurs du dispositif de flexion quatre points

α : angle de la courbe de tendance du diagramme Force (F) – Flèche (f) à mi-longueur de l'échantillon, donc $\tan \alpha = \frac{f}{F}$ déterminé directement de l'équation de la courbe de tendance (Figure 3.9).

I : Moment quadratique de la section b x h ; $I = \frac{bh^3}{12}$

Les quatre courbes de tendance présentées dans la Figure 3.9 se présentent une pente unique, c'est-à-dire la rigidité de l'échantillon sec est toujours stable durant l'essai de flexion quatre points sous chargement cyclique. En raison de cette explication, dans les exploitations des résultats bruts de cette série d'essai, nous choisissons donc la première courbe de tendance (aller 1) pour déterminer le module d'Young.

3. Essais définitifs en flexion longitudinale

a. Essais sur échantillons humides

Quand on mesure les dimensions (largeur et épaisseur) d'un échantillon bois par pied à coulisse, il y a toujours une plage de variation des dimensions car il est souple à l'état saturé. Après avoir mesuré ses dimensions, nous trouvons que les largeurs des échantillons sont de $0,9 \pm 0,02$ mm et ses épaisseurs sont de $1,8 \pm 0,02$ mm. Donc les dimensions initiales des échantillons utilisés dans les calculs sont fixés : $R \times T \times L \sim 0,9 \times 1,8 \times 35$ (mm³).

b. Essais sur échantillons secs à l'air

Après une période de séchage lent à l'air ambiant, il a été nécessaire de redimensionner les échantillons par ponçage, afin d'avoir une géométrie correcte. En effet, le retrait engendre des déformations non homothétiques qui ne garantissent plus la forme parallélépipédique de la poutre initiale. L'autre effet positif de ce polissage est aussi de réduire la section des

échantillons, qui, une fois secs, étaient trop rigides pour permettre des mesures dans de bonnes conditions avec la gamme de forces disponible sur notre micro- machine de flexion. Les nouvelles dimensions des échantillons secs à l'air et leurs caractéristiques sont reportées dans le Tableau 3.1.

Ech.	Epais. mm	Larg. mm	Long. mm	Vol. mm ³	M. mesurée mg	M. sèche mg	Densité kg/m ³	Humidité %	Mod. d'Young GPa
T1	0,62	1,74	32,56	35,13	20,6	19,1	586	7,85	35,5
T2	0,64	1,73	32,62	36,12	23,1	21,9	640	5,48	33,8
T3	0,69	1,71	32,61	38,48	24,5	22,7	637	7,93	32,7
T4	0,62	1,70	32,79	34,56	22,8	21,1	660	8,06	33,5
T5	0,60	1,71	32,85	33,70	23,2	21,6	688	7,41	36,1
N1	0,63	1,59	31,85	31,90	15,2	14,0	476	8,57	15,7
N2	0,62	1,58	31,83	31,18	17,2	16,3	552	5,52	16,7
N3	0,63	1,56	31,80	31,25	17,9	16,5	573	8,48	18,7
N4	0,63	1,61	31,85	32,31	19,9	18,4	616	8,15	21,7
OI-1	0,60	1,60	32,09	30,81	14,3	13,2	464	8,33	13,8
OI-2	0,62	1,62	32,04	32,18	17,6	16,2	547	8,64	17,7
OII-1	0,62	1,66	32,03	32,97	17,8	16,7	540	6,59	15,0

Tableau 3.1 : Caractéristiques des échantillons dans la partie tendue (T), normale (N) et opposée(O) du peuplier de réaction à l'état sec à l'air

En mesurant l'infra-densité des échantillons, il faut les mettre à l'état saturé. Leurs caractéristiques (volume, masse, dimensions, etc.) sont alors modifiées. Nous devons les redéfinir, présentées dans le Tableau 3.2

Ech.	Epaisseur mm	Largeur mm	Long. mm	Vol. saturé mm ³	M. sèche mg	Infra-densité kg/m ³
T1	0,64	1,77	32,56	36,88	19,1	518
T2	0,66	1,83	32,62	39,40	21,9	556
T3	0,72	1,81	32,61	42,50	22,7	534
T4	0,65	1,81	32,79	38,58	21,1	547
T5	0,64	1,79	32,85	37,63	21,6	574
N1	0,65	1,66	31,85	34,37	14,0	407
N2	0,62	1,68	31,83	33,15	16,3	492
N3	0,65	1,76	31,80	36,38	16,5	454
N4	0,64	1,72	31,85	35,06	18,4	525
OI-1	0,61	1,68	32,09	32,89	13,2	401
OI-2	0,63	1,73	32,04	34,92	16,2	464
OII-1	0,62	1,74	32,03	34,55	16,7	483

Tableau 3.2 : Caractéristiques des échantillons prélevés dans le bois tendu (T), bois normal(N) et bois opposé (O) du peuplier de tension à l'état saturé

On a vu que toutes les deux manières pour mesurer la densité et l'infra-densité du bois comportent aussi des avantages et des inconvénients (voir chapitre 2 : Matériel et Méthode) avec les échantillons petits que l'on a pris dans l'essai. La Figure 3.10 montre la différence entre densité et infra-densité pour chacun des échantillons.

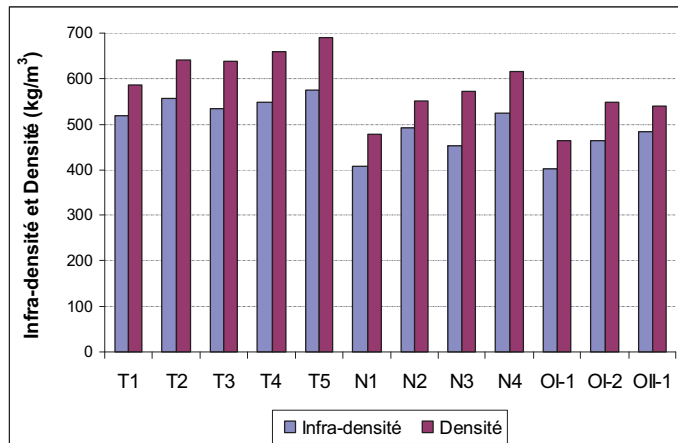


Figure 3.10 : Infra- densité et densité déterminées de deux manières différentes des mêmes échantillons du bois de peuplier de tension

L'infra-densité et la densité ne sont pas mesurées sur la même masse et non plus sur le même volume d'échantillon. Ces différences expliquent les différences entre les résultats obtenus. La Figure 3.10 montre que la densité est toujours plus élevée que l'infra-densité et que ces décalages sont assez constants pour tous les échantillons mesurés. C'est-à-dire il n'y a pas de grandes erreurs dans les mesures de leurs valeurs. Pourtant, comme on en a parlé précédemment (chapitre 2), la mesure de l'infra-densité par l'hypothèse d'Archimède est facilement à porter des erreurs en mesurant des microéchantillons. Nous choisissons donc les valeurs de densité dans les exploitations de résultat de ce travail.

Puisque nous avons déterminé la densité, il est facile de vérifier les différences entre les différentes parties du bois en traçant leurs rigidités obtenues en fonction de leurs densités (Figure 3.11). Deux tendances apparaissent nettement sur cette figure :

- bois normal et bois opposé ont bien un comportement similaire, avec une tendance unique et une valeur qui augmente sensiblement avec la densité,
- conformément aux observations précédentes, le bois de tension est beaucoup plus rigide que les deux autres types de bois, mais le module semble constant, sans aucun effet apparent de la densité, sur une plage de 586 à 688 kg/m³.

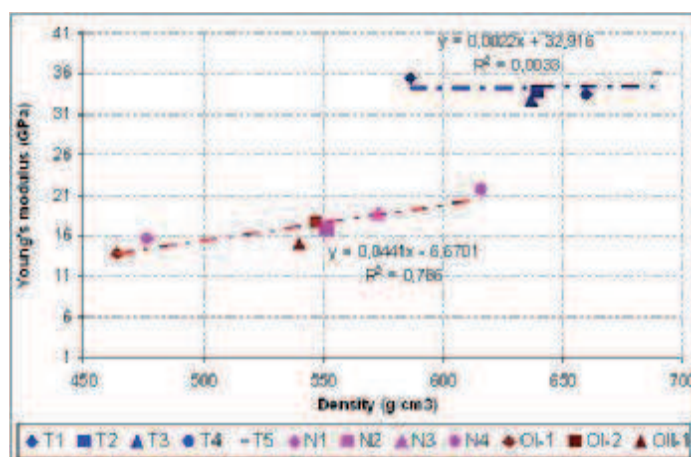


Figure 3.11 : Module d'Young en fonction de la densité dans les trois parties du peuplier de tension

Il faudrait une investigation plus fine pour comprendre pourquoi la rigidité du bois de tension ne semble pas affectée par la densité du bois : bois de tension est plus efficace pour les parties

les moins denses ; densité élevée due à la présence d'éléments pariétaux autres que la couche G ne participant pas à la rigidité longitudinale (ou d'autres tissus que les fibres...).

II. Essais de traction dans le plan transverse

1. Matériel végétal

Pour effectuer ces essais, les échantillons sont usinés dans le même segment de tronc que celui utilisé dans les essais de flexion quatre points. La rondelle utilisée dans ces tests était située juste au-dessous de celle utilisée dans les essais précédents. Les propriétés anatomiques des échantillons dans ces deux séries d'essais sont donc similaires.

2. Test de traction dans le plan transversal

Les échantillons utilisés dans ce travail sont à l'état sec à l'air ambiant, ils portent des taux d'humidité environ 8%, c'est-à-dire que l'influence du fluage n'est pas importante comme celle dans le cas du bois humide que l'on en a parlé précédemment.

Dans toute la série d'essai sur la platine de traction, l'échantillon est chargé jusqu'à environ 90N (limite de sécurité du capteur de force utilisé est de 100N) s'il n'est pas encore cassé. Tenant compte de notre expérience, cette charge peut provoquer une déformation dans la zone de plasticité dans l'essai de traction transversale d'un petit échantillon (section environ 10 mm²).

Par le résultat brut obtenu après chaque mesure, nous avons deux moyens différents pour son exploitation (obtenir la relation contrainte/déformation):

- A partir de la valeur de déplacement imposé nous obtenons la déformation selon le calcul théorique :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Ainsi, à partir de la valeur de force correspondante enregistrée et de la surface d'échantillon, la contrainte est déterminée :

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

La relation contrainte/déformation selon le calcul théorique est présentée dans la Figure 3.12

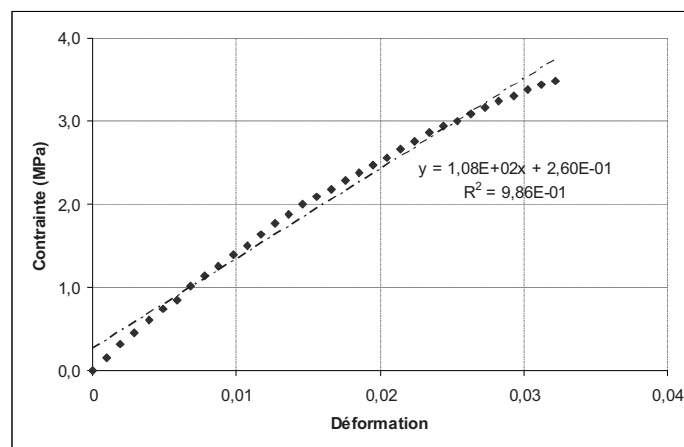


Figure 3.12 : Exploitation des résultats bruts dans l'essai de traction d'épicéa sec selon la direction tangentielle par calcul théorique

- Le résultat brut peut être traité également par corrélation d'images à l'aide du logiciel *MeshPore* (voir chapitre 2). Grâce aux valeurs fournies par *MeshPore* et celles de force relevées en cours d'essai, il est possible de déterminer le module d'Young ainsi que le coefficient de Poisson. La courbe de contrainte/déformation obtenue à l'aide du *MeshPore* est présentée dans la Figure 3.13

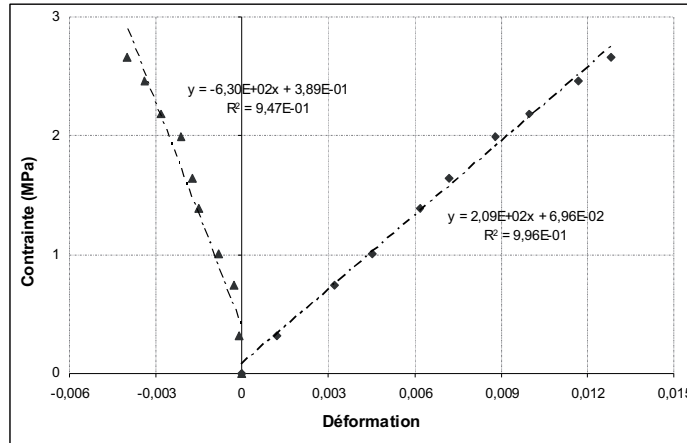


Figure 3.13 : Exploitation des résultats bruts dans l'essai de traction d'épicéa sec selon la direction tangentielle par corrélation d'images à l'aide du logiciel *MeshPore*

En comparant les résultats d'exploitations présentés dans la Figure 3.12 et Figure 3.13, nous constatons qu'à la même valeur de contrainte (3 MPa par exemple), les deux méthodes d'exploitation présentent deux valeurs de déformation différentes ($\epsilon=0.025$ par calcul théorique et $\epsilon=0.014$ par corrélation d'images). Par ailleurs, la méthode de calcul théorique présente une courbe de contrainte/déformation n'est pas linéaire dès au début de l'essai. C'est-à-dire qu'il s'agit du phénomène de déplacement relatif entre mors/échantillon lors de chargement. Nous décidons donc d'utiliser la méthode de corrélation d'images, avec l'aide du logiciel *MeshPore*, pour l'exploitation des résultats.

3. Essais définitifs dans le plan transversal

a. Essai de traction simple du peuplier de tension selon la direction radiale

Ech.	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epais. (mm)	Mod. d'Young (MPa)	Coef. Poisson	$\%(E_R - E_{Rmoy})$ E_{Rmoy}	$\%(U_R - U_{Rmoy})$ U_{Rmoy}
T1	25,18	5,50	1,81	1022	0,96	-10,64	-1,22
T2	23,25	5,46	1,81	1174	1,01	2,65	3,84
T3	24,23	5,46	1,74	1030	1,00	-9,94	3,43
T4	27,00	5,44	1,77	1277	1,06	11,66	9,67
T5	24,34	5,42	1,83	1004	1,03	-12,21	6,51
T6	26,84	5,42	1,82	1290	0,91	12,80	-6,55
T7	24,43	5,37	1,74	1200	0,89	4,93	-8,11
T8	24,11	5,38	1,85	1083	0,98	-5,30	1,63
T9	23,02	5,39	1,85	1213	0,88	6,06	-9,20
valeur moyenne				1144	0,97		
écart-type				111	0,065		
N1	22,18	4,58	1,87	1551	0,87	4,47	-15,86
N2				pas de données			
N3	23,85	4,58	1,84	1458	1,03	-1,80	-0,20
N4	21,37	4,61	1,85	1419	1,07	-4,42	3,90
N5	23,08	4,58	1,78	1577	1,00	6,22	-3,70
valeur moyenne				1485	1,03		
écart-type				75	0,088		
O1	23,80	4,52	1,88	1457	0,81	24,51	-6,21
O2	23,60	4,54	1,87	1188	0,92	1,52	6,40
O3	23,23	4,52	1,82	887	0,87	-24,20	0,60
O4	24,11	4,55	1,87	1413	0,68	20,75	-21,37
O5	22,63	4,55	1,92	906	1,04	-22,58	20,59
valeur moyenne				1170	0,86		
écart-type				270	0,134		

Tableau 3.3 : Synthèse des résultats dans les trois parties : Tendue (T) ; Normale (N) et Opposée (O) du peuplier de tension – essai de traction selon la direction radiale

b. *Essai de traction simple du peuplier de tension selon la direction tangentielle*

Ech.	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epais. (mm)	Mod. d'Young (MPa)	Coef. Poisson	$\%(E_T - E_{Tmoy})$ E_{Tmoy}	$\%(\nu_T - \nu_{Tmoy})$ ν_{Tmoy}
T1	15,20	4,46	1,75	497	0,31	19,47	-2,88
T2	12,79	4,47	1,73	379	0,28	-8,89	-11,55
T3	pas de données						
T4	11,11	4,44	1,72	436	0,25	4,81	-22,28
T5	13,31	4,43	1,78	401	0,34	-3,61	8,29
T6	11,86	4,45	1,92	448	0,40	7,69	26,64
T7	12,98	4,43	1,92	395	0,35	-5,05	11,65
T8	11,77	4,42	1,91	470	0,30	12,98	-5,46
valeur moyenne				432	0,32		
écart-type				43	0,052		
N1	8,53	3,65	1,78	459	0,53	-19,90	22,98
N2	11,10	3,68	1,68	459	0,39	-19,90	-10,74
N3	11,98	3,72	1,77	539	0,40	-5,93	-6,58
N4	9,85	3,78	1,76	588	0,45	2,62	4,50
N5	10,17	3,80	1,77	592	0,44	3,32	2,07
valeur moyenne				527	0,44		
écart-type				66	0,056		
O1	pas de données						
O2	13,32	3,59	1,77	361	0,45	-24,53	14,72
O3	12,53	3,58	1,65	481	0,37	0,56	-5,44
O4	13,25	3,59	1,78	389	0,46	-18,68	17,75
O5	10,95	3,60	1,78	448	0,39	-6,34	-1,45
valeur moyenne				420	0,42		
écart-type				55	0,045		

Tableau 3.4 : Synthèse des résultats dans les trois parties : Tendue (T) ; Normale (N) et Opposée (O) du peuplier de tension – essai de traction selon la direction tangentielle

On constate que le module d'Young et le coefficient de Poisson sont variables pour les différents échantillons dans chaque type de bois malgré leur proximité dans la rondelle de bois. Cependant, les variations de module d'Young par rapport à la valeur moyenne sont faibles, moins de 10% dans toutes les parties et toutes les directions du peuplier de réaction, sauf quelques résultats, notamment ceux des essais dans la partie opposée (jusqu'à 24%), ce qui est acceptable pour une expérimentation sur micro-échantillons.

Dans toutes les deux directions, radiale et tangentielle, le bois normal présente un coefficient de Poisson plus élevé par rapport aux bois de tension et bois opposé, c'est-à-dire qu'il est plus anisotrope. Dans la direction radiale, il présente le coefficient de Poisson $\nu_{RT} \sim 1.03$. Cette valeur énorme est possible d'expliquer par structure cellulaire du matériau bois, elle est également cohérente avec le résultat du travail de Farruggia [Farruggia, 1998] sur l'épicéa ($\nu_{RT} \sim 1.07$).

D'autre part, le rapport écart-type/valeur moyenne du module d'Young dans chaque type de bois est au tour de 10%, sauf celui du bois opposé selon la direction radiale (23%). Cet écart peut être expliqué par la caractéristique anatomique du bois opposé. Il possède une largeur de cerne plus faible par rapport aux autres parties du cerne. Cela a deux conséquences : une plus forte hétérogénéité des échantillons issus de cette zone et une plus grande difficulté d'usinage des échantillons dans la zone désirée de la rondelle. Ces deux raisons peuvent expliquer la plus forte variabilité constatée dans la partie "bois opposé".

III. Résultats des essais mécaniques dans les trois directions du peuplier de tension

1. Essai de flexion quatre points dans la direction longitudinale

a. Echantillon humide

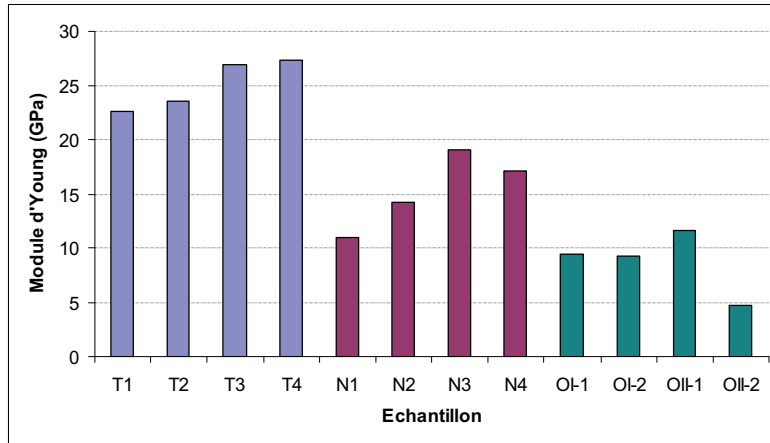


Figure 3.14 : Module d'Young longitudinal mesurés dans les différents types de bois de peuplier à l'état saturé.

Dans la Figure 3.14, on voit que le module d'Young pour l'échantillon O_{II-2} est vraiment différent des autres, peut-être à cause d'un problème de manipulation, il y a des conditions en dehors qui influent sur ce résultat. Ce résultat aberrant est supprimé.

Effectivement, le bois de tension montre un module d'Young bien plus fort que dans les autres zones de prélèvement. Il varie de 22.6 GPa ~ 27.3 GPa selon la position de l'échantillon sur la largeur du cerne débité. Il semble vrai pour le bois normal également. Cela confirme encore une fois que la cellule est plus « rigide » vers le bois d'été.

Par contre, il n'y a pas de différence entre le module d'Young des trois échantillons O_{I-1} ; O_{I-2} et O_{II-1} (on ne considère pas l'échantillon O_{II-2} car son résultat est vraiment aberrant). Ils portent les caractéristiques mécaniques plus faibles dans toutes les trois zones du bois de tension, leurs valeurs de module d'élasticité varient de 9.26 GPa à 9.49 GPa.

Pour le bois normal, ses comportements mécaniques varient aussi en fonction de position des échantillons sur la largeur de cerne (comme dans la partie tendue) sauf le dernier échantillon (N₄), peut-être à cause de la manipulation quand on débite l'échantillon. C'est raisonnable si on dit que cet échantillon comprend une partie du bois de printemps de l'an dernier (voir Figure 3.3). Le module d'Young dans cette zone varie de 11 GPa à 19 GPa.

Selon plusieurs auteurs (D. Guitard, 1987 ; R. Marchal et al., 2009), le module d'Young selon la direction longitudinale du peuplier à 12% de l'humidité varie entre 8 GPa et 10 GPa environ. Donc on trouve les résultats dans notre recherche plus importants par rapport à eux, même à l'état saturé. Il y a deux causes principales pour expliquer ces différences :

- Notre essai est réalisé sur le peuplier de tension : Le bois de tension porte le comportement mécanique plus rigide que le bois normal, dans toutes les zones de la rondelle du bois.
- Nous avons réalisé des essais sur des micro- échantillons : D'une part, ils sont quasiment plus homogènes que les échantillons à grandes dimensions, il n'y a pas de défauts qui influent sur le comportement mécanique de l'échantillon. D'autre part, nos

échantillons sont débités toujours dans un cerne, théoriquement il n'y a pas de cisaillement qui applique sur l'échantillon quand on fait des essais de traction-compression ou flexion (le cisaillement apparaît au niveau de frontière entre le bois de printemps et bois d'été en cas d'un échantillon à grand dimension – voir chapitre 2). Ainsi, le comportement mécanique de nos échantillons est augmenté.

b. *Echantillon sec à l'air*

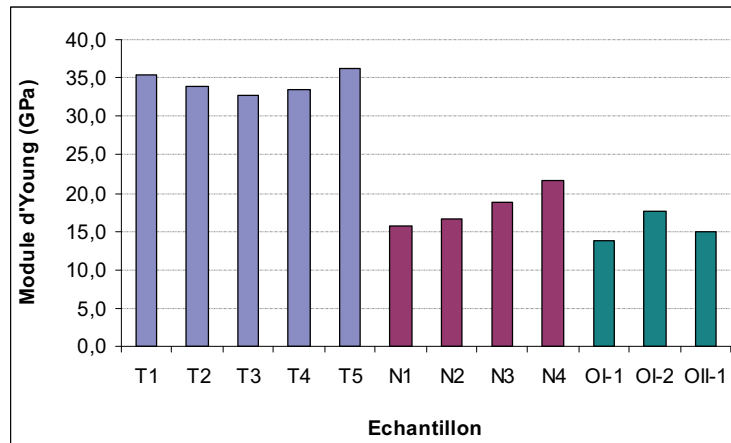


Figure 3.15 : Module d'Young longitudinal mesurés dans les différentes parties du peuplier de tension à l'état sec à l'air

La Figure 3.15 résume toutes les mesures effectuées en direction longitudinale sur les échantillons secs à l'air. Il apparaît très clairement que le bois de tension est beaucoup plus rigide que les autres parties de l'arbre. Les valeurs mesurées sont en effet de l'ordre de 35 GPa pour le bois de tension, contre des valeurs deux fois plus faibles (entre 15 GPa et 20 GPa) pour le bois normal et le bois opposé, d'ailleurs toujours très proches pour la même zone de l'arbre. On trouve également que le module d'Young du bois opposé est plus faible que celui du bois normal (de 14 à 17GPa pour le bois opposé par rapport de 16 à 22GPa pour le bois normal). C'est-à-dire le bois opposé obtient le comportement mécanique le plus faible dans la rondelle du bois de tension selon la direction longitudinale.

La variation de module d'Young au sein du cerne d'accroissement mérite réflexion. Il semble que bois normal et bois opposé, toujours assez proches, ont un module qui augmente régulièrement du bois de printemps vers le bois d'été, tandis que le bois de tension est pratiquement constant. Le premier constat peut s'expliquer par densité de vaisseaux qui décroît du bois de printemps vers le bois d'été, en mettant ainsi en exergue la masse volumique comme explication principale. Pour le bois de tension, c'est plus difficile à expliquer, sauf à conclure que le bois de tension s'exprime de la même façon sur toute la largeur du cerne, avec une masse volumique pratiquement constante.

2. Essai de traction simple dans le plan transversal

Les essais de traction comprennent deux séries de résultats principaux, l'un selon la direction radiale (présenté à la Figure 3.16) et l'autre selon la direction tangentielle (présenté à la Figure 3.17)

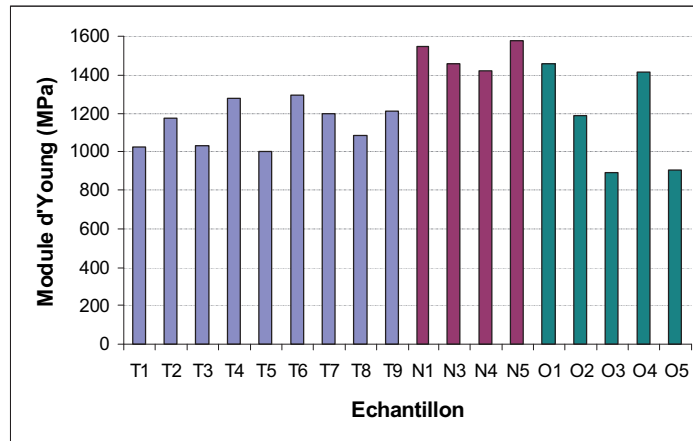


Figure 3.16 : Module d'Young de peuplier de tension dans les trois parties : Tendue (T) ; Normale (N) et Opposée (O) selon la direction radiale

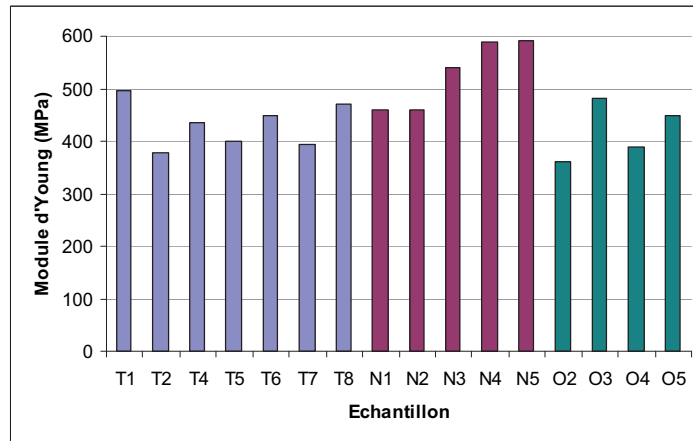


Figure 3.17 : Module d'Young de peuplier de tension dans les trois parties : Tendue (T) ; Normale (N) et Opposée (O) selon la direction tangentielle

A partir de ces deux figures, on constate que le module d'Young varie de façon aléatoire selon la direction longitudinale dans toutes les trois parties considérées.

3. Résultats et discussions

Partie	^(a) E _R	E _T	E _L	Densité	^(b) E' _R	E' _T	E' _L
T	1 143	416	34 300	642	1,78	0,65	53,43
Ecartype	111	60	1 400	37			
O	1 170	478	15 500	517	2,26	0,92	29,98
Ecartype	269	109	2 000	45			
N	1 484	573	18 200	554	2,68	1,03	32,85
Ecartype	75	65	2 600	58			

^(a)E: Module d'Young (MPa)

^(b)E': Module spécifique (MPa.kg⁻¹.m³)

Densité: kg/m³

Tableau 3.5 : Module d'Young et module spécifique de la partie tendue (T), opposée (O) et normale (N) du peuplier de tension dans la direction radiale (R), tangentielle (T) et longitudinale (L)

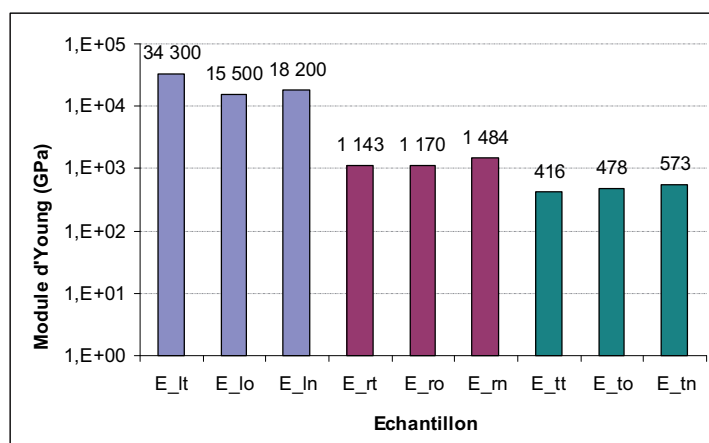


Figure 3.18 : Module d'Young de la partie tendue (T), opposée (O) et normale (N) du peuplier de tension dans les trois directions longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T). Les premières indices présentent la direction (longitudinale, radiale et tangentielle) ; les dixièmes indices présentent la zone du bois testé (tendu, opposé et normal)

Dans la direction longitudinale, la variabilité de module d'Young au sein de chaque type de bois (tension, normal et opposé) est plus faible que celle constatée dans le plan transverse.

En particulier, dans le cas du bois opposé dans le plan transversal, l'écart-type du module d'Young est plus élevé par rapport à ceux dans la partie normale et tendue. Ce résultat confirme l'explication dont l'on a parlé précédemment : l'hétérogénéité du bois et la faible largeur dans la zone opposée sont deux causes principales qui donnent la variation des résultats obtenus. Pour le bois normal et bois de tension, des très faibles valeurs d'écart-type sont à noter.

Dans la direction longitudinale, la différence du module d'Young entre le bois de tension et le bois normal et opposé est importante : $E_{moyen}=34300$ MPa pour le bois de tension, $E_{moyen}=15500$ MPa pour le bois opposé et $E_{moyen}=18200$ MPa pour le bois normal. Au contraire, les résultats dans les directions transversales présentent seulement des petites différences de module d'Young, de $E = 400$ à 500 MPa dans la direction tangentielle (correspondant au résultat de L. Brancheriau [2002], lorsque la densité varie de 460 kg/m^3 à 690 kg/m^3 , $E_{tangential}=400$ à 700 MPa) et de $E = 1200$ à 1500 MPa dans la direction radiale [Watanabe, 2002]. D'autre part, on peut voir que le bois normal est plus rigide que le bois de tension dans le plan transversal (E_N/E_T est de 1.38 dans la direction tangentielle et est de 1.3 dans la direction radiale). Cela pourrait s'expliquer par le manque de cohésion de la couche G avec le reste de la paroi [Keller, 1994]. Dans ce cas, la partie réelle du bois de tension participant à la résistance mécanique est plus fine que celle de la partie normale du bois (S1 ou S1 + S2 au lieu de S1 + S2 + S3 [Kollmann, 1984 ; Keller 1994 ; Yamamoto, 2004]).

En conséquence, l'anisotropie du bois est beaucoup plus élevée dans le bois de tension ($E_{longitudinal} / E_{tangential} = 87$ et $E_{longitudinal} / E_{radial} = 30$) que dans le bois normal et le bois opposé (45 et 10 respectivement). Cela est dû à la présence de la couche G et de la structure cristalline de la cellulose disposée selon l'axe de la cellule. En outre, l'effet du faible angle de microfibrille dans la couche S2 et la couche G est aussi la raison classiquement évoquée pour expliquer la très grande rigidité longitudinale du bois de tension [Farruggia, 1998 ; Brancheriau, 2002].

Enfin, il est intéressant de calculer le module d'Young spécifique du bois de tension ($E/\text{densité}$) et de le comparer avec la valeur obtenue pour la cellulose cristalline ce qui possède le module d'Young environ de 134 GPa [Marhofer, 1996] à 137 GPa [Sakurada, 1962] et sa densité est de 1590 kg/m^3 [O'Sullivan, 1997], soit $E'_{cellulose \text{ cristalline}}=0,0843 \text{ GPa.kg}^{-3}$

¹.m³. Ce calcul permet de constater que le bois de tension a une rigidité spécifique qui peut atteindre jusqu'à 63.4 % de celle de la cellulose cristalline, ce qui est remarquable.

IV. Conclusion

Le travail présenté dans ce texte a permis de mesurer des rigidités de différents micro-échantillons à l'échelle des tissus dans toutes les trois directions de l'arbre. Les résultats obtenus montrent que l'hétérogénéité et l'anisotropie du bois influent sur son comportement mécanique, même à l'échelle des tissus. La direction longitudinale, pour laquelle on a proposé qu'elle soit plus isotrope par rapport aux autres directions, présente des différentes caractéristiques mécaniques entre les échantillons voisins. Cependant, compte tenu du travail expérimental, ces différences sont explicables.

La manipulation sur des petits échantillons est toujours limitée par précision des outils (machine, capteurs, etc.) et condition environnementale. Dans ce cas, il est évident que l'utilisation des méthodes de mesures sans contact (mesure par laser, traitement d'images) est un bon choix pour les éviter ; les mesures n'influent rien sur la procédure de l'essai et donc les résultats obtenus sont respectés maximum possible.

Le bois de tension, avec la présence de la couche G, présente une rigidité plus élevée que celle du bois normal, cette conclusion peut être facilement retrouvée dans la littérature. Dans le cadre de notre étude, nous voudrions illustrer leur différence en prenant le résultat de l'essai de compression en grande déformation de peuplier, présenté dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 Essai de compression en grande déformation sous microscope électronique à balayage environnemental (ESEM)

I. Essais de compression sous microscope optique

Afin de déterminer le comportement du bois en compression dans le plan transversal (sens radial et tangentiel), on réalise une série de mesures à l'aide d'une platine de compression placée sous un microscope optique. Toutes les 20 secondes, une image est capturée et on surveille en parallèle l'état de surface de l'échantillon. Nous avons utilisé ici un objectif avec un grossissement $\times 20$. Il est associé avec la caméra digitale Basler BCAM 1394 placée sur le microscope, cela correspond à un champ d'observation de l'échantillon de l'ordre de $0.45 \times 0.33 \text{ mm}^2$ (Figure 4.1)

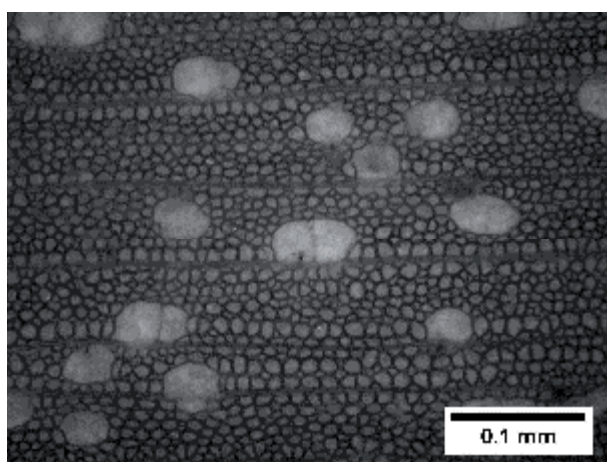


Figure 4.1 : Champ d'observation sur un échantillon de peuplier avec un grossissement $\times 20$ et une caméra Basler BCAM 1394

La Figure 4.2 montre un exemple type de courbe contrainte-déformation obtenue sur un échantillon de peuplier sollicité dans la direction tangentielle ; la force maximale dans cet essai est de 125 N appliquée sur une section de $14,1 \text{ mm}^2$; longueur de l'échantillon testé est de 7.74mm.

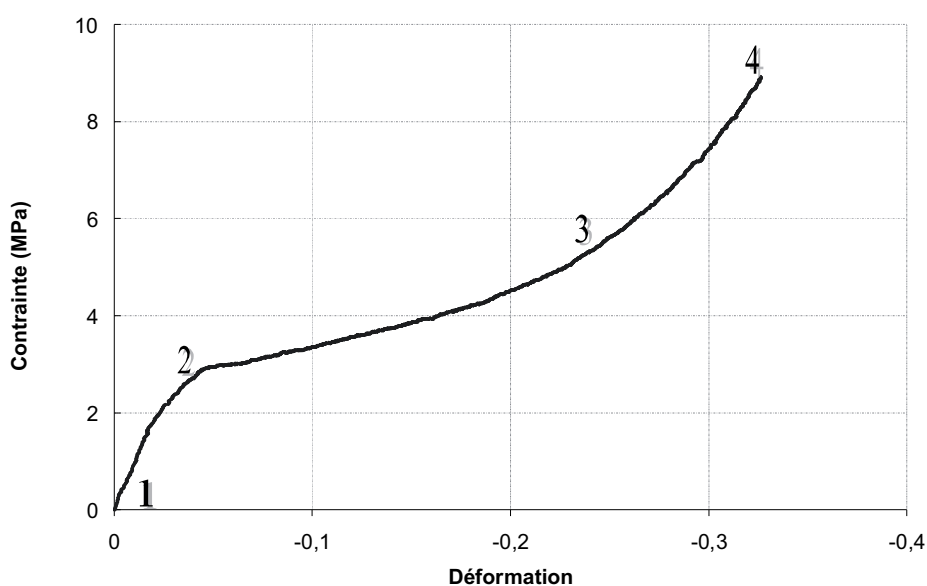


Figure 4.2 : *Contrainte – déformation en compression de peuplier selon la direction tangentielle*

- (1) Etat initial
- (2) Fin de la zone élastique
- (3) Grande déformation
- (4) Arrêt de chargement

La Figure 4.3 propose une sélection d'images collectées durant cet essai.

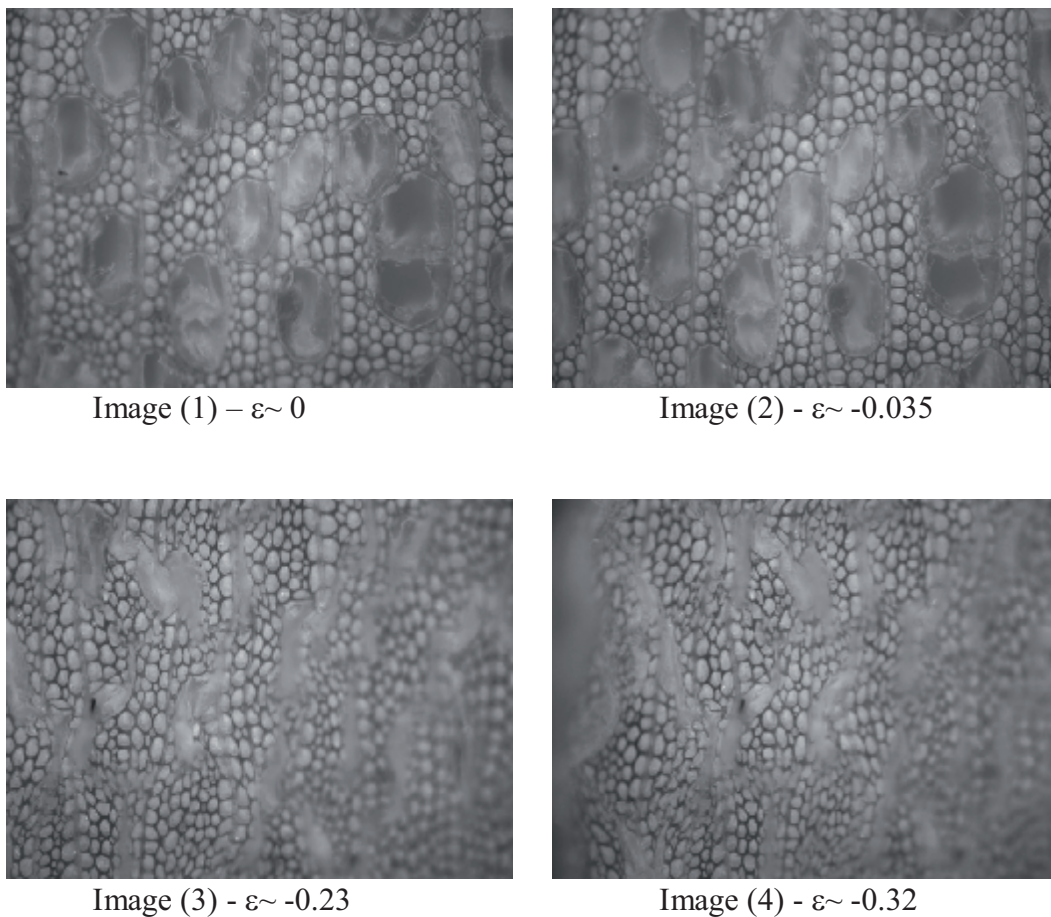


Figure 4.3 : *Image initiale (1) et images déformées (2, 3 et 4) au grossissement x20 au cours de l'essai de compression du peuplier, direction tangentielle*

Cet essai préliminaire permet déjà plusieurs observations :

- en début d'essai, une zone linéaire est observée. Elle correspond à la zone de déformation élastique linéaire,
- au-delà de la zone élastique, le domaine de compression des cellules ne conduit pas ici à un plateau de compression horizontal, mais à une augmentation progressive de la force nécessaire pour prolonger la déformation,
- la courbe obtenue reste régulière jusqu'à la fin de l'essai, ce qui permet de supposer qu'il n'y a pas de rupture majeure de la structure cellulaire,

- l'observation des images déformées permet de mettre en exergue le rôle majeur des vaisseaux du peuplier comme source de déformation qui se déforment devant les autres cellules et semble responsable de grandes déformations.

Cet essai permet néanmoins de montrer la limite de cette méthode. Lors du chargement de l'échantillon, la déformation importante de l'agencement cellulaire n'est plus vraiment compatible avec la très faible profondeur de champ d'un microscope optique. Malgré les efforts de mise au point, il n'est plus possible d'obtenir des images de qualité.

Ayant la chance d'avoir un microscope électronique à balayage environnemental (ESEM) à notre disposition, nous avons donc décidé d'utiliser cet outil pour la suite des essais, en dépit des difficultés opératoires que cela induit. Il a fallu en particulier placer la platine d'essais dans la chambre de l'ESEM. En plus, l'humidité de l'échantillon lors de l'essai n'est plus vraiment maîtrisée à cause du fait du « vide » dans la chambre de l'ESEM.

II. Test du fonctionnement de la platine de compression et du microscope

Dans le cadre de ce travail, la platine de compression est fonctionnée dans la chambre de l'ESEM, il faut donc tester leur fonctionnement ensemble.

Lors des essais sous un microscope électronique, il faut s'assurer qu'aucun phénomène électrostatique ne puisse se transmettre à la paroi de la chambre. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser des plaques de verre pour isoler la platine de compression et le support dans la chambre du microscope. On utilise également des tubes de silicone pour couvrir les fils électrique qui seraient en contact avec la paroi de la chambre.

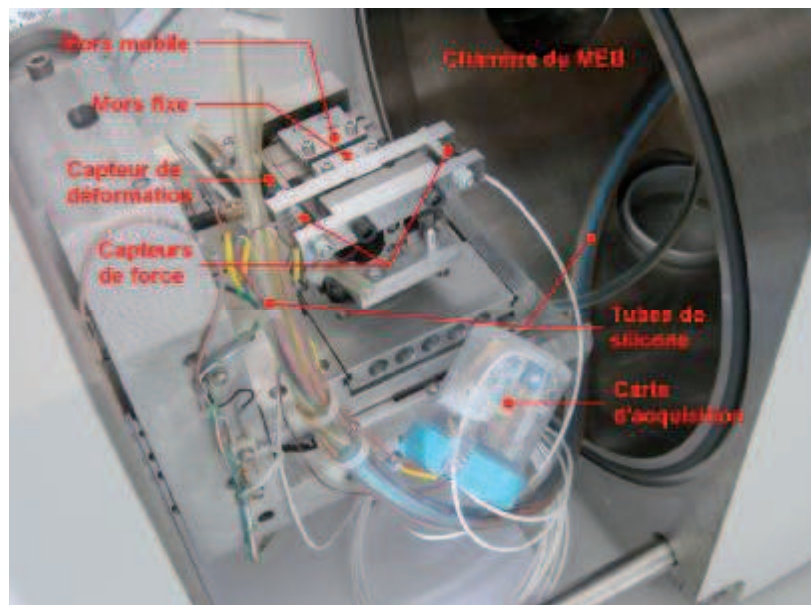


Figure 4.4 : Mise en place de la platine de compression dans la chambre du microscope électronique à balayage environnemental

a. Mesure de l'humidité au cours d'essai

Comme expliqué précédemment, nous ne pouvons pas mesurer directement l'humidité relative de l'échantillon situé dans la chambre de l'ESEM au cours d'essai. Par ailleurs, en réalisant des mesures témoins, il est possible de déterminer la plage de variation de l'humidité au cours d'essai. Les échantillons utilisés dans cette série de mesures possèdent les mêmes

caractéristiques mécaniques comme ceux utilisés dans les essais de compression définitifs (voir Chapitre 2).

Dans nos essais de compression dans la chambre de l'ESEM, nous prenons d'abord environ 15 minutes pour faire la mise au point des images. Ensuite, l'essai de compression sera réalisé pendant 15 minutes. Pour ces raisons, dans cette série de mesures témoins, nous mesurons l'humidité de l'échantillon au bout de 15 minutes (commencement de l'essai de compression) et de 30 minutes (fin de l'essai de compression) dans la chambre de l'ESEM.

La variation de la masse des échantillons mesurés est présentée dans le Tableau 4.1

	M. sec à l'air	M. 15' ESEM	M. 30' ESEM	M. anhydre	H.R. 30' ESEM
	mg	mg	mg	mg	%
Peuplier	34,4	31,5	31,4	31,26	0,45
Epicéa	36,4	34	34,1	33,79	0,92

Tableau 4.1 : Variation de la masse des échantillons en fonction du temps dans la chambre de l'ESEM

Grâce aux résultats illustrés dans le Tableau 4.1, nous pouvons confirmer que l'humidité de nos échantillons est stable au cours d'essai (au bout de 15 minutes), elle est proche de 1% H.R.

b. Essai de test

Le test (compression) est réalisé sur un échantillon d'épicéa dans la direction radiale. Un ordinateur est utilisé pour piloter l'ESEM et pour faire l'acquisition des images pendant l'essai. Un autre ordinateur est utilisé pour enregistrer les forces appliquées à l'échantillon ainsi que le déplacement de ce dernier en fonction du temps (Figure 4.5).

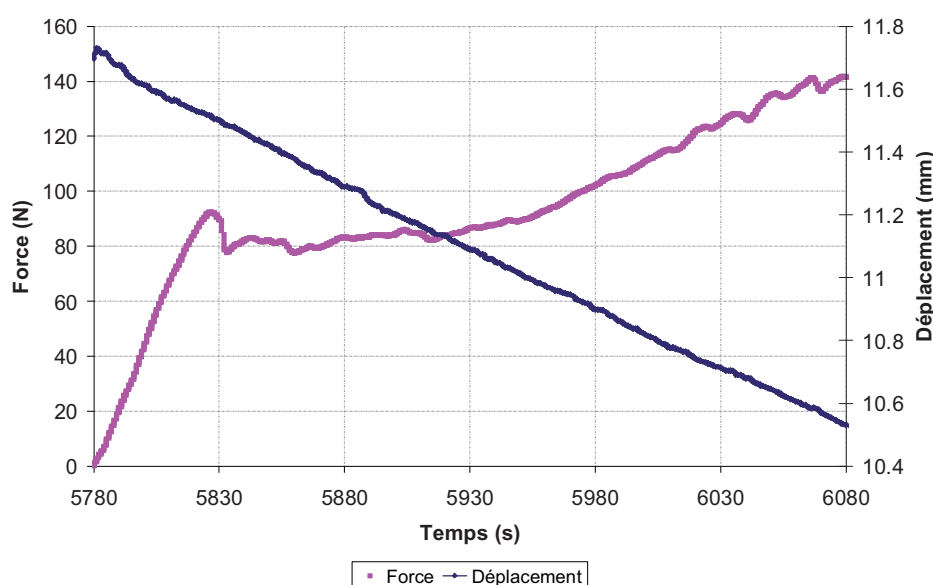


Figure 4.5 : Essai de la compression de l'épicéa – direction radiale sous microscope électronique

Il est alors possible d'obtenir la courbe contrainte/déformation (Figure 4.6). Chaque point spécial (zone de démarrage, zone de fin d'élasticité, zone de plateau de compression etc.) sur cette courbe peut-être illustré par une image de la surface de l'échantillon correspondante.

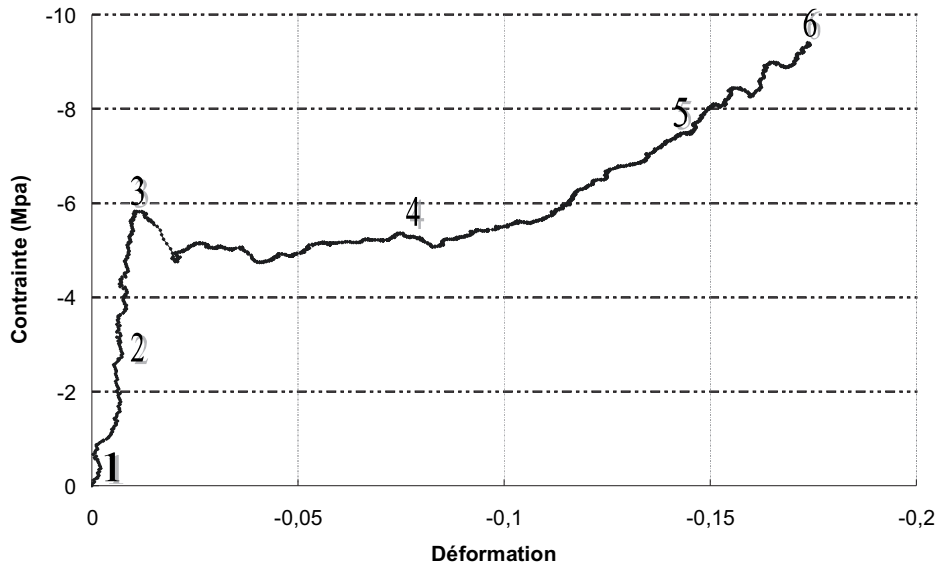


Figure 4.6 : Essai de compression simple d'un échantillon d'épicéa selon la direction radiale. Courbe de contrainte en fonction de déformation (corrigée du blanc).

- (1) Etat initial
- (2) Zone élastique
- (3) Fin de la zone élastique
- (4) Plateau de compression
- (5) Zone d'écrasement et de densification
- (6) Arrêt de chargement

En synchronisant les horloges de deux ordinateurs qui pilotent l'ESEM et la platine de compression, il est possible de déterminer quel point de la courbe correspond à quelle image sauvegardée. Grâce à ces images, on peut visualiser la surface de l'échantillon, ainsi la déformation cellulaire du bois aux moments voulus (seuil d'élasticité, zone de plasticité et d'écrasement).

Les images correspondant aux points spéciaux que l'on a marqués sur la courbe de contrainte-déformation (Figure 4.6) sont représentées dans la Figure 4.7

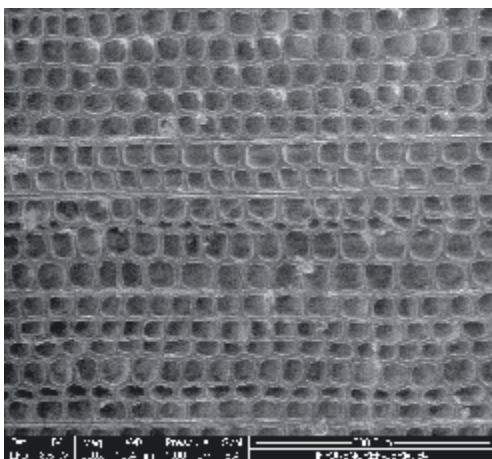


Image (1) - $\epsilon \sim 0$

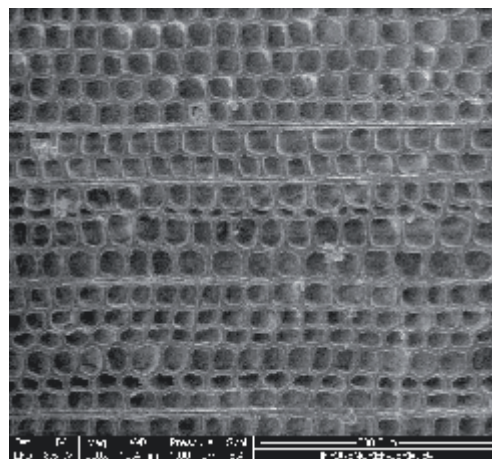


Image (2) - $\epsilon \sim -0.00624$

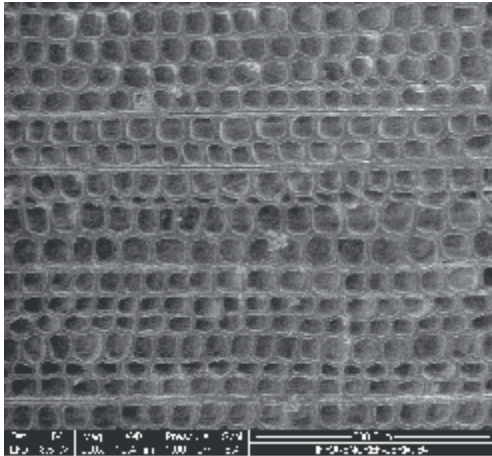


Image (3) - $\varepsilon \sim -0.0108$

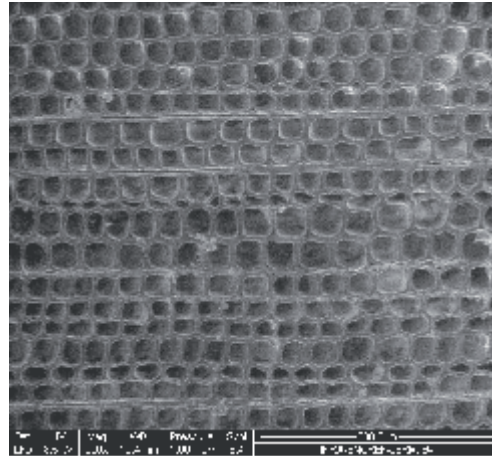


Image (4) - $\varepsilon \sim -0.0785$

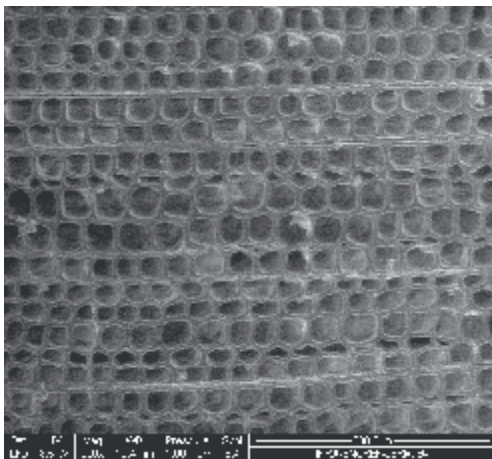


Image (5) - $\varepsilon \sim -0.143$

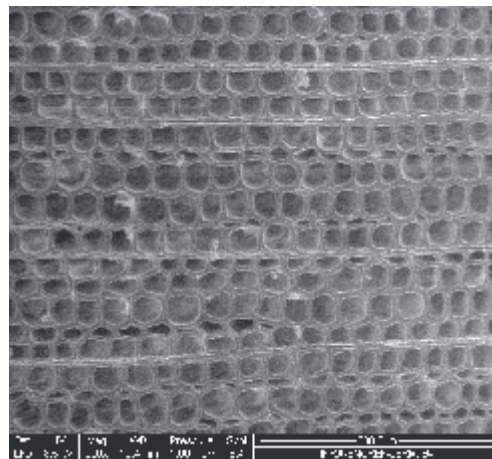


Image (6) - $\varepsilon \sim -0.173$

Figure 4.7 : Images correspondantes aux points remarquables de la Figure 4.6

Dans cet essai de compression radiale de l'épicéa, on constate :

- Une zone d'élasticité linéaire
- Une grande chute de force à la fin de la zone d'élasticité, avant le commencement du plateau de compression
- Une durée courte de la phase de plateau de compression, les valeurs de force dans cette période varient (il y a des petites chutes de force)
- La zone d'écrasement et de densification n'est pas forcément claire : il y a des chutes locales de force révélatrices de ruptures locales au niveau cellulaire.
- Les rayons ligneux jouent un rôle important dans la structure du bois pour renforcer son comportement lors des chargements selon la direction radiale
- L'image initiale et les images déformées montrent qu'il n'y a pas beaucoup de déformation au niveau de la cellule de bois. Elles gardent leur forme à l'état presque initial. Celle-ci est expliquée par la taille de l'échantillon testé. On a pris cet échantillon de test qui est plus grande (environ $3.5 \times 4 \text{ mm}^2$ soit $S \sim 14 \text{ mm}^2$) que la capacité de la platine de compression. La Figure 4.5 montre que la force exercée a été dépassée 140N, la limite de sécurité imposée sur cette platine. Il faut donc diminuer la

taille des échantillons dans les prochains essais (environ $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ soit $S \sim 6 \text{ mm}^2$ dans les essais définitifs).

III. Résultats des essais de compression en grande déformation sous ESEM

1. Essai de compression sur l'épicéa

a. Compression radiale

Dans cette série de mesure, on réalise l'essai de compression radiale sur 3 échantillons d'épicéa nommés ER1 (Epicéa Radiale 1); ER2 et ER3, ils sont débités de l'un à l'autre dans le sens longitudinal. Le traitement des résultats réalisé sur l'échantillon ER3 donne une courbe de contrainte- déformation présentée dans la Figure 4.8 (les résultats des échantillons ER1, ER2 sont présentés dans l'annexe 1):

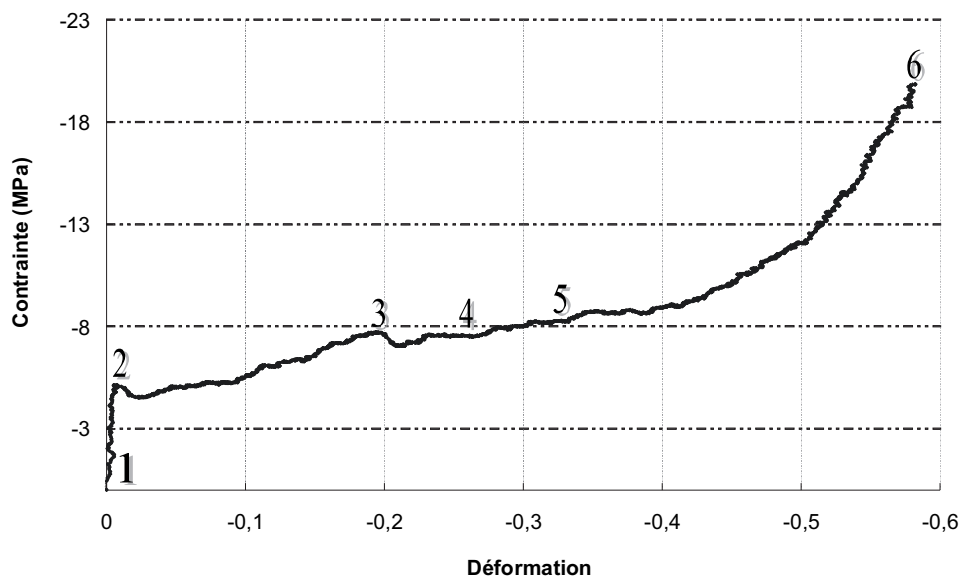


Figure 4.8 : Contrainte- déformation de l'essai de compression de l'épicéa dans le sens radial, échantillon ER3

Suite à ce diagramme, il est possible d'obtenir facilement que la limite élastique est atteinte pour une contrainte de 5MPa et une déformation de 0.82%.

Les images correspondant aux points marqués sur la courbe de contrainte- déformation ci-dessus (Figure 4.8) sont représentées à la Figure 4.9:

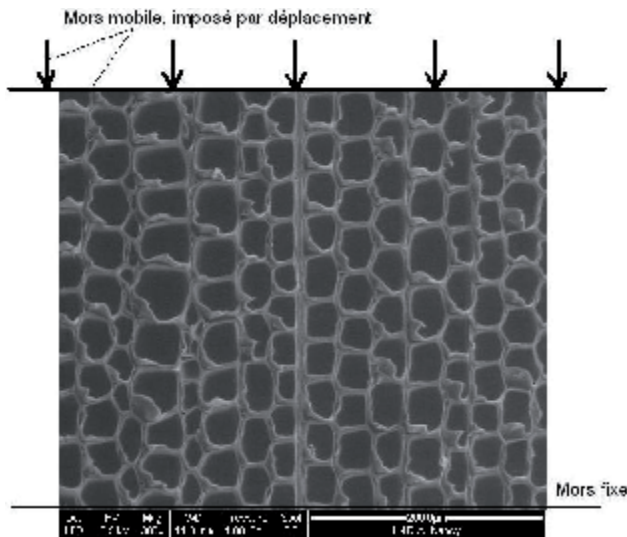


Image (1) : $\sigma \sim 0$ MPa ; $\varepsilon \sim 0$

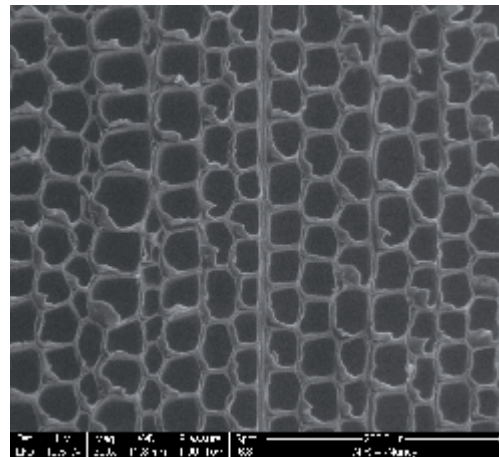


Image (2) : $\sigma \sim 5.05$ MPa ; $\varepsilon \sim 0.0082$

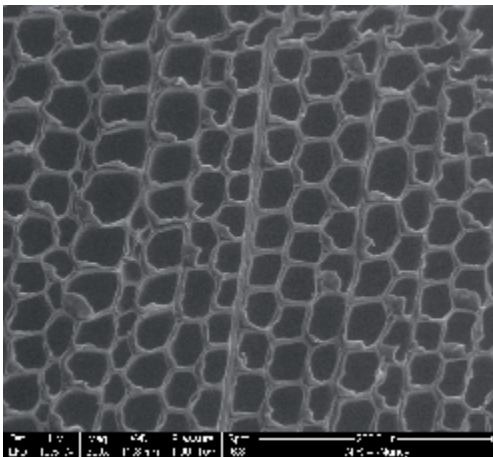


Image (3) : $\sigma \sim 7.7$ MPa ; $\varepsilon \sim 0.194$

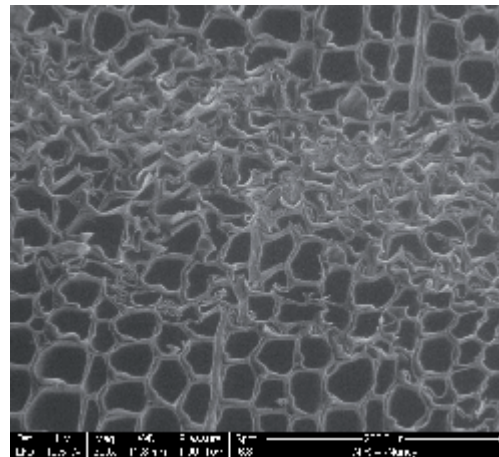


Image (4) : $\sigma \sim 7.54$ MPa ; $\varepsilon \sim 0.256$

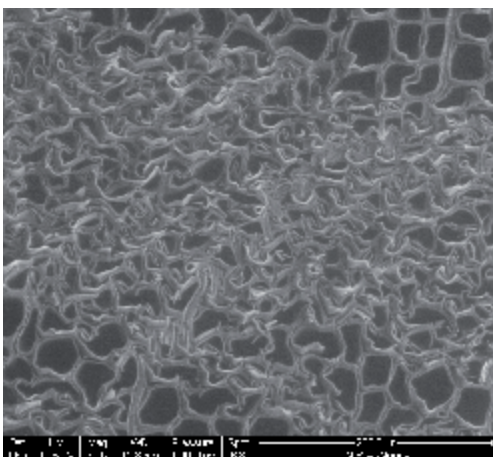


Image (5) : $\sigma \sim 8.19$ MPa ; $\varepsilon \sim 0.32$

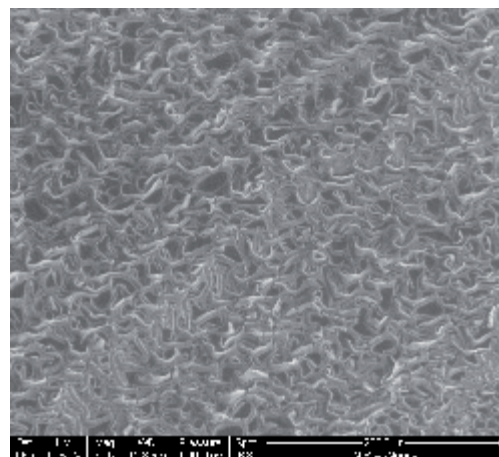


Image (6) : $\sigma \sim 18.75$ MPa ; $\varepsilon \sim 0.573$

Figure 4.9 : Images correspondantes aux points caractéristiques de la courbe contrainte/déformation (Figure 4.8) de l'essai de compression d'épicéa sous microscope électronique à balayage environnemental dans le sens radial.

On récapitule les résultats des 3 échantillons dans le Tableau 4.2:

Echan.	Section mm ²	Longueur mm	Contr. élas. Mpa	Défor. élas.	Mod. d'Young Mpa
ER1	5.91	4.85	-3.45	-0.0062	561
ER2	6.85	4.81	-3.68	-0.0036	1028
ER3	6.84	4.84	-3.77	-0.0045	840
Moyen					810
Ecart- type					235

Tableau 4.2 : Module d'élasticité dans les essais de compression de l'épicéa selon la direction radiale

Remarquons que les modules d'Young présentés dans le Tableau 4.2 (et aussi dans ce chapitre) ne sont pas déterminés directement à partir de la valeur « contrainte-déformation » du « seuil d'élasticité » présenté dans la Figure 4.9. Ils sont déterminés à partir des valeurs « contrainte-déformation » des points qui sont situés vraiment dans la zone élastique. Le « seuil d'élasticité » présenté ci-dessus a pour objectif d'illustrer des informations détaillées (une image de la surface d'échantillon et un couple de contrainte/déformation correspondant) d'un point de la courbe de contrainte-déformation qui se situe à la fin de la zone élastique.

b. Compression tangentielle

Dans cette série de mesure, on réalise l'essai de compression tangentielle sur 4 échantillons d'épicéa nommés ET1 (Epicéa Tangentielle 1); ET2 ; ET3 et ET4, ils sont débités de l'un à l'autre dans le sens longitudinal. Le traitement des résultats réalisé sur l'échantillon ET4 donne une courbe de contrainte- déformation présentée dans la Figure 4.10 (les résultats des échantillons ET1, ET2 et ET3 sont présentés dans l'annexe 1):

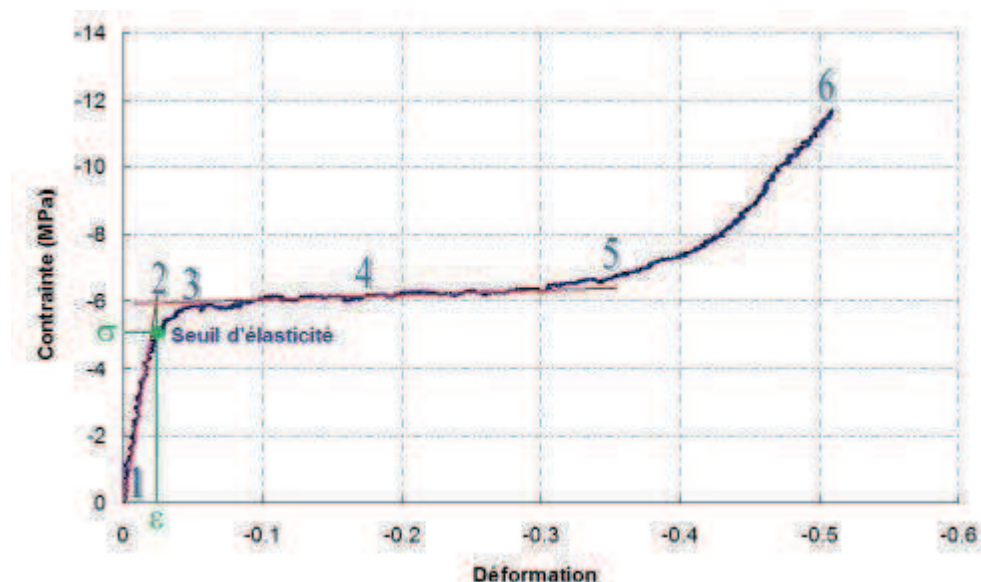


Figure 4.10 : Contrainte- déformation de l'essai de compression de l'épicéa dans le sens tangentiel, échantillon ET4

Sur la courbe obtenue, il n'y a pas de limite élastique nette comme dans les essais de compression radiale. Afin de déterminer cette limite, on trace les lignes tangentielles de la partie élastique et de la partie de plateau de compression pour chercher le point d'intersection.

Par la projection de ce point sur l'axe de déformation, on trouve alors la déformation limite élastique. La contrainte correspondante est considérée comme la contrainte limite élastique. Sur la Figure 4.10, on trouve que la limite élastique est atteinte pour une contrainte de 4.9MPa et une déformation de 2.17%. C'est-à-dire que la zone d'élasticité se termine quand on comprime environ 2.17% de longueur totale de l'échantillon selon la direction tangentielle.

Les images correspondant aux points marqués sur la courbe de contrainte-déformation ci-dessus (Figure 4.10) sont représentées à la Figure 4.11:

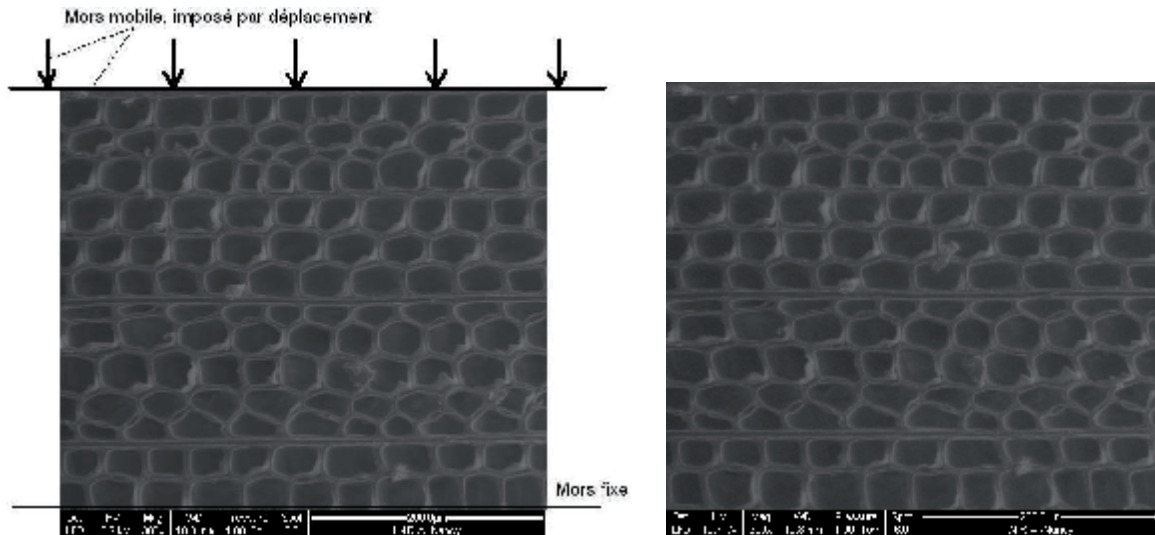


Image (1) : $\sigma \sim 0$ MPa ; $\varepsilon \sim 0$

Image (2) : $\sigma \sim 4.87$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.0217$

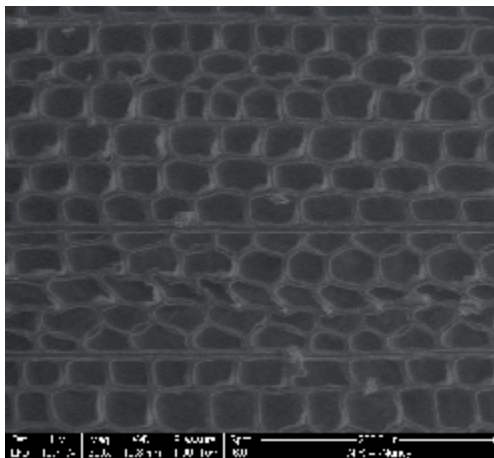


Image (3) : $\sigma \sim 5.82$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.053$

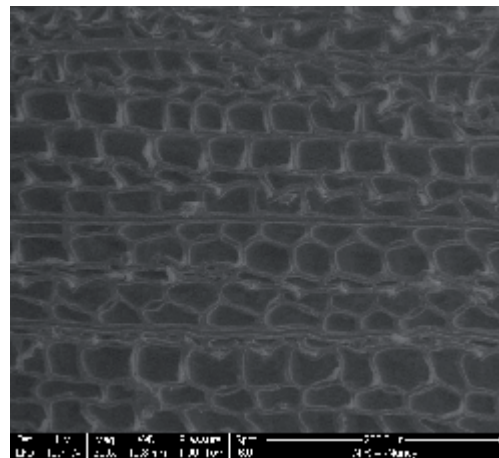


Image (4) : $\sigma \sim 6.16$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.177$

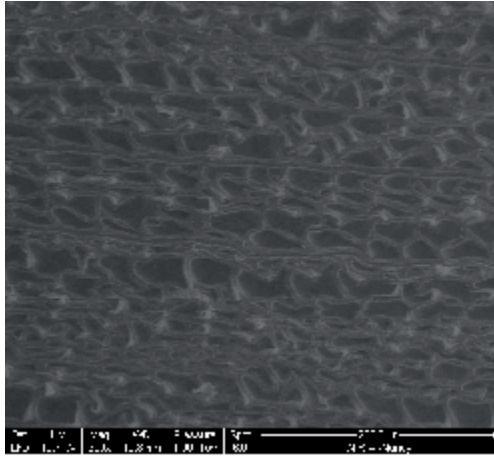


Image (5) : $\sigma \sim -6.69$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.352$

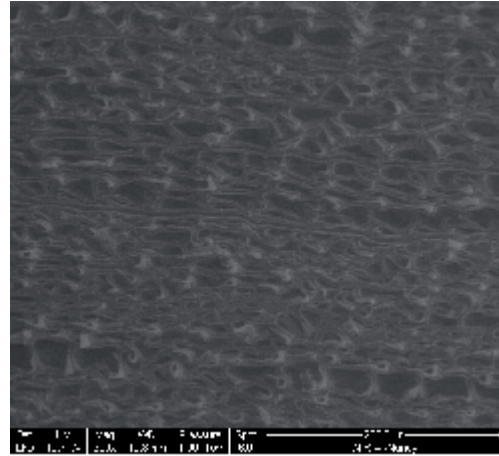


Image (6) : $\sigma \sim -11.47$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.507$

Figure 4.11 : Images correspondantes aux points caractéristiques de la courbe contrainte/déformation (Figure 4.10) de l'essai de compression d'épicéa sous microscope électronique à balayage environnemental dans le sens tangentiel.

Les résultats de cette série de mesure sont présentés dans le Tableau 4.3:

Echan.	Section mm ²	Longueur mm	Contr. élas. Mpa	Défor. élas.	Mod. d'Young Mpa
ET1	12.47	5.31	-2.93	-0.0078	374
ET2	12.44	5.39	-2.63	-0.0072	365
ET3	12.13	5.31	-2.12	-0.0071	299
ET4	13.19	5.32	-3.54	-0.0124	285
			Moyen		331
			Ecart- type		43

Tableau 4.3 : Module d'élasticité de la compression tangentielle de l'épicéa

2. Essai de compression sur le peuplier

a. Compression radiale

Dans cette série de mesure, on réalise l'essai de compression radiale sur 5 échantillons de peuplier nommés PR2 (Peuplier Radiale 2); PR3 ; PR4 ; PR5 et PR6, ils sont débités de l'un à l'autre dans le sens longitudinal. Le traitement des résultats réalisé sur l'échantillon PR3 donne une courbe de contrainte- déformation présentée dans la Figure 4.12, les résultats des autres échantillons sont présentés dans l'annexe 1 :

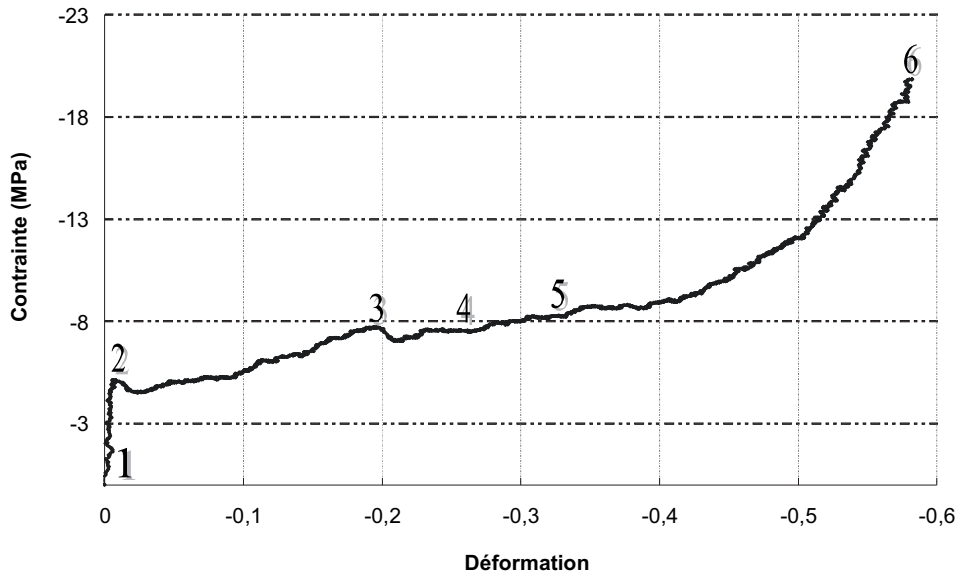


Figure 4.12 : Contrainte- déformation de l'essai de compression radiale du peuplier, échantillon PR3

La Figure 4.12 montre que la zone d'élasticité se termine à la valeur (contrainte- déformation) d'environ (8.94MPa- 0.0136). C'est-à-dire que quand on comprime plus de 1.36% de longueur totale de l'échantillon du peuplier selon la direction radiale, cet échantillon ne travaillera plus dans la zone d'élasticité.

Les images correspondantes aux points remarquables repérés sur la courbe de contrainte- déformation se présentent au-dessous (Figure 4.13) :

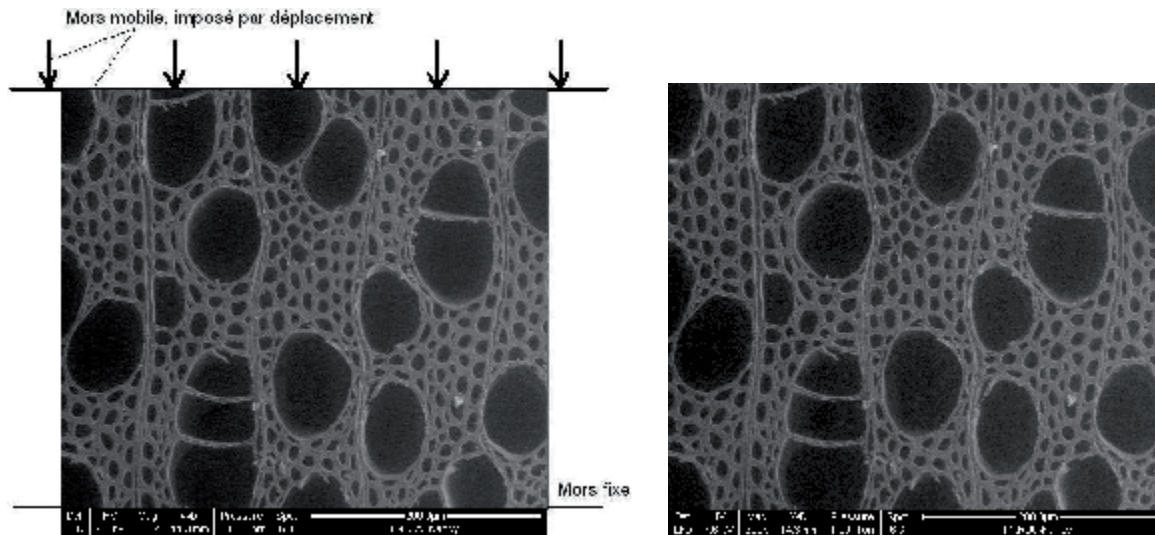


Image (1) : $\sigma \sim 0 \text{ MPa}$; $\varepsilon \sim 0$

Image (2) : $\sigma \sim 9.05 \text{ MPa}$; $\varepsilon \sim 0.0136$

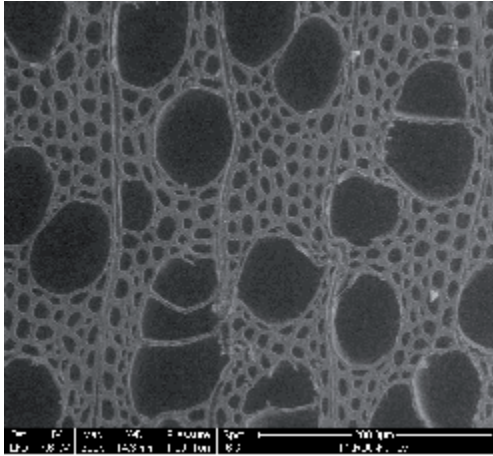


Image (3) : $\sigma \sim -9.45$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.127$

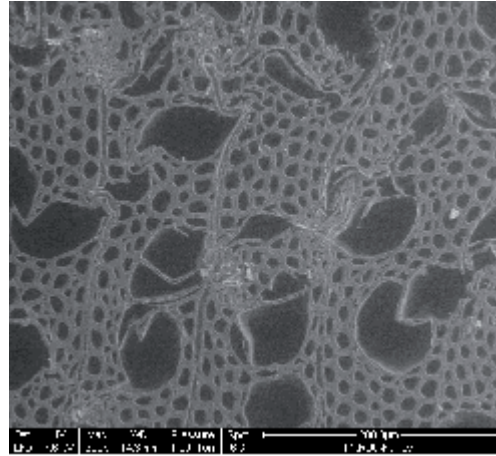


Image (4) : $\sigma \sim -10.13$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.224$

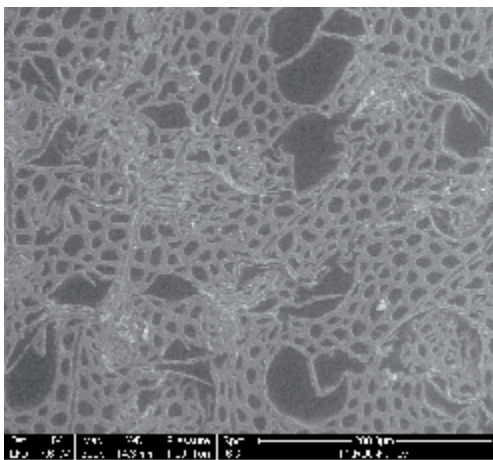


Image (5) : $\sigma \sim -13.79$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.404$

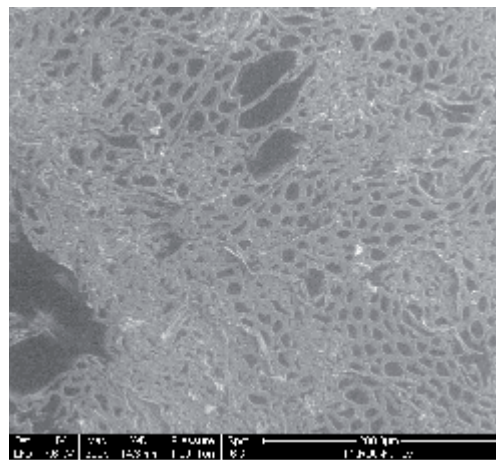


Image (6) : $\sigma \sim -20.74$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.55$

Figure 4.13 : Images correspondantes aux points caractéristiques de la courbe contrainte/déformation (Figure 4.12) de l'essai de compression de peuplier sous microscope électronique à balayage environnemental dans le sens radial.

Les résultats de toute la série de mesure se présentent dans le Tableau 4.4:

Echan.	Section mm ²	Longueur mm	Contr. élas. Mpa	Défor. élas.	Mod. d'Young Mpa
PR2	5.23	4.29	-7.97	-0.0062	1279
PR3	5.79	4.28	-8.47	-0.0085	996
PR4	5.73	4.28	-8.74	-0.0076	1150
PR5	6.73	4.28	-7.65	-0.0058	1317
PR6	5.62	4.27	-7.58	-0.0078	972
Moyen					1143
Ecart- type					172

Tableau 4.4 : Module d'élasticité de la compression radiale du peuplier

b. Compression tangentielle

Dans cette série de mesure, on réalise l'essai de compression tangentielle sur 4 échantillons de peuplier nommés PT3 (Peuplier Tangentielle 3); PT4 ; PT5 et PT6, ils sont débités de l'un à

l'autre dans le sens longitudinal. Le traitement des résultats réalisé sur l'échantillon PT4 donne une courbe de contrainte- déformation présentée dans la Figure 4.14 (les résultats des autres échantillons sont présentés dans l'annexe 1):

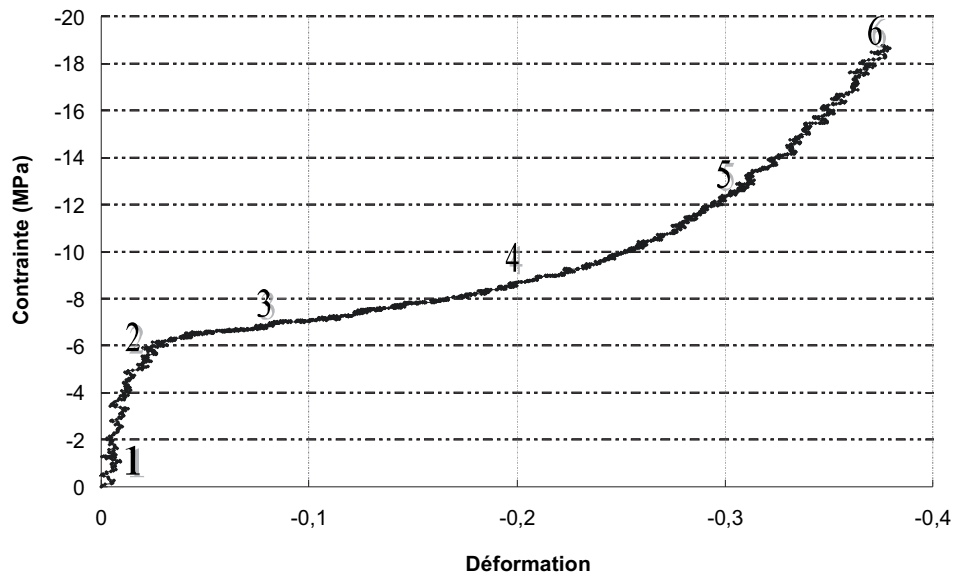


Figure 4.14 : Contrainte- déformation de l'essai de compression tangentielle du peuplier, échantillon PT4

Comme dans le cas de l'essai de compression de l'épicéa dans la direction tangentielle, la courbe contrainte/déformation ne montre pas de limite élastique nette. La limite élastique est déterminée de la même manière que précédemment (Figure 4.11). Les images correspondantes aux points marqués sur la courbe de contrainte-déformation sont illustrées à la Figure 4.15 :

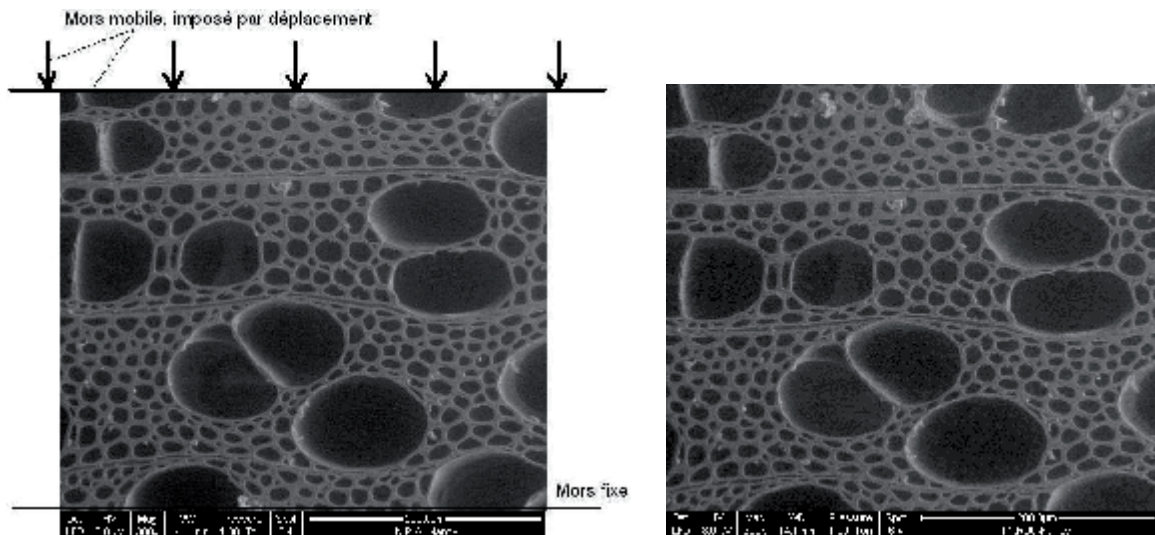


Image (1) : $\sigma \sim 0$ MPa ; $\varepsilon \sim 0$

Image (2) : $\sigma \sim 4.94$ MPa ; $\varepsilon \sim 0.0153$

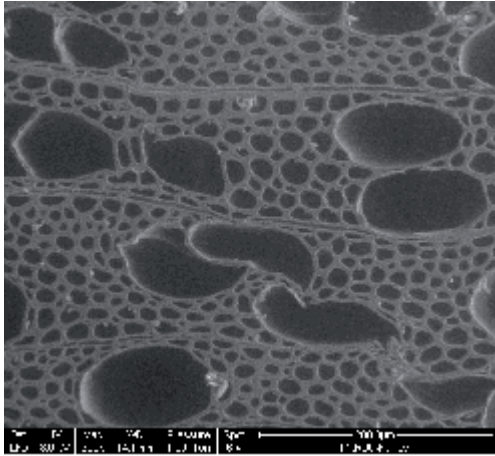


Image (3) : $\sigma \sim -6.76$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.079$

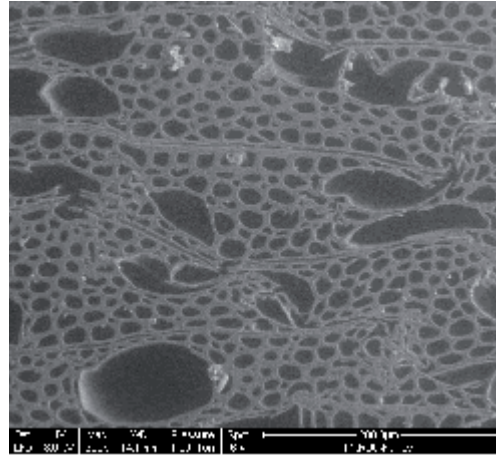


Image (4) : $\sigma \sim -8.47$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.192$

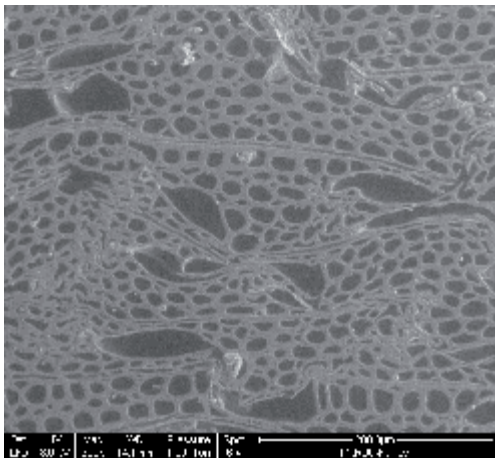


Image (5) : $\sigma \sim -12.13$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.295$

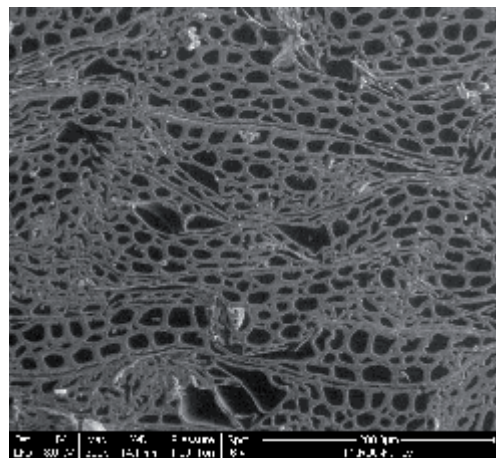


Image (6) : $\sigma \sim -18.76$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.375$

Figure 4.15 : Images correspondantes aux points caractéristiques de la courbe contrainte/déformation (Figure 4.14) de l'essai de compression de peuplier sous microscope électronique à balayage environnemental dans le sens tangentiel.

Après avoir fait le traitement de résultats, les modules d'élasticité de 4 échantillons dans cette série de mesure sont présentés dans le Tableau 4.5 :

Echan.	Section mm ²	Longueur mm	Contr. élas. Mpa	Défor. élas.	Mod. d'Young Mpa
PT3	8.92	3.37	-5.40	-0.0121	446
PT4	8.69	3.39	-3.70	-0.0099	374
PT5	7.26	3.38	-5.81	-0.0144	403
PT6	8.90	3.37	-5.20	-0.0126	413
			Moyen		409
			Ecart- type		20

Tableau 4.5 : Module d'élasticité de la compression tangentielle du peuplier

3. Résultats et discussions

Les caractéristiques mécaniques de tous les échantillons testés (épicéa et peuplier) selon la direction radiale et tangentielle sont résumées dans le Tableau 4.6

Ech.	Section mm ²	Longueur mm	Contr. lim. élas. MPa	Défor. lim. élas.	Contr. 1 ^{ère} rupt. locale MPa	Défor. 1 ^{ère} rupt. locale
ER1	5.91	4.85	-3.56	-0.0088	-5.44	-0.104
ER2	6.85	4.81	-4.23	-0.0078	-11.7	-0.485
ER3	6.84	4.84	-5.05	-0.0082	-7.7	-0.194
Valeur moyenne			-4.28	-0.0083	-8.28	-0.261
Ecart-type			0.75	0.00050	3.17	0.1991
 Ecart-type/Moyenne x100%			17.4	6.1	38.3	76.3
ET1	12.47	5.31	-5.33	-0.0271	-5.45	-0.043
ET2	12.44	5.39	-5.29	-0.0235	-5.78	-0.046
ET3	12.13	5.31	-4.11	-0.0264	-4.87	-0.061
ET4	13.19	5.32	-4.87	-0.0217	-5.82	-0.053
Valeur moyenne			-4.9	-0.0247	-5.48	-0.051
Ecart-type			0.57	0.00252	0.44	0.0080
 Ecart-type/Moyenne x100%			11.6	10.2	8.0	15.8
PR2	5.23	4.29	-8.18	-0.0096	-9.34	-0.137
PR3	5.79	4.28	-9.05	-0.0136	-9.45	-0.127
PR4	5.73	4.28	-8.74	-0.0096	-8.08	-0.081
PR5	6.73	4.28	-8.01	-0.0089	-8.51	-0.146
PR6	5.62	4.27	-8.21	-0.0108	-9.75	-0.165
Valeur moyenne			-8.44	-0.0105	-9.03	-0.131
Ecart-type			0.44	0.00186	0.70	0.0314
 Ecart-type/Moyenne x100%			5.2	17.7	7.8	23.9
PT3	8.92	3.37	-5.96	-0.0146	-7.14	-0.079
PT4	8.69	3.39	-4.94	-0.0153	-6.76	-0.079
PT5	7.26	3.38	-5.79	-0.0144	-7.04	-0.075
PT6	8.90	3.37	-6.16	-0.0153	-6.96	-0.064
Valeur moyenne			-5.71	-0.0149	-6.98	-0.074
Ecart-type			0.54	0.00047	0.16	0.0071
 Ecart-type/Moyenne x100%			9.4	3.1	2.3	9.5

Tableau 4.6 : Caractéristiques mécaniques des échantillons de l'épicéa et du peuplier selon la direction radiale et tangentielle

Basé sur les données présentées dans le Tableau 4.6, nous constatons que l'écart-type de chaque type de mesure est inférieur à 20% par rapport à la valeur moyenne correspondante, sauf dans le cas de mesure de la contrainte/déformation à l'apparition de la première rupture locale (au niveau des cellules) du bois d'épicéa selon la direction radiale. Pour une série de mesures expérimentales sur des micro-échantillons, ces valeurs d'écart-type sont acceptables.

La précision de nos mesures expérimentales est aussi confirmée par la répétition des courbes de contrainte/déformation de toutes les mesures, présentée dans la Figure 4.16 et Figure 4.17

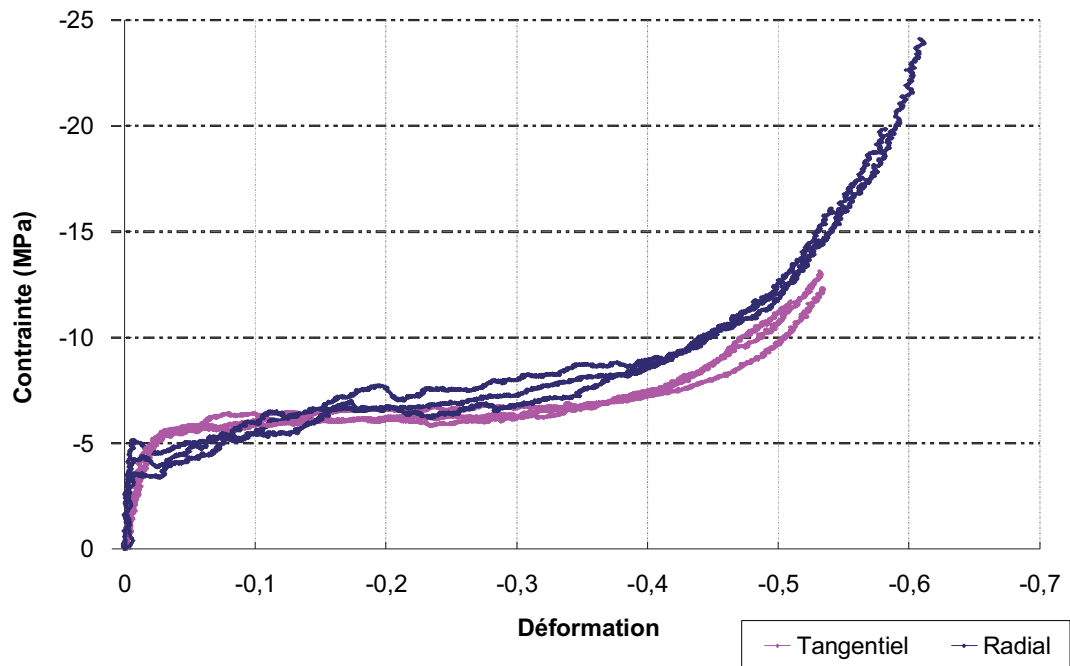


Figure 4.16 : Récapitulation des courbes expérimentales de contrainte/déformation dans les essais de compression d'épicéa selon le sens radial et tangentiel

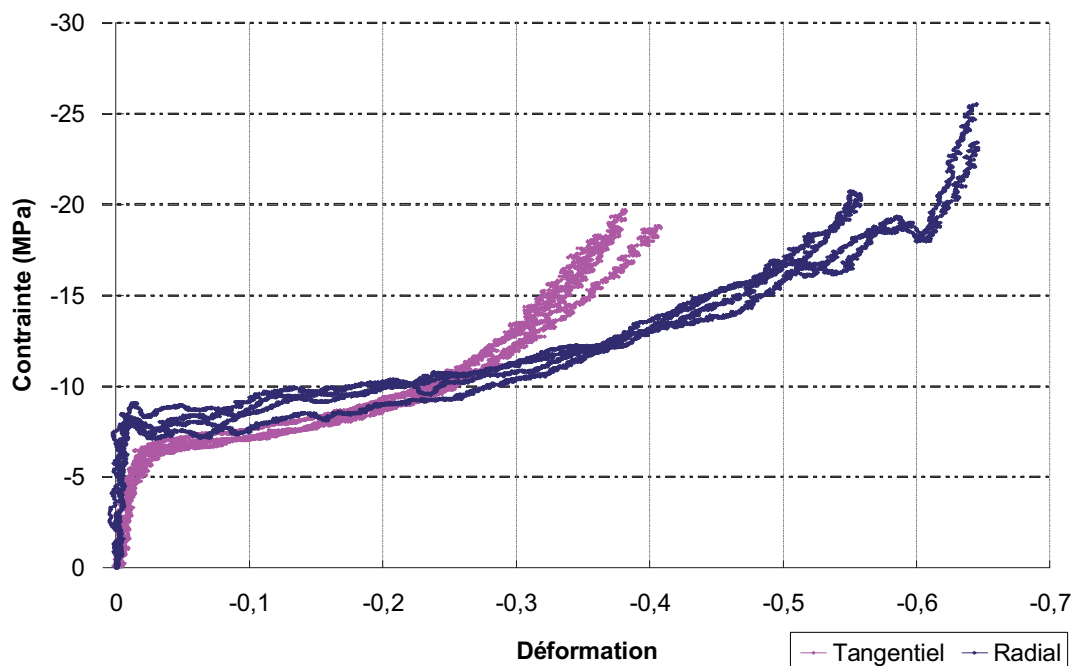


Figure 4.17 : Récapitulation des courbes expérimentales de contrainte/déformation dans les essais de compression d'épicéa selon le sens radial et tangentiel

Dans le cas du bois d'épicéa selon la direction radiale, la déformation à laquelle on trouve la première rupture locale est très différente pour chaque échantillon. Celle-ci est expliquée par la différence de la forme ainsi que de l'épaisseur des cellules (voir annexe 1). En mesurant l'épaisseur des parois cellulaires sur les images obtenues, nous trouvons qu'elle est de l'ordre de 3 μm à 5 μm pour l'échantillon ER1, contre une plage de 6 μm à 7 μm pour l'échantillon ER2.

Les caractéristiques mécaniques moyennes des échantillons de l'épicéa et du peuplier selon la direction radiale et tangentielle sont résumées dans le Tableau 4.7:

	Epicéa		Peuplier	
	Radial	Tangentiel	Radial	Tangentiel
Module d'Young (MPa)	810	331	1143	409
Défor. limite élastique (%)	-0,83	-2,47	-1,05	-1,49
Contr. limite élastique (MPa)	-4,28	-4,90	-8,44	-5,71
Défor. 1ère rupture locale (%)	-26,1	-5,1	-13,1	-7,4
Contr. 1ère rupture locale (MPa)	-8,28	-5,48	-9,03	-6,98

Tableau 4.7 : Le résumé des caractéristiques mécaniques moyennes des échantillons de l'épicéa et du peuplier

Ces résultats confirment une caractéristique mécanique classique du matériau bois qui a été présentée dans plusieurs publications [Gillis, 1972 ; Navi, 2005 ; Simon, 2009]: Le module d'Young dans la direction radiale est plus élevé que celui dans la direction tangentielle. En revanche, de la fin de la zone plastique à la zone de densification, la contrainte à la même valeur de déformation dans la direction radiale est plus faible que celle dans la direction tangentielle. Celle-ci a été présentée dans le travail de Roussel [1997, cité dans Navi, 2005] et est également confirmé par notre résultat ()

En comparant cette série de mesures avec les résultats expérimentaux de Farruggia et al. [Farruggia, 1998 ; Farruggia et Perré, 2000] sur le bois d'épicéa, ils ont trouvé que le module d'Young radial du bois d'épicéa est proche de 800 MPa à la densité approximative de 300 kg/m³.

Dans notre campagne d'essai, le bois d'épicéa montre un seuil de contrainte élastique proche entre la direction radiale et tangentielle ; $\sigma_{\text{épi_rad}} = -4.28$ MPa et $\sigma_{\text{épi_tan}} = -4.9$ Mpa. Ce résultat justifie que la résistance mécanique dans le domaine élastique du bois d'épicéa est similaire selon les deux directions, bien que le module d'Young (rigidité) soit différent dans ces deux directions. En revanche, le bois de peuplier possède deux seuils de contrainte élastique vraiment différents entre ces deux directions ; $\sigma_{\text{peup_rad}} = -8.43$ MPa et $\sigma_{\text{peup_tan}} = -5.71$ MPa.

Pourtant, dans la zone de grande déformation, la première rupture locale des cellules du bois de peuplier, quand on les sollicite selon les deux directions différentes, est apparue à la valeur de déformation qui n'est pas très différente; elle apparaît au moment $\varepsilon = 13.1\%$ (voir Tableau 4.7) dans la direction radiale et $\varepsilon = 7.4\%$ dans la direction tangentielle. Pour le bois d'épicéa, il y a une grande différence au niveau du moment où la première rupture locale est apparue. Cette rupture apparaît au moment où $\varepsilon = 5.1\%$ dans la direction tangentielle et $\varepsilon = 26.1\%$ dans la direction radiale.

Ces résultats semblent indiquer que les rayons ligneux ne jouent pas un rôle aussi important dans le domaine de grande déformation que dans le domaine élastique. Dans le domaine de grande déformation, l'effet de l'agencement cellulaire est dominé :

- Le bois d'épicéa perd rapidement sa stabilité au niveau cellulaire bien que les rayons ligneux restent encore à leur forme initiale comme l'avoir expliqué au chapitre « Bibliographie ».
- Le cas du bois de peuplier est plus difficile à expliquer. Les vaisseaux et les fibres sont distribués de façon aléatoire dans le plan transversal, cette distribution est plus « isotrope » que celle du bois d'épicéa, elle donne alors une stabilité similaire présentée dans les deux directions, bien que les rayons ligneux ne soient qu'à la direction radiale.

IV. Conclusion

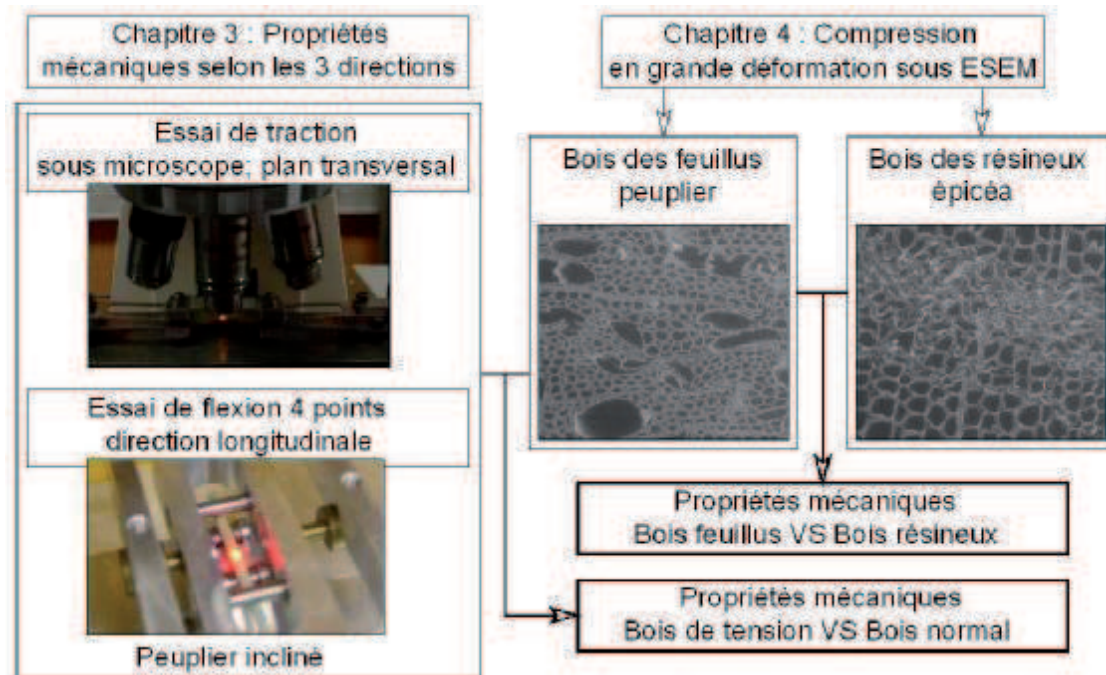
Le travail présenté dans ce texte, réalisé sur une essence du bois de résineux et une essence du bois de feuillu, a permis de mesurer des rigidités de différents échantillons dans le plan transversal. Il a également permis de visualiser la déformation des cellules, de comparer des propriétés mécaniques des différentes espèces du bois à la grande déformation/densification au cours d'essai. Le résultat obtenu confirme une forte anisotropie dans toutes les espèces testées. Ainsi, il nous montre le rôle de rayon ligneux et d'agencement cellulaire dans des différentes périodes de l'évolution de déformation.

Cette série d'essais est réalisée dans la chambre d'observation de notre ESEM, nous ne pouvons pas déterminer exactement l'humidité au cours d'essai. Par ailleurs, nous pouvons confirmer que l'humidité de nos échantillons ne varie pas et elle est au tour de 1% au cours d'essai. L'humidité de nos échantillons avant d'être placés dans la chambre de l'ESEM est également déterminée.

Conclusion et Perspectives

Synthèse des travaux effectués :

Ce travail de thèse a permis de déterminer les propriétés mécaniques élastiques et non élastiques du bois à l'échelle des tissus à partir de la description de sa morphologie et des propriétés microscopiques de ses constituants. Pour cela, il a été nécessaire de mettre en place la chaîne d'outils présentée dans la figure ci-dessous



Procédure de la détermination des propriétés mécaniques du bois à l'échelle des tissus

Dans le cadre de ce travail, basé sur la description de la morphologie du bois à l'échelle des tissus ainsi que les mesures des propriétés microscopiques mécaniques à l'aide de dispositifs expérimentaux spécifiques, nous avons obtenu des résultats remarquables. Les étapes principales qui mènent à ces résultats peuvent être résumés ainsi :

Caractérisation des propriétés élastiques du bois de tension dans la direction longitudinale : Les essais de flexion 4 points ont été réalisés sur de petits échantillons (épaisseur de moins d'un mm) à l'aide d'une micromachine de flexion 4 points, conçue et développée dans l'équipe. La flèche au milieu de l'échantillon a été mesurée par laser, donc sans contact. Cette mesure permet de ne pas influencer sur la réalisation d'essai, donc de respecter le plus possible la précision des résultats obtenus. Nous avons aussi essayé de réduire au maximum le phénomène de fluage. Cette série de mesures permet de comparer la rigidité, dans un même cerne annuel, des différentes parties du bois de tension.

Caractérisation des propriétés élastiques du bois de tension dans le plan transversal : Cette série de mesures a été réalisée sous microscope optique avec un grossissement x20. En

utilisant la méthode de corrélation d'images, à l'aide du logiciel MeshPore, le champ de déformation est obtenu sans contact. Compte tenu de la taille de nos échantillons dont la section est inférieure à $2 \times 5 \text{ mm}^2$, cette méthode joue un rôle très important pour éliminer le déplacement relatif mors/échantillon lors d'un essai de microtraction.

Mise en place de la platine de compression dans la chambre de l'ESEM : Notre platine de compression a été placée dans la chambre de l'ESEM. Afin d'avoir un fonctionnement normal de l'ESEM, nous devons nous assurer qu'aucun phénomène électrostatique ne puisse se transmettre à la paroi de la chambre lors des essais mécaniques. Par ailleurs, un grand inconvénient lors de notre série des mesures réside dans l'impossibilité de choisir l'humidité dans la chambre de l'ESEM en cours d'essai. En réalisant des mesures témoins supplémentaires, nous constatons que l'humidité en cours d'essai est stable et proche de 1%.

Caractérisation des propriétés mécaniques du bois lors des essais de compression en grande déformation dans la chambre de l'ESEM : Des petits échantillons (section d'environ $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$) du bois d'épicéa et de peuplier ont été sollicités jusqu'à la densification. Des images de la surface d'échantillon ainsi qu'une courbe de contrainte en fonction du déplacement (déformation) sont obtenues à la fois lors de l'essai. Grâce à cela, les ruptures locales au niveau des cellules du bois en fonction des sollicitations externes (force/déplacement ou contrainte/déformation) sont illustrées.

Synthèse des résultats obtenus :

Les rayons ligneux et la forme des cellules jouent fortement sur les caractéristiques élastiques du bois. Celles-ci montrent une rigidité plus élevée dans la direction radiale que celle dans la direction tangentielle, y compris dans le cas du bois de tension de caractéristiques pourtant fort différentes ($E_R/E_T \sim 2.5$).

La rigidité spécifique longitudinale du bois de tension de peuplier peut atteindre jusqu'à 63.4% de celle de la cellulose cristalline. Ceci s'explique par la très forte proportion de cellulose dans la couche G et par leur excellent alignement avec l'axe de la cellule.

En ce qui concerne le bois normal, le résultat mesuré sur le peuplier adulte (Chapitre 4) avec celui mesuré sur le jeune peuplier incliné (Chapitre 3), nous constatons que les modules transverse du peuplier incliné ($E_R/E_T = 1485/527$ MPa) sont plus élevés que ceux du peuplier adulte ($E_R/E_T = 1143/409$ MPa). Il semble que cette différence soit due au nombre et au diamètre des vaisseaux: par des mesures sur des images obtenues à l'aide du logiciel Image J, nous constatons que le diamètre tangentiel des vaisseaux chez le jeune peuplier incliné varie entre 30 μm et 50 μm ; chez le peuplier adulte testé, il varie de 60 μm à 80 μm . Il faut cependant rester prudent sur cette conclusion, car la correction par un test à blanc dans les essais de compression (chap. 4) est moins précise que la mesure rigoureuse par corrélation (chap. 3).

Au-delà du domaine linéaire, l'anisotropie transverse reste en faveur de la direction radiale durant le plateau de compression, mais la tendance s'inverse durant le domaine de densification final. Dans ce cas, le mécanisme d'effondrement de l'agencement cellulaire et la moins bonne imbrication des parois entre-elles rend le bois plus rigide dans la direction tangentielle que dans la direction radiale.

Mécaniquement, le bois de feuillus est plus « isotrope » que le bois de résineux dans le domaine de grande déformation/densification. La première rupture locale au niveau des cellules apparaît dans les deux directions, radiale et tangentielle, aux valeurs de déformation assez proches : $\varepsilon_R = 7.4\%$ par rapport à $\varepsilon_T = 13.1\%$. En revanche, chez les résineux, ces valeurs de déformation sont très différentes : $\varepsilon_R \sim 5.1\%$ par rapport à $\varepsilon_T \sim 26.1\%$.

Chez les résineux, les ruptures locales sont apparues en mode « fragile » dans la direction radiale. Elles apparaissent très tard mais dès leur première apparition, la structure sera détruite rapidement. En revanche, les ruptures locales sont apparues en mode « ductile » dans la direction radiale. La première apparition est très tôt mais la structure du bois reste stable dans une longue période.

Chez les feuillus, les ruptures locales se font en mode « ductile » dans les deux directions, radiale et tangentielle. En outre, une observation remarquable chez les feuillus est à noter: les vaisseaux et les fibres ne sont pas cassés totalement même à la densification ($\varepsilon \sim 60\%$) dans toutes les deux directions. C'est le contraire chez les résineux chez qui les cellules sont complètement rompues à la même valeur de déformation.

Perspectives expérimentales :

La rigidité longitudinale du bois de tension à l'état sec à l'air (environ 8%) est presque stable dans toute la largeur du cerne. En revanche, à l'état saturé, le module d'élasticité longitudinal des échantillons varie en fonction de leurs positions dans le cerne. Cette différence propose une étude approfondie pour comprendre la variation de la rigidité de la couche G ainsi que des éléments pariétaux en fonction de l'humidité.

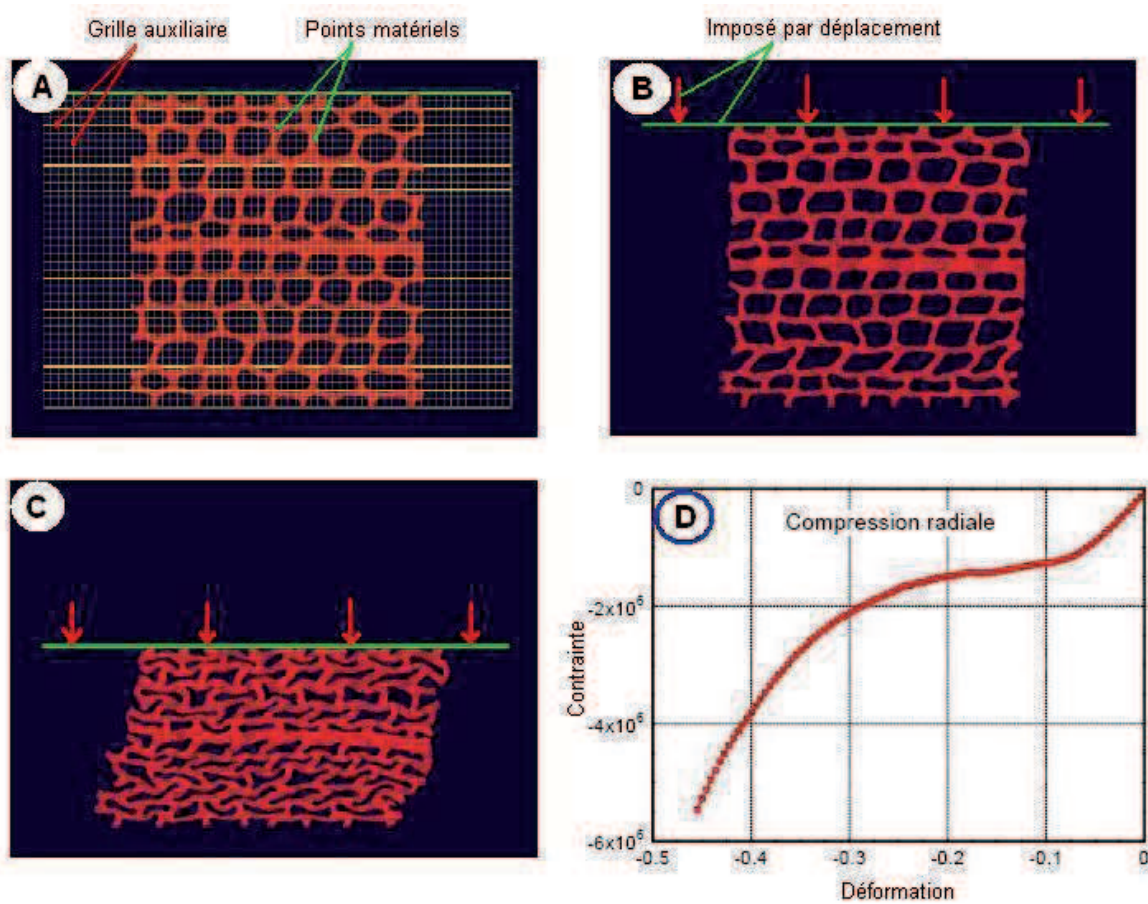
Les mesures en grande déformation ont été réalisées sur l'épicéa et sur le peuplier. Nous avons bien constaté leur réponse différente à la même sollicitation. Afin de généraliser ces différences, nous souhaitons que ces mesures soient effectuées sur un plus large nombre d'espèces.

Perspectives théoriques :

Dans le cadre de ce travail, les résultats expérimentaux obtenus lors des essais de compression en grande déformation démontrent nettement l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation jusqu'à la densification ($\varepsilon \sim 0.6$). Nous souhaitons donc développer un modèle de calcul pour tout d'abord comparer les résultats numériques avec ceux expérimentaux, puis valider ce modèle de calcul. Il sera ensuite amélioré pour simuler d'autres cas d'essai.

A présent, il y a plusieurs méthodes de calcul pour la simulation des propriétés mécaniques d'un matériau. Par ailleurs, on peut trouver dans la littérature [Sulsky et al. 1995 ; Bardenhagen et al. 2005 ; Nairn, 2006 ; Frank and Perré, 2010] qu'en cas d'un matériau complexe comme le bois, la MPM est un bon choix pour la simulation de ses propriétés mécaniques en grande déformation (voir annexe 2).

Un modèle de calcul utilisant la théorie de la MPM est en train d'être développé à notre équipe [Perré and Frank, 2009 ; Frank and Perré, 2010]. Ce modèle écrit en Fortran afin de gagner le temps de calcul permet de réaliser des simulations de compression du matériau bois (imposé par déplacement) jusqu'à la densification. Le résultat obtenu est l'évolution de contrainte en fonction de déformation, présenté ci-dessous :



Modélisation de compression de l'épicéa par la MPM, imposé par déplacement: fig. (A), (B) et (C) : compression selon la direction tangentielle jusqu'à la grande déformation et fig. (D) : résultat obtenu dans la simulation de la compression selon la direction radiale [tirée de Perré, 2009]

Malheureusement, nous n'avons pas réussi à réaliser un calcul définitif en raison du manque de temps.

ANNEXE 1

Résultats obtenus lors des essais de compression de l'épicéa et du peuplier en grande déformation dans la chambre de l'ESEM

Echantillon ER1

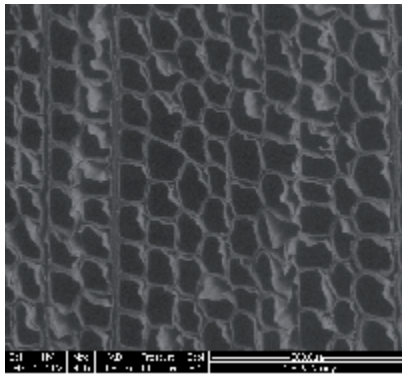
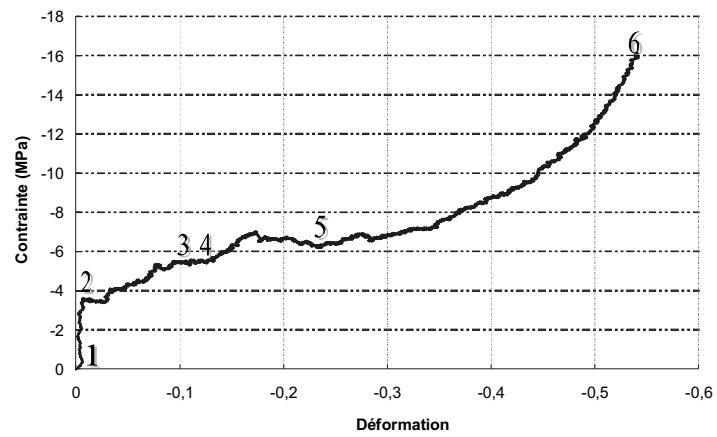


Image (1) : $\sigma \sim 0$ MPa ; $\epsilon \sim 0$

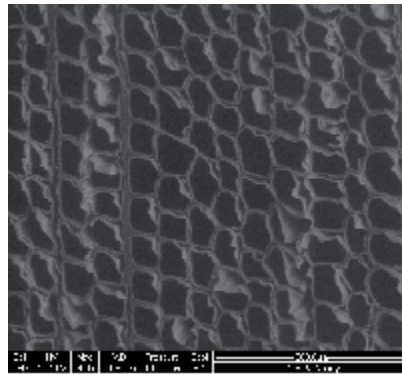


Image (2) : $\sigma \sim -3.56$ MPa ; $\epsilon \sim -0.0088$

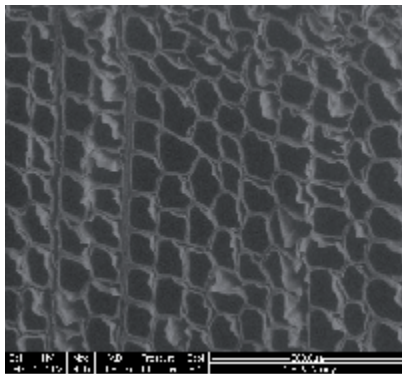


Image (3) : $\sigma \sim -5.44$ MPa ; $\epsilon \sim -0.104$

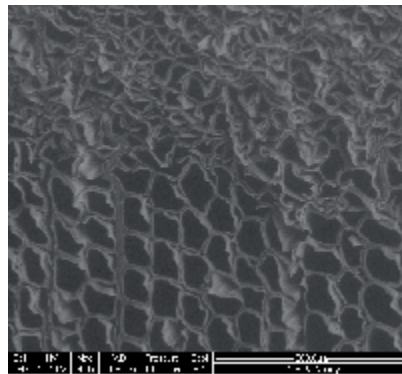


Image (4) : $\sigma \sim -5.46$ MPa ; $\epsilon \sim -0.124$

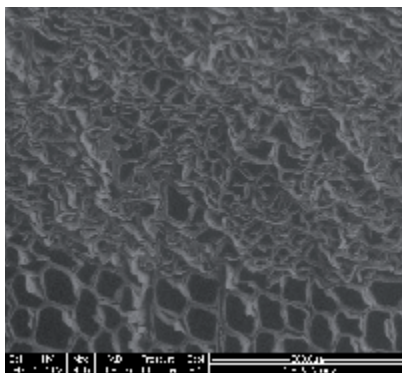


Image (5) : $\sigma \sim -6.21$ MPa ; $\epsilon \sim -0.236$

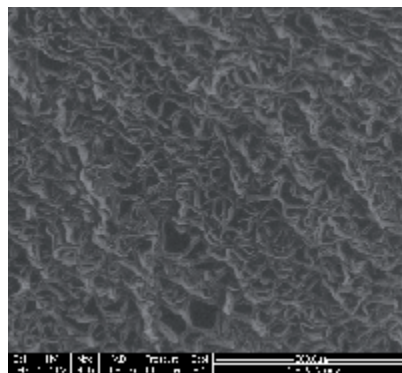


Image (6) : $\sigma \sim -15.62$ MPa ; $\epsilon \sim -0.536$

Figure 1 : Courbe de contrainte-déformation de l'essai de compression radiale, échantillon ER1 et ses images correspondantes aux points caractéristiques

Echantillon ER2

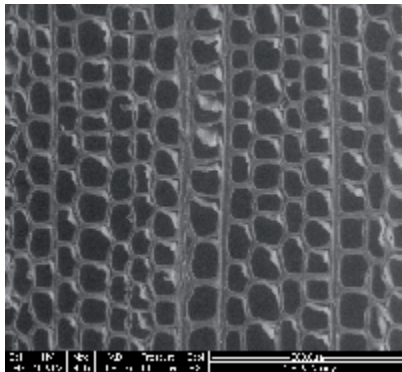
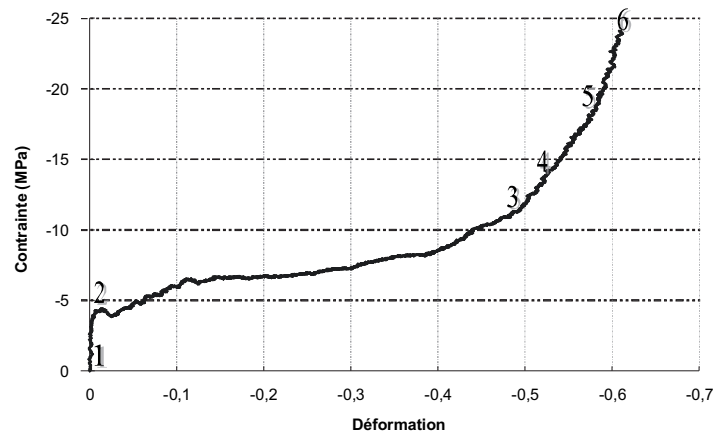


Image (1) : $\sigma \sim 0$ MPa ; $\epsilon \sim 0$

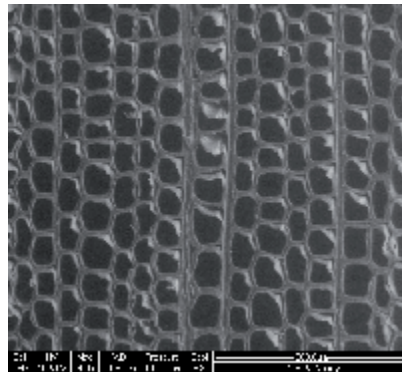


Image (2) : $\sigma \sim -4.23$ MPa ; $\epsilon \sim -0.0078$

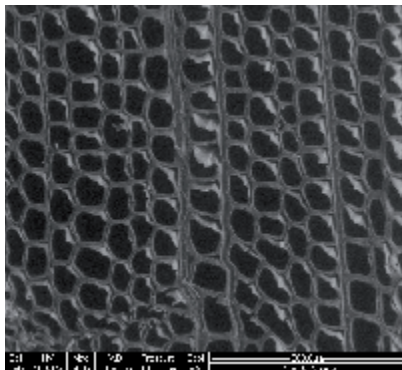


Image (3) : $\sigma \sim -11.17$ MPa ; $\epsilon \sim -0.485$

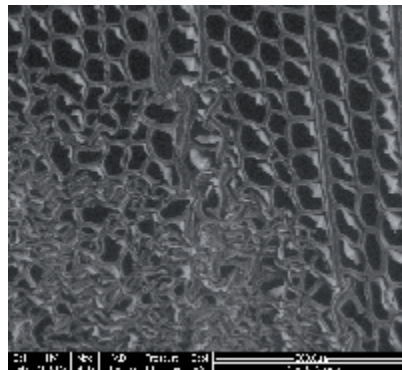


Image (4) : $\sigma \sim -13.56$ MPa ; $\epsilon \sim -0.519$

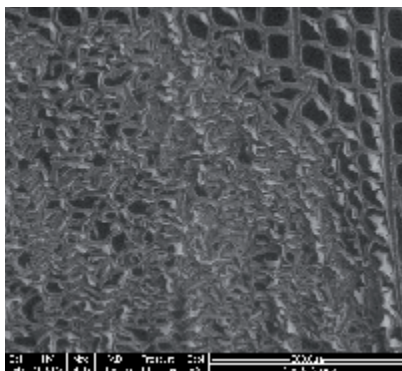


Image (5) : $\sigma \sim -18.12$ MPa ; $\epsilon \sim -0.577$

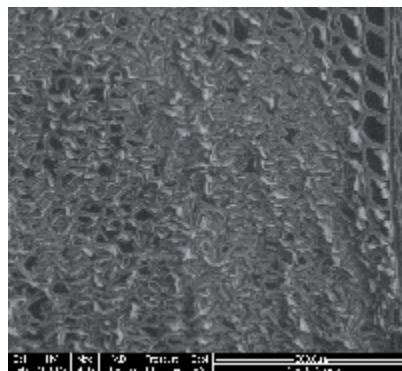


Image (6) : $\sigma \sim -24.11$ MPa ; $\epsilon \sim -0.608$

Figure 2 : Courbe de contrainte-déformation de l'essai de compression radiale, échantillon ER2 et ses images correspondantes aux points caractéristiques

Echantillon ET1

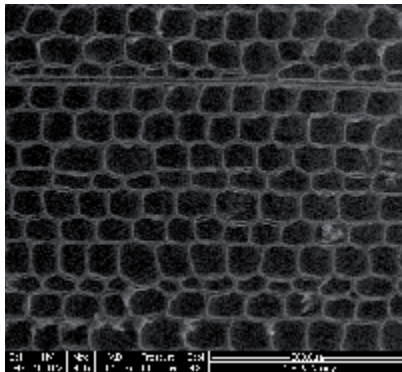
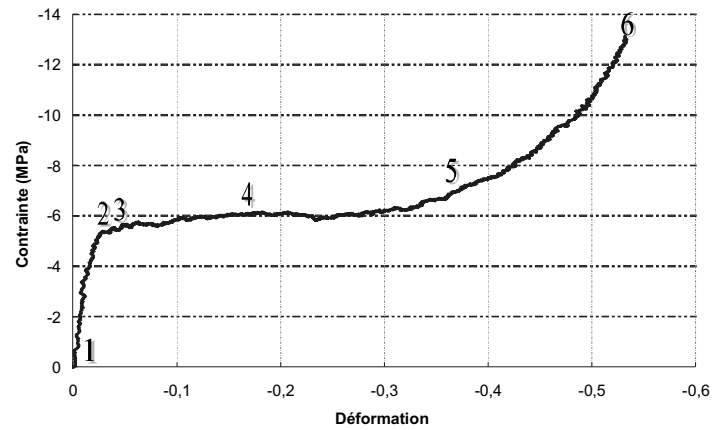


Image (1) : $\sigma \sim 0$ MPa ; $\epsilon \sim 0$

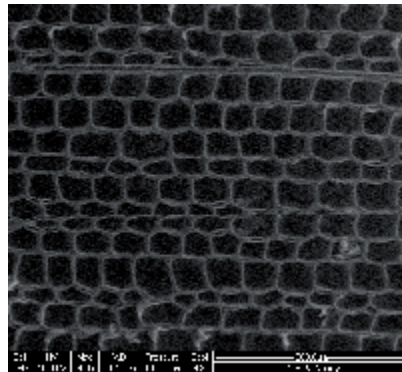


Image (2) : $\sigma \sim 5.33$ MPa ; $\epsilon \sim -0.0271$

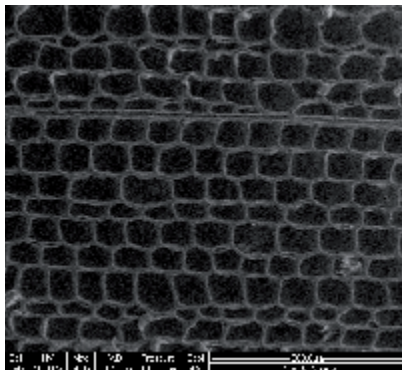


Image (3) : $\sigma \sim 5.45$ MPa ; $\epsilon \sim -0.043$

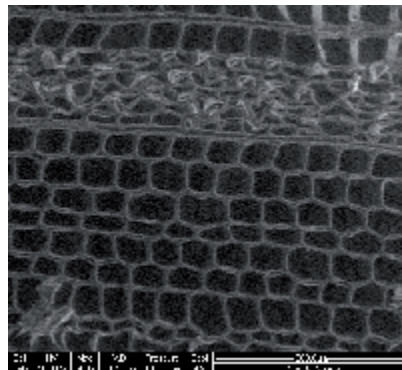


Image (4) : $\sigma \sim 6.07$ MPa ; $\epsilon \sim -0.168$

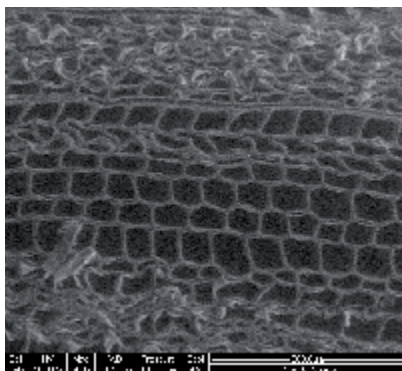


Image (5) : $\sigma \sim 6.92$ MPa ; $\epsilon \sim -0.366$

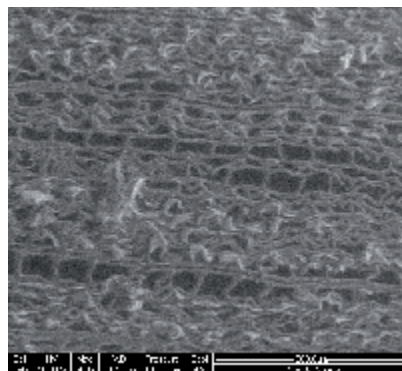


Image (6) : $\sigma \sim 13.1$ MPa ; $\epsilon \sim -0.532$

Figure 3 : Courbe de contrainte-déformation de l'essai de compression tangentielle, échantillon ET1 et ses images correspondantes aux points caractéristiques

Echantillon ET2

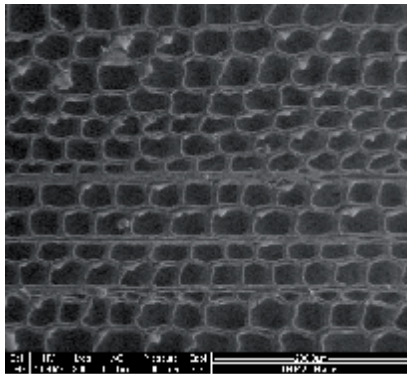
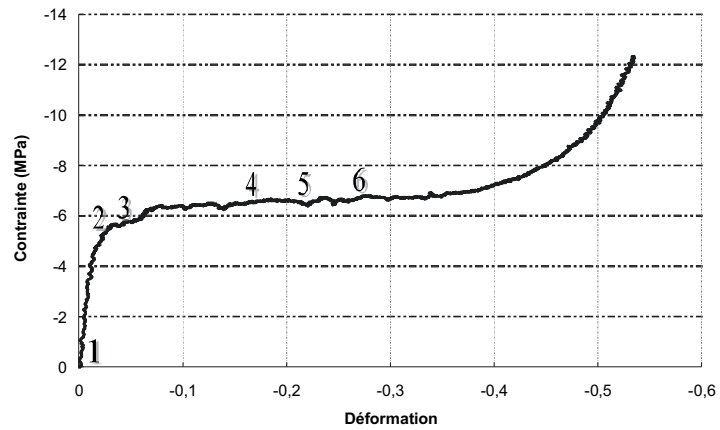


Image (1) : $\sigma \sim 0$ MPa ; $\epsilon \sim 0$

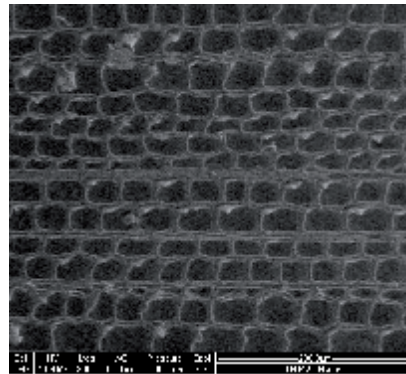


Image (2) : $\sigma \sim -5.29$ MPa ; $\epsilon \sim -0.0235$

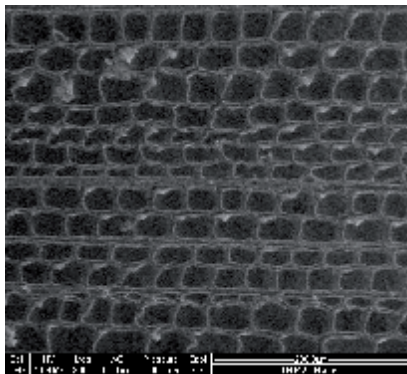


Image (3) : $\sigma \sim -5.78$ MPa ; $\epsilon \sim -0.046$

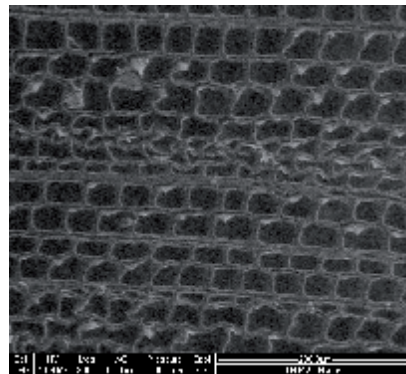


Image (4) : $\sigma \sim -6.51$ MPa ; $\epsilon \sim -0.163$

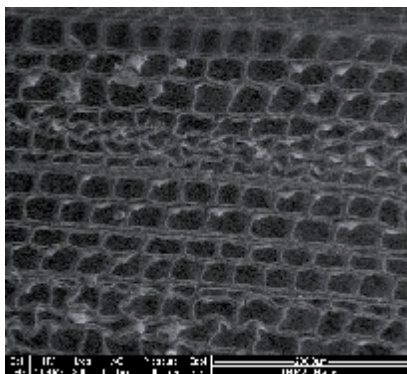


Image (5) : $\sigma \sim -6.55$ MPa ; $\epsilon \sim -0.213$

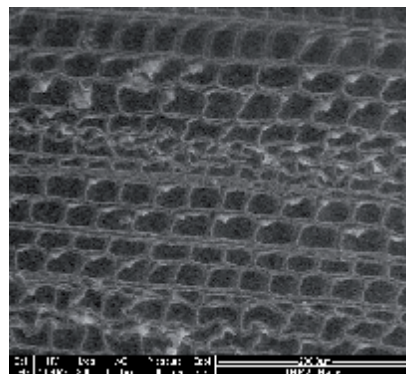


Image (6) : $\sigma \sim -6.67$ MPa ; $\epsilon \sim -0.268$

Figure 4 : Courbe de contrainte-déformation de l'essai de compression tangentielle, échantillon ET2 et ses images correspondantes aux points caractéristiques

Echantillon ET3

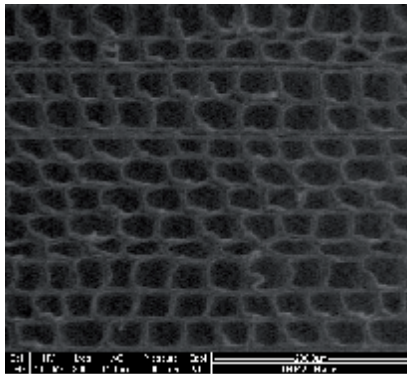
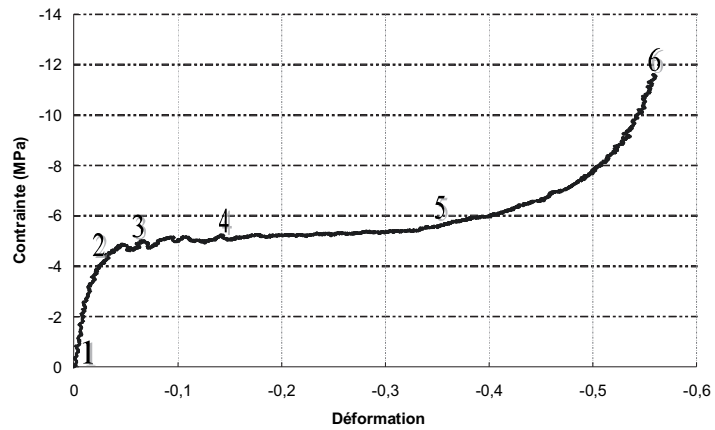


Image (1) : $\sigma \sim 0$ MPa ; $\varepsilon \sim 0$

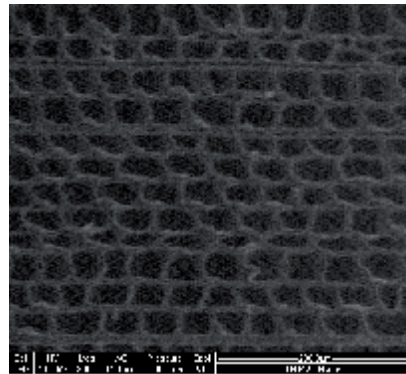


Image (2) : $\sigma \sim -4.11$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.0264$

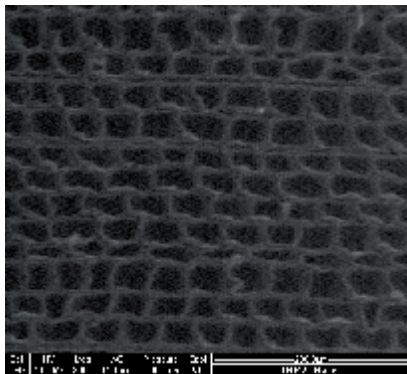


Image (3) : $\sigma \sim -4.87$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.061$

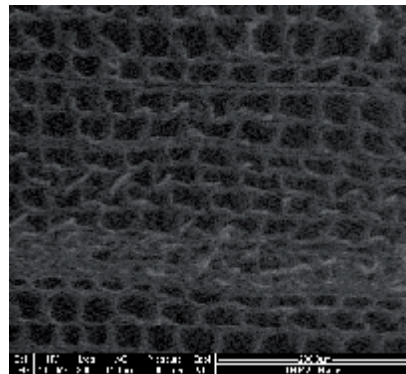


Image (4) : $\sigma \sim -5.2$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.143$

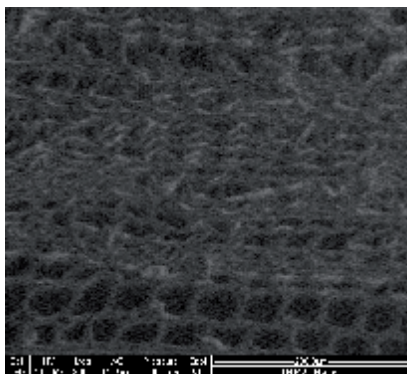


Image (5) : $\sigma \sim -5.56$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.351$

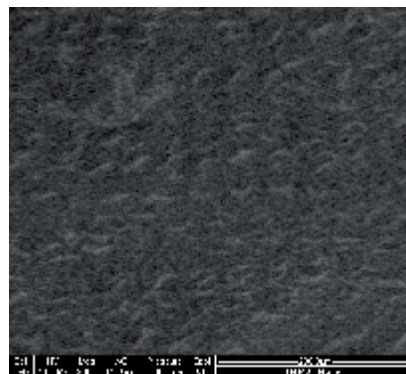


Image (6) : $\sigma \sim -10.13$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.547$

Figure 5 : Courbe de contrainte-déformation de l'essai de compression tangentielle, échantillon ET3 et ses images correspondantes aux points caractéristiques

Echantillon PR2

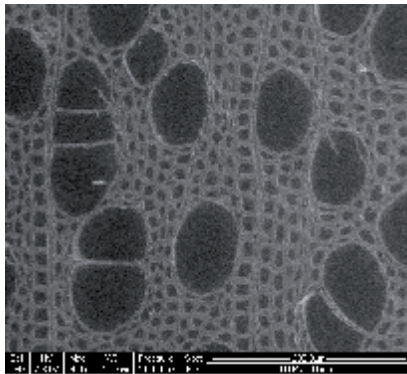
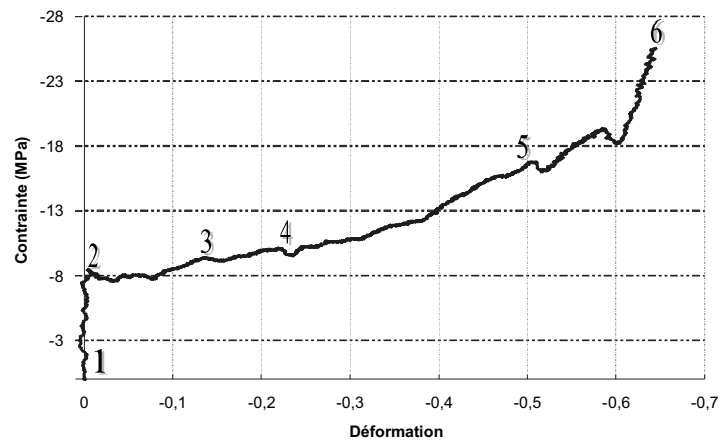


Image (1) : $\sigma \sim 0$ MPa ; $\epsilon \sim 0$

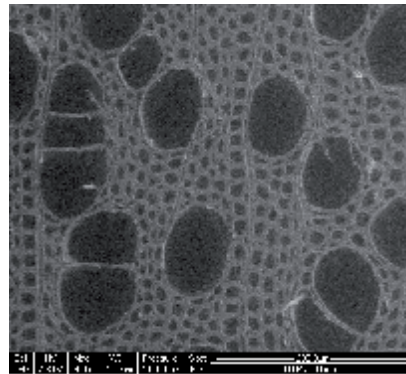


Image (2) : $\sigma \sim -8,18$ MPa ; $\epsilon \sim -0,0096$

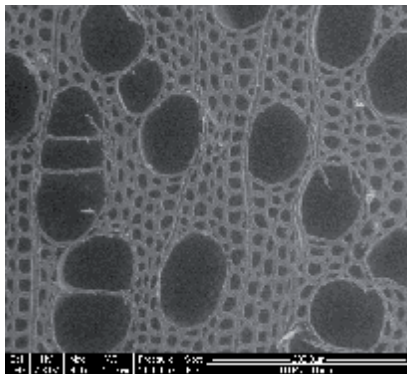


Image (3) : $\sigma \sim -9,34$ MPa ; $\epsilon \sim -0,137$

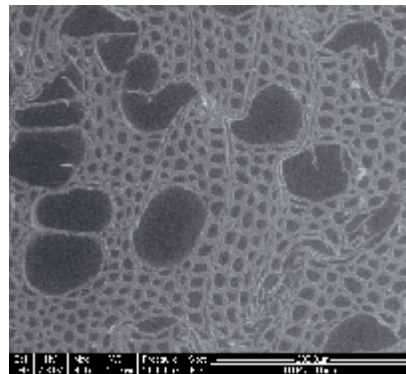


Image (4) : $\sigma \sim -9,65$ MPa ; $\epsilon \sim -0,228$

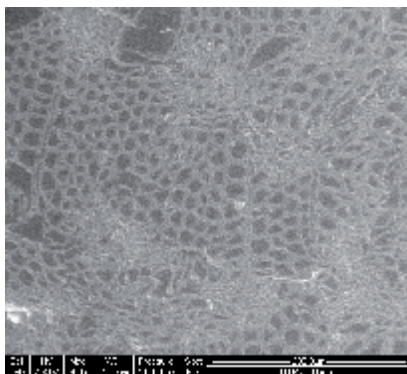


Image (5) : $\sigma \sim -16,17$ MPa ; $\epsilon \sim -0,494$

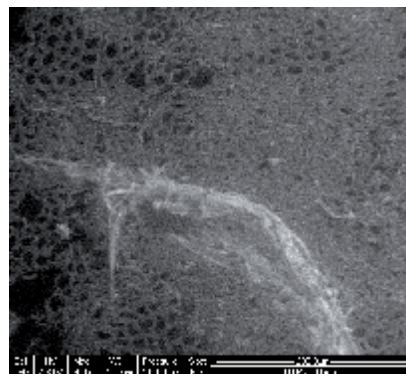


Image (6) : $\sigma \sim -25,48$ MPa ; $\epsilon \sim -0,644$

Figure 6 : Courbe de contrainte-déformation de l'essai de compression tangentielle, échantillon PR2 et ses images correspondantes aux points caractéristiques

Echantillon PR4

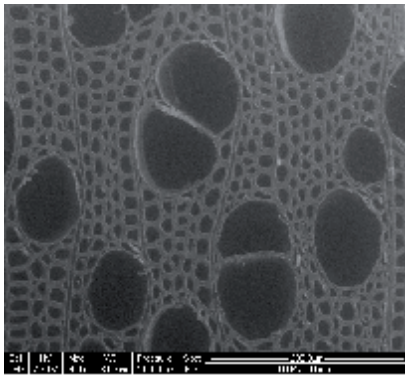
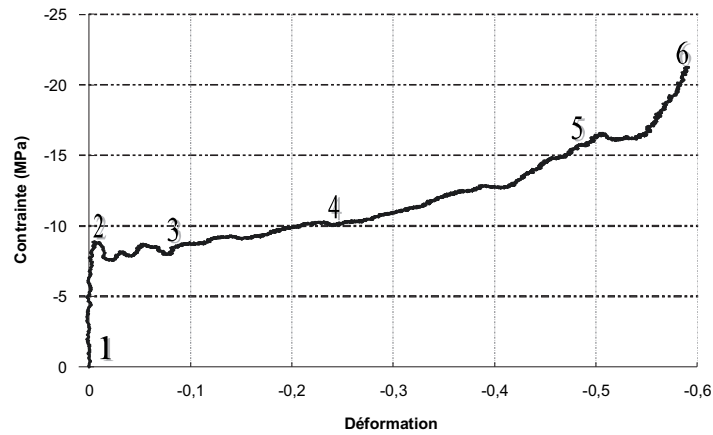


Image (1) : $\sigma \sim 0$ MPa ; $\varepsilon \sim 0$

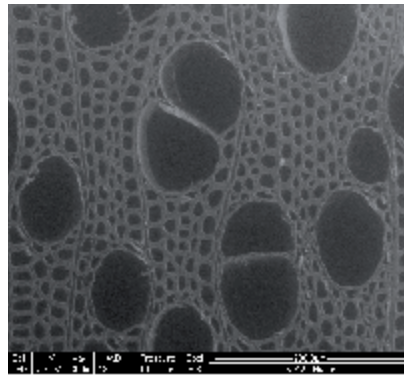


Image (2) : $\sigma \sim -8.74$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.0096$

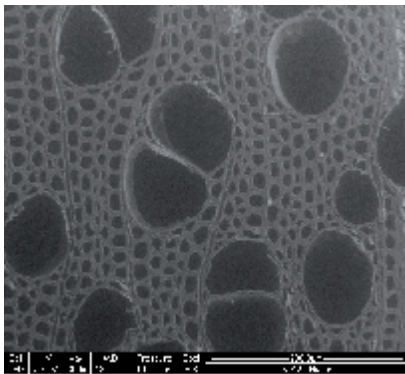


Image (3) : $\sigma \sim -8.08$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.081$

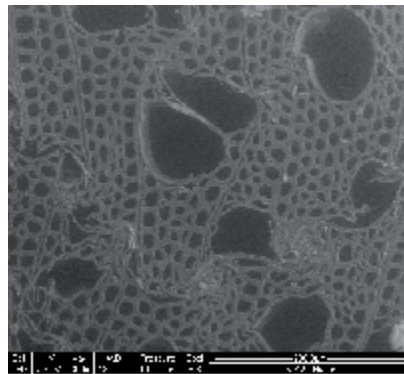


Image (4) : $\sigma \sim -10.06$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.243$

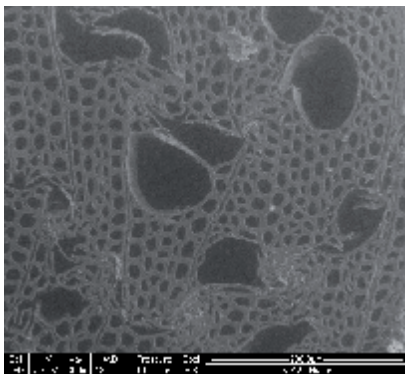


Image (5) : $\sigma \sim -15.55$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.481$

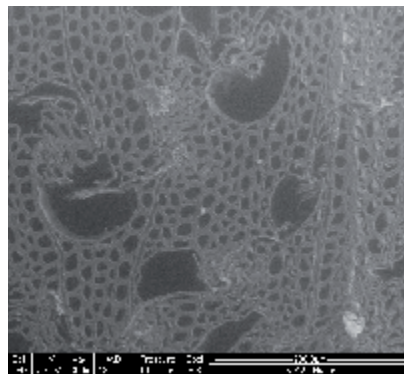


Image (6) : $\sigma \sim -21.23$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.589$

Figure 7 : Courbe de contrainte-déformation de l'essai de compression tangentielle, échantillon PR4 et ses images correspondantes aux points caractéristiques

Echantillon PR5

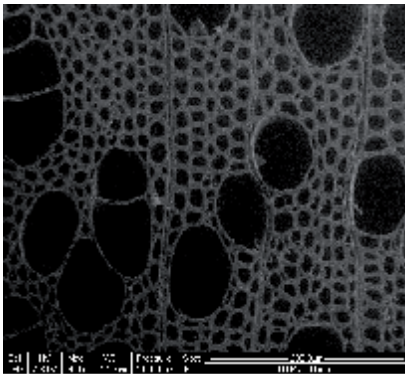
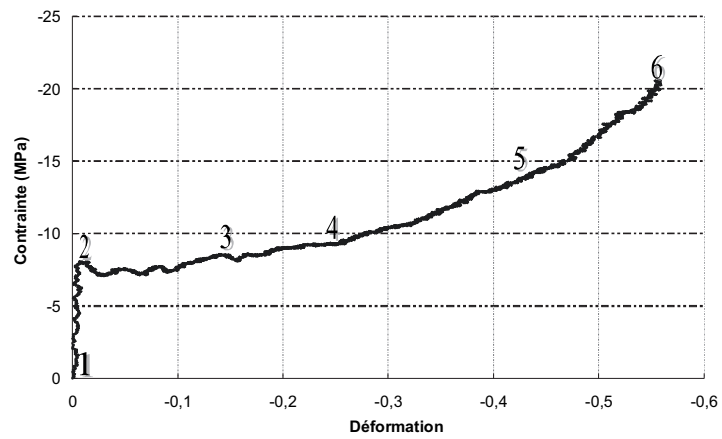


Image (1) : $\sigma \sim 0$ MPa ; $\varepsilon \sim 0$

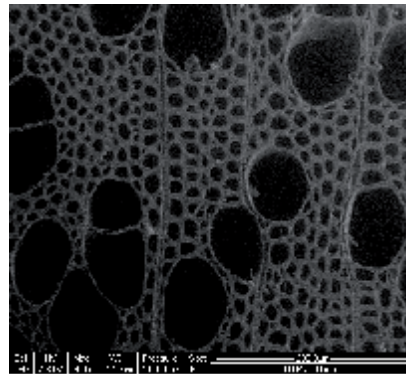


Image (2) : $\sigma \sim -8,01$ MPa ; $\varepsilon \sim -0,0089$

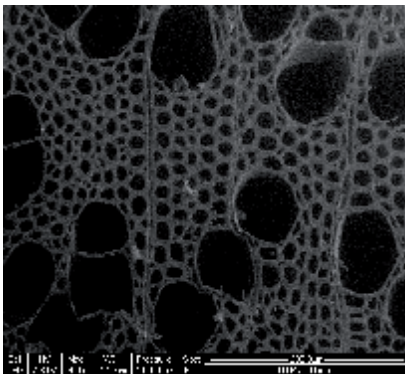


Image (3) : $\sigma \sim -8,51$ MPa ; $\varepsilon \sim -0,146$

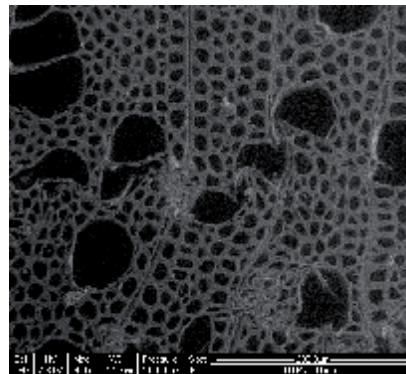


Image (4) : $\sigma \sim -9,29$ MPa ; $\varepsilon \sim -0,245$

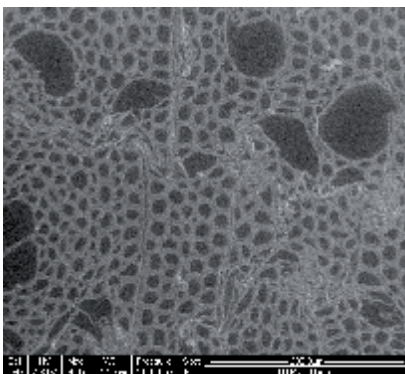


Image (5) : $\sigma \sim -13,75$ MPa ; $\varepsilon \sim -0,426$

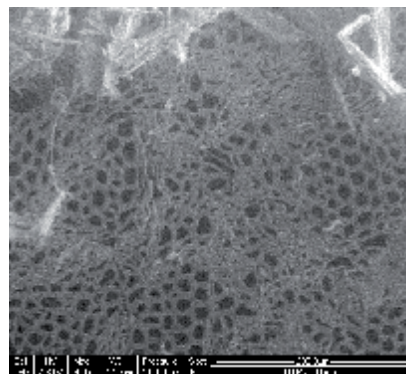


Image (6) : $\sigma \sim -20,55$ MPa ; $\varepsilon \sim -0,557$

Figure 8 : Courbe de contrainte-déformation de l'essai de compression tangentielle, échantillon PR5 et ses images correspondantes aux points caractéristiques

Echantillon PR6

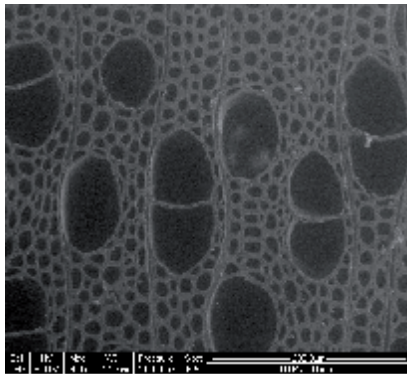
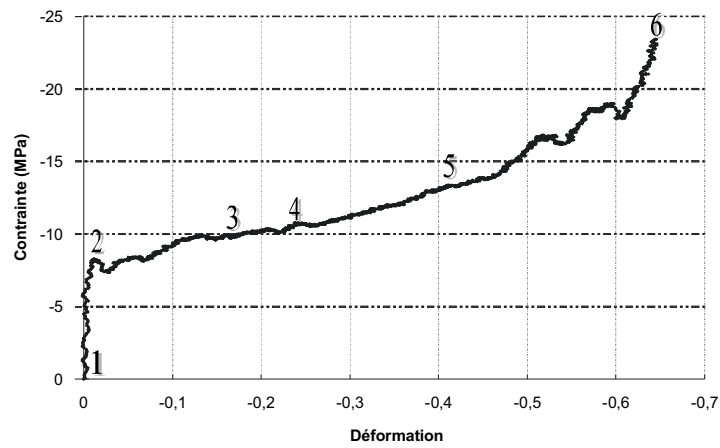


Image (1) : $\sigma \sim 0$ MPa ; $\varepsilon \sim 0$

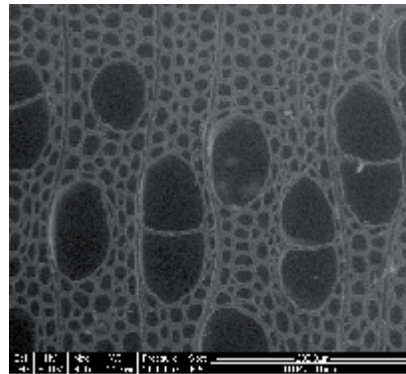


Image (2) : $\sigma \sim -8.21$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.0108$

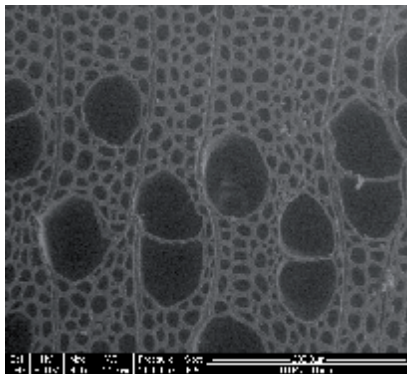


Image (3) : $\sigma \sim -9.75$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.165$

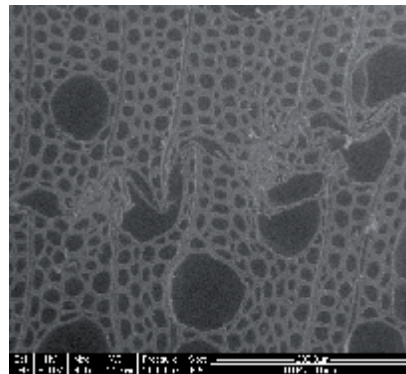


Image (4) : $\sigma \sim -10.76$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.238$

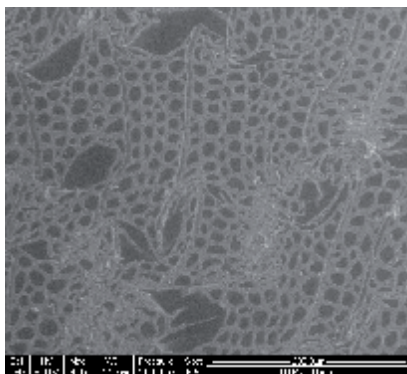


Image (5) : $\sigma \sim -13.35$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.409$

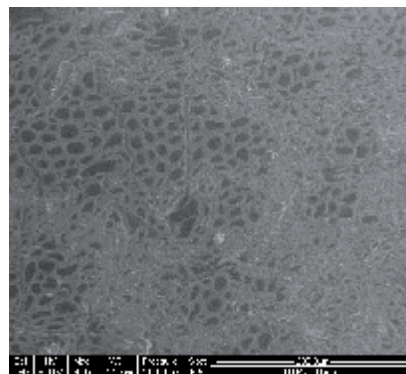


Image (6) : $\sigma \sim -23.38$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.644$

Figure 9 : Courbe de contrainte-déformation de l'essai de compression tangentielle, échantillon PR6 et ses images correspondantes aux points caractéristiques

Echantillon PT3

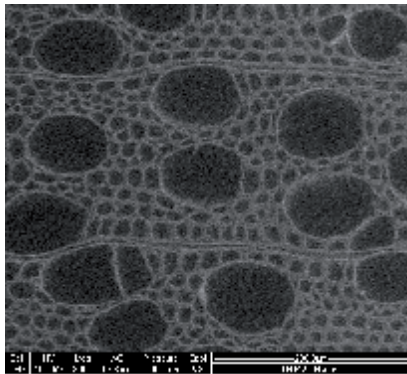
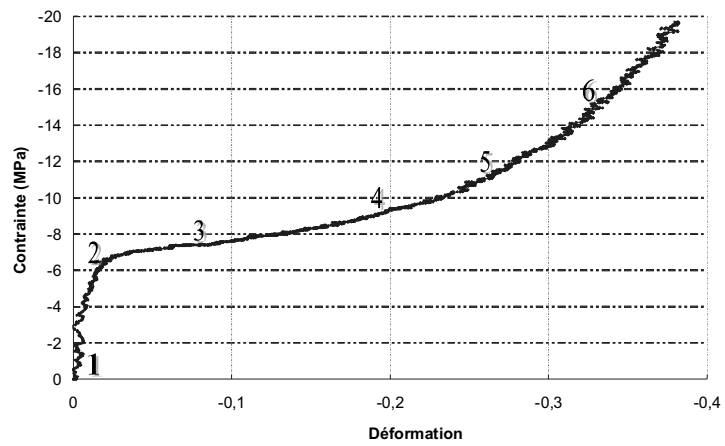


Image (1) : $\sigma \sim 0$ MPa ; $\varepsilon \sim 0$

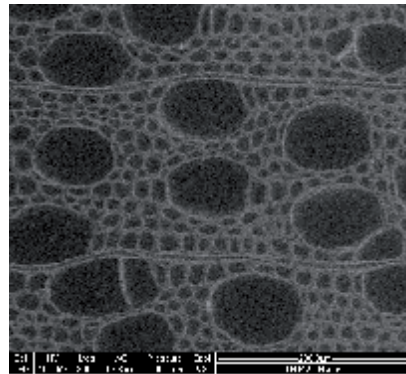


Image (2) : $\sigma \sim -5.96$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.0146$

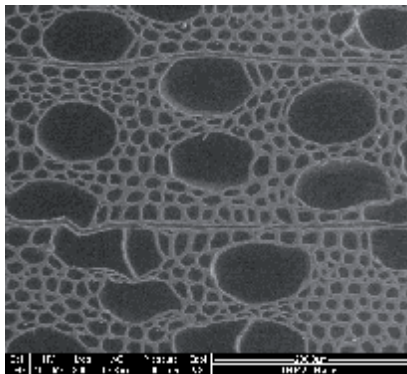


Image (3) : $\sigma \sim -7.14$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.079$

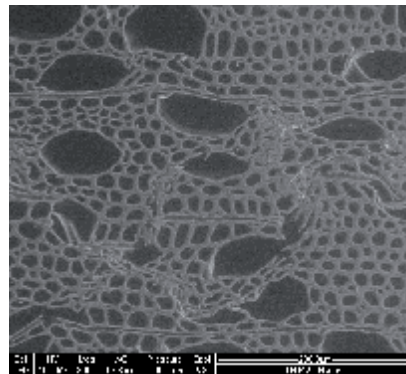


Image (4) : $\sigma \sim -9.08$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.191$

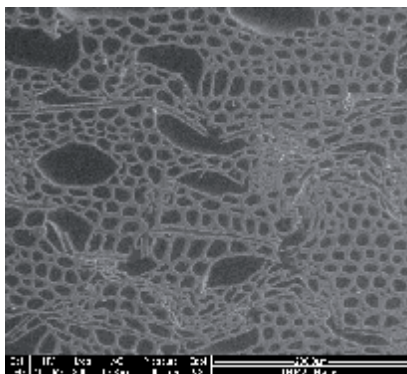


Image (5) : $\sigma \sim -11.24$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.261$

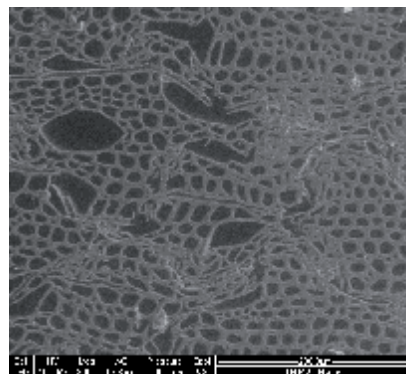


Image (6) : $\sigma \sim -14.42$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.327$

Figure 10 : Courbe de contrainte-déformation de l'essai de compression tangentielle, échantillon PT3 et ses images correspondantes aux points caractéristiques

Echantillon PT5

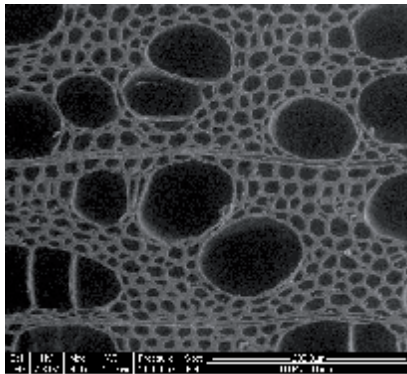
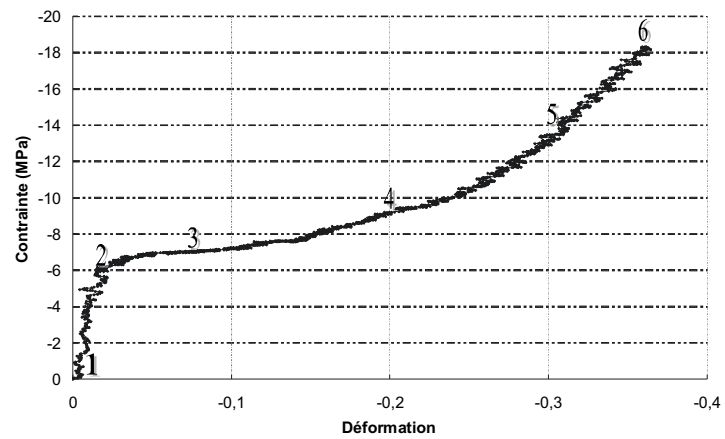


Image (1) : $\sigma \sim 0$ MPa ; $\varepsilon \sim 0$

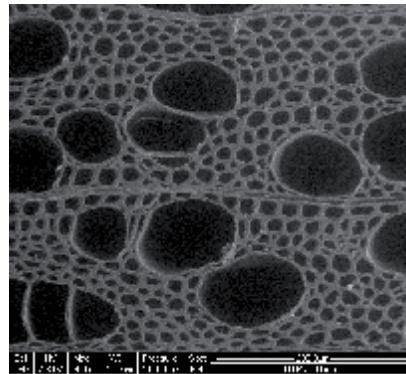


Image (2) : $\sigma \sim -5.79$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.0144$

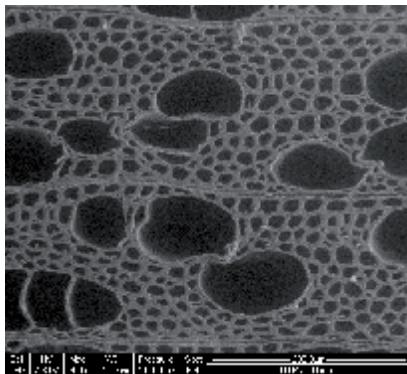


Image (3) : $\sigma \sim -7.04$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.75$

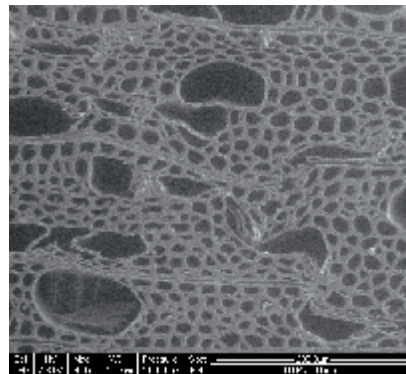


Image (4) : $\sigma \sim -9.19$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.196$

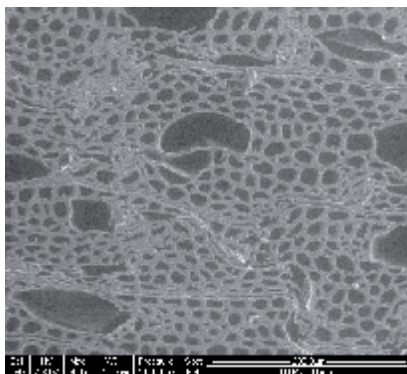


Image (5) : $\sigma \sim -13.2$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.303$

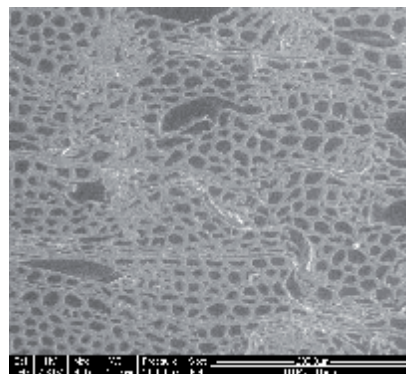


Image (6) : $\sigma \sim -18.31$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.359$

Figure 11 : Courbe de contrainte-déformation de l'essai de compression tangentielle, échantillon PT5 et ses images correspondantes aux points caractéristiques

Echantillon PT6

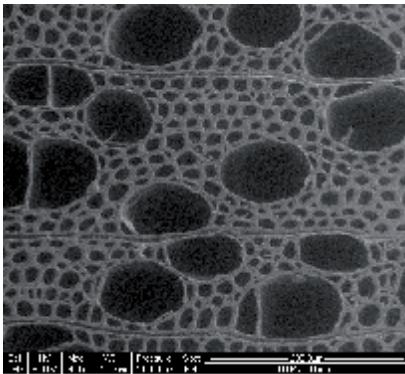
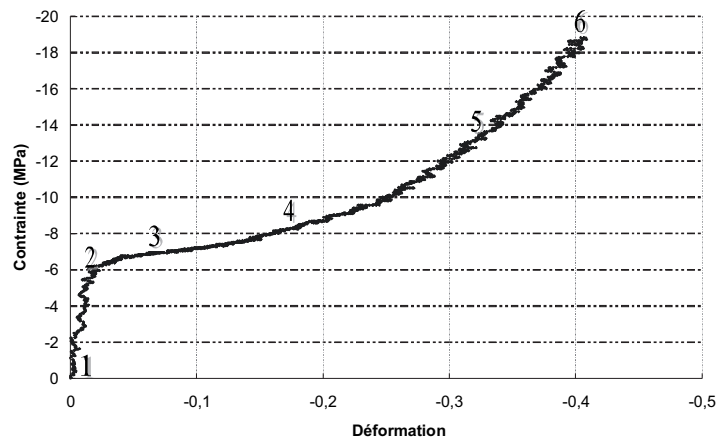


Image (1) : $\sigma \sim 0$ MPa ; $\varepsilon \sim 0$

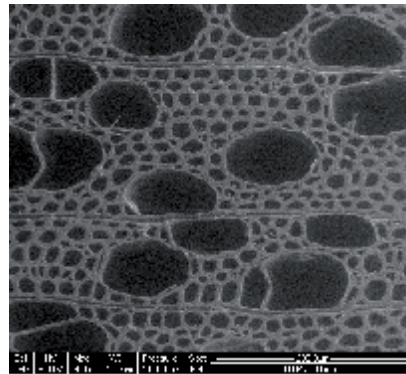


Image (2) : $\sigma \sim -6.16$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.0153$

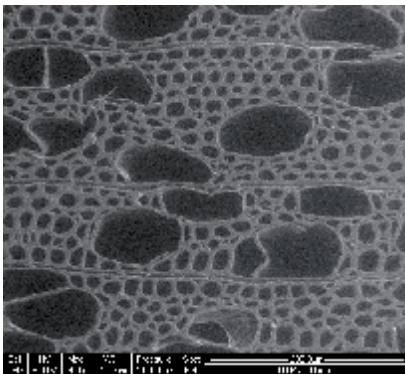


Image (3) : $\sigma \sim -6.96$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.064$

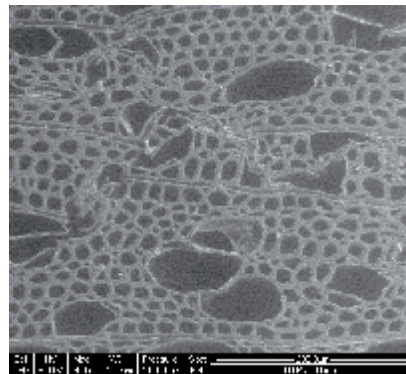


Image (4) : $\sigma \sim -8.28$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.176$

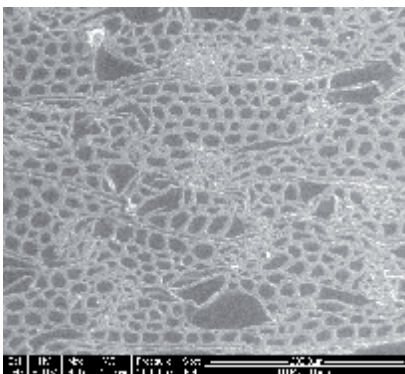


Image (5) : $\sigma \sim -13.19$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.323$

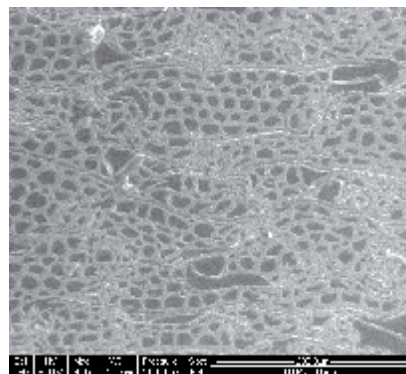


Image (6) : $\sigma \sim -18.82$ MPa ; $\varepsilon \sim -0.406$

Figure 12 : Courbe de contrainte-déformation de l'essai de compression tangentielle, échantillon PT6 et ses images correspondantes aux points caractéristiques

ANNEXE 2

Simulation numérique de la compression du bois en grande déformation à l'échelle de la cellule par la MPM (Material Point Method)

1. Pourquoi choisir la MPM

a. Quelques méthodes de calcul numérique

Depuis les années 1970, Gillis [1972] a fait des calculs analytiques pour caractériser les propriétés élastiques du bois dans le plan transversal en utilisant la loi de Hooke et la théorie des poutres. Il a confirmé la relation entre le module élastique et le module de cisaillement dans le domaine élastique du bois, $E_L > E_R > G_{LT} \sim G_{TL} > E_T > G_{RT}$, ce qui correspond au résultat montré dans « Wood Handbook » [Anonymous, 1955 cité dans Gillis, 1972]. Au cours des dernières années, Watanabe [1999 ; 2002] et Simon [2009] ont également pris cette méthode pour calculer les propriétés mécaniques du bois des résineux en supposant que la forme de la cellule du bois soit symétrique [Watanabe, 1999 ; 2002] ou asymétrique [Simon, 2009]. Par ailleurs, d'une part, étant donné que le calcul analytique rencontre beaucoup de difficultés dans le domaine plastique en grande déformation car les cellules du bois ne gardent pas la forme initiale dans ce domaine et que les angles entre les parois cellulaires sont modifiés, il est très difficile de faire les calculs comme dans le domaine élastique. D'autre part, comme ces calculs sont basés sur des cellules modélisées identiques et uniformes, ils ne sont pas suffisants pour démontrer tenant compte de tous les détails morphologiques d'un matériau très complexe comme le bois.

Une autre méthode qui est assez classique pour les mécaniciens est la méthode des éléments finis [Batoz, 1990]. La modélisation par cette méthode est un mode de simplification d'une structure qui permet de l'adapter au langage informatique, pour en traduire les propriétés mécaniques. Le matériau est tout d'abord maillé en un nombre fini des éléments, puis la loi de comportement est établie à tous ces éléments. Grâce aux matrices de rigidités (élémentaire et globale) qui montrent les propriétés intrinsèques (mécanique et géométrique) du matériau, et les matrices de sollicitations externes (force, déplacement etc.), la réponse de ces sollicitations est illustrée. Dans plusieurs littératures, de nombreux auteurs ont emprunté cette méthode pour réaliser leurs simulations de compression en grande déformation appliquée au matériau solide, par exemple le matériau aluminium (jusqu'à $\epsilon \sim 0.8$) [Meguid, 2002] ou polymère (jusqu'à $\epsilon \sim 0.1$) [Youseff, 2005].

Des simulations numériques par méthode des éléments finis appliquées sur le matériau bois sont également réalisées. Récemment, Oudjene [2009] a fait des simulations numériques sur la compression radiale du bois d'épicéa. Ses résultats numériques, à l'aide du logiciel ABAQUS, sont comparés avec ceux expérimentaux, présentés dans la Figure 1 ci-dessous

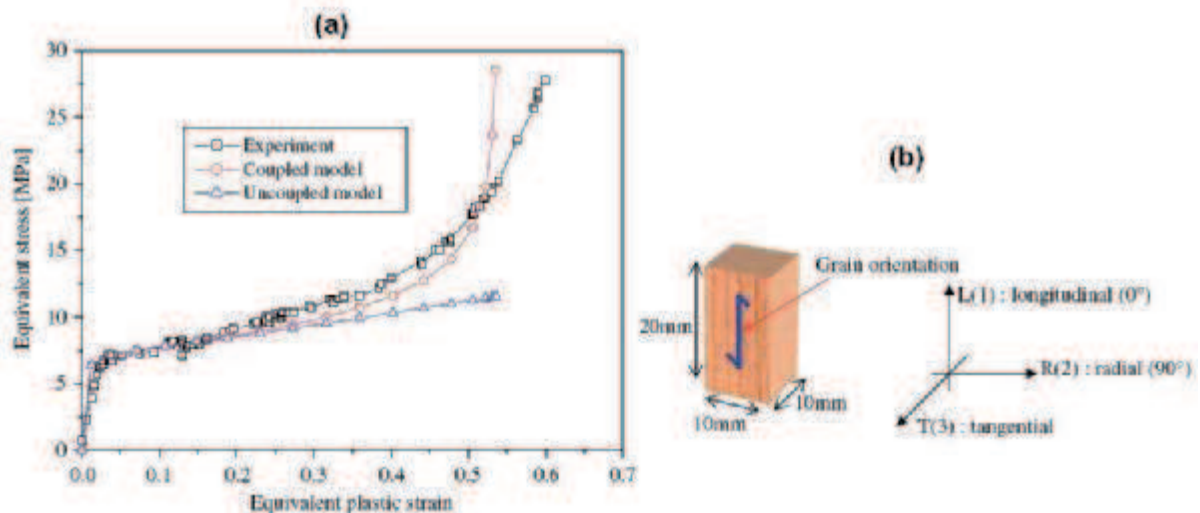


Figure 1: (a) Courbes de contrainte-déformation obtenues par essai de compression radiale de l'épicéa et par simulations numériques en utilisant la méthode des éléments finis d'Oudjene [2009] et (b) échantillon d'épicéa utilisé dans l'essai expérimental

Dans son travail, Oudjene a utilisé deux modèles : le « coupled model » prend en compte l'effet de densification obtenu à partir de l'essai expérimental et le « uncoupled model » ne le prend pas en compte. L'objectif de cette application est de valider les modèles développés en très grande déformation et d'évaluer l'effet de densification sur le comportement plastique du bois [Oudjene, 2009]. La Figure 1 montre que les deux modèles numériques sont similaires et cohérents avec le résultat expérimental à la déformation inférieure à 25%. À partir de cette valeur, le « uncoupled model » n'est plus attaché au « coupled model » qui est assez correct par rapport au résultat expérimental. Cela confirme qu'à partir de 25% de déformation de la compression radiale d'épicéa, l'effet de densification influe fortement sur son comportement plastique.

Par ailleurs, le matériau bois n'est plus considéré comme un matériau orthotrope à l'échelle de la cellule. Pour cette raison, la simulation numérique du comportement mécanique du bois par méthode des éléments finis a des difficultés à cette échelle. D'après Nairn [2006], les difficultés principales peuvent être citées ci-dessous :

- Il est très difficile de mailler un matériau complexe comme le matériau bois dans une grille de calcul par éléments finis. Le nombre d'éléments nécessaires pour détailler la morphologie réelle du bois est très élevé, le calcul devient donc très lourd
- La densification du bois implique des contacts entre les parois cellulaires. Bien que l'introduction de contact soit disponible dans le cadre de simulations numériques par éléments finis, leur utilisation est difficile dans le cas d'une structure réelle.
- Le flambement des parois et la densification ultérieure nécessitent un calcul en grande déformation. Les éléments finis sont mal adaptés dans ce cas.

Pour ces raisons, il est nécessaire de chercher de nouvelles méthodes adaptées à la simulation numérique du bois en grande déformation à l'échelle de la cellule. Dans la littérature [Sulsky, 1995 ; Bardenhagen, 2005 ; Nairn, 2006 ; Frank, 2010], on trouve que la MPM est un bon choix pour répondre à cette demande.

b. Histoire du développement de la MPM

Depuis les années 50, Harlow et son équipe ont pensé à combiner les deux approches eulérienne et lagrangienne afin de développer une nouvelle technique de calcul, appliquée à la simulation de l'écoulement du fluide, dite Particle In Cell (PIC) méthode [Harlow, 1963 cité dans Harlow, 2004]. Il existe dans cette technique de calcul un ensemble de cellules eulériennes et de particules lagrangiennes qui se déplacent à travers ces cellules ; chaque particule possède une masse constante. Quand une particule traverse la frontière d'une cellule, sa masse est supprimée de la cellule initiale et rajoutée à la nouvelle cellule, son énergie et sa quantité de mouvement sont également transférées. La procédure de calcul est ensuite réalisée en deux étapes : la première étape consiste à calculer toutes les variables, y compris les coordonnées de la grille de calcul et les positions des particules ; lors de la deuxième étape, la grille revient à sa position initiale en laissant les particules à leurs nouvelles positions [Evans, 1957 cité dans Harlow, 2004].

Rappel : L'approche lagrangienne consiste à suivre un point matériel constitutif du système au cours de son mouvement, on est alors à la mécanique du point. Pour chacun de ces points, on peut définir une masse m , une position \vec{r} , une vitesse \vec{v} etc. L'approche eulérienne, en revanche, consiste à décrire l'évolution du système à un point fixe ; dans ce cas, on ne peut

évidemment pas suivre les points matériels qui passent dans ce point d'observation, car à chaque l'instant, il s'agit d'un point différent.

PIC était une seule méthode, à l'époque, qui est capable de décrire l'écoulement du fluide à la grande déformation en 2 ou 3 dimensions [Harlow, 1963 cité dans Brackbill, 1988]. Par ailleurs, la précision de calcul par la PIC est compromise par diffusion de la quantité de mouvement et de l'énergie ; cette diffusion est causée par l'assignation des informations de la grille de calcul aux particules [Brackbill, 1986 ; 1988]. Il est nécessaire de l'améliorer.

En 1986, Brackbill et son équipe ont étendu la méthode PIC pour développer une nouvelle méthode, dite FLIP (FLuid Implicit Particle). Une grande différence entre la FLIP et la PIC est la mise à jour des informations aux particules. Dans la PIC, toutes les informations de particules, sauf la masse et la position, sont remplacées par celles renvoyées de la grille de calcul à chaque boucle de calcul. En revanche, dans la FLIP, les informations aux particules sont mises à jour à chaque nouvelle boucle de calcul. Cela permet de décrire complètement le fluide, de boucle à boucle, par particules, ne pas être temporaire comme dans la PIC.

Sulsky a étendu la méthode FLIP pour appliquer aux matériaux solides [Sulsky, 1994 ; Zhou, 1998] en ajoutant la force interne entre les particules, ce qui n'existe pas dans la FLIP [Sulsky, 1995]. Cette méthode, dite MPM (Material Point Method), est une des méthodes sans maillage [Frank, 2010] ; elle a obtenu des succès dans le traitement des problèmes concernant la grande déformation des matériaux solides. Dans cette méthode, le matériau est discrétisé en plusieurs particules (points matériels), comme une image numérique représentée par pixel [Nairn, 2006]. Ces points matériels emmènent toutes les propriétés du matériau et donc gèrent les équations constitutives dans l'approche lagrangienne. [Frank, 2010]. Comme la FLIP, la MPM utilise deux discrétisations de matériau, l'une basée sur la grille de calcul et l'autre basée sur les points matériels. Cette approche combine les avantages des descriptions eulérienne et lagrangienne en évitant les défauts de chacune [Sulsky, 1995]. Premièrement, les mailles de calcul utilisées dans la MPM ne sont jamais trop déformées. Les points matériels se déplacent à travers des mailles mais la grille de calcul est réactualisée à chaque boucle de calcul, donc il n'apparaît pas sa distorsion. Deuxièmement, la MPM gère automatiquement le contact entre les points matériels ainsi qu'entre les parois cellulaires lors de la densification du bois [Nairn, 2006]. Un autre avantage de la MPM est la discrétisation simple de matériau complexe [Bardenhagen, 2005], y compris la discrétisation directe à partir des images 2D ou 3D [Frank, 2010].

Grâce à ces avantages, la MPM est développée et appliquée à la modélisation des différents types de matériau comme la membrane de faible épaisseur [York, 1999], le matériau granulaire [Bardenhagen, 2000]. Dans le domaine du bois, la simulation numérique utilisant la théorie de la MPM est réussie à différentes échelles, de l'échelle des tissus à l'échelle du cerne, avec les différents types de sollicitation, par exemple la propagation de fissure dans le plan transversal sous la sollicitation d'une force axiale uniforme [Nairn, 2007] ou la compression transversale en grande déformation ($\epsilon_{\max} \sim 0.6$) [Nairn, 2006].

2. Etablissement de la MPM par la mécanique des milieux continus

a. Les équations de base de la mécanique des milieux continus

On considère un point M situé dans un domaine D. Au point M, la masse volumique est ρ dans un volume $d\Omega$. On définit la vitesse \vec{v} et l'accélération \vec{a} du point M en fonction de sa position \vec{r} et du temps t.

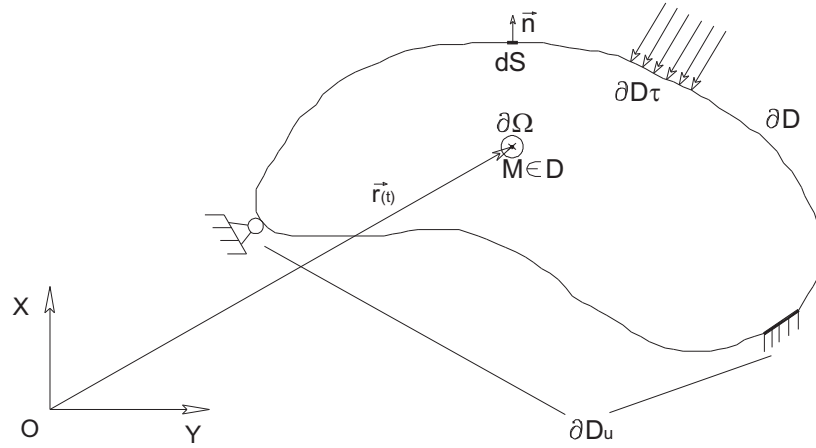


Figure 2 : Configuration du domaine D

L'équation locale de conservation de masse est présentée:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \right) = \frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div}(\vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Supposons qu'il y a une force externe appliquée sur D dans point de vue global. En utilisant le principe fondamental de la mécanique, on obtient l'équation globale, qui est aussi une équation de conservation de la quantité de mouvement, sur le domaine D

$$\frac{d}{dt} \left\{ \int_D \rho \vec{v} d\Omega \right\} = \left\{ \int_D \rho \vec{a} d\Omega \right\} = \left\{ \vec{T}_{global}(ext \rightarrow D) \right\} \quad (2)$$

Avec $d\Omega$: volume infinitésimal du domaine D

\vec{a} : accélération

$\vec{T}_{global}(ext \rightarrow D)$: force externe appliquée sur D

La force externe est décomposée en deux parties, l'action à distance \vec{b} (i.e. dans le cas de pesanteur, $\vec{b} = \vec{g}$) et l'action de contact \vec{T} . On obtient donc l'équation globale :

$$\int_D \rho \vec{b} d\Omega + \int_{\partial D} \vec{T}_{(M, \vec{n})} dS = \int_D \rho \vec{a} d\Omega \quad (3)$$

Avec dS : surface infinitésimale de la frontière ∂D

$\vec{T}_{(M, \vec{n})}$: action de contact du point M

Au point M, $\vec{T}_{(M, \vec{n})} = \overline{\overline{\sigma}} \cdot \vec{n}$

Avec $\overline{\overline{\sigma}}$: Tenseur de contraintes au point M

\vec{n} : Vecteur normal de la frontière ∂D du domaine D au point M

$$\rightarrow \int_D \rho \vec{b} d\Omega + \int_{\partial D} \overline{\overline{\sigma}} \cdot \vec{n} dS = \int_D \rho \vec{a} d\Omega \quad (4)$$

En appliquant le théorème de la divergence (théorème de Green-Ostrogradski) au deuxième terme du membre de gauche, on obtient le flux d'un champ tensoriel $\overline{\overline{A}}$ au travers de la surface ∂D enveloppant le domaine D est égal à l'intégrale de la divergence du champ tensoriel sur le domaine : $\int_{\partial D} \overline{\overline{A}} \cdot \vec{n} dS = \int_D \operatorname{div} \overline{\overline{A}} d\Omega$

$$\rightarrow \int_D \rho \vec{b} d\Omega + \int_D (\text{div} \vec{\sigma}) d\Omega = \int_D \rho \vec{a} d\Omega \quad (5)$$

$$\Leftrightarrow \int_D (\rho \vec{b} + (\text{div} \vec{\sigma}) - \rho \vec{a}) d\Omega = 0 \quad (6)$$

$$\Leftrightarrow \rho \vec{b} + (\text{div} \vec{\sigma}) - \rho \vec{a} = 0 \quad (7)$$

Cette équation est vraie quel que soit le domaine D

→ Equation locale

$$\rho \vec{b} + (\text{div} \vec{\sigma}) = \rho \vec{a} \quad (8)$$

Supposons qu'on soit dans le cas de petite déformation. La vitesse de déformation est :

$$\frac{d\vec{\varepsilon}}{dt} = \frac{1}{2} \left\{ (\overline{\text{grad}} \vec{v}) + (\overline{\text{grad}} \vec{v})^T \right\} \quad (9)$$

Avec $\vec{\varepsilon}$: tenseur de déformation, tenseur du seconde ordre permettant de représenter l'état de déformation (dilatations linéaires et distorsions angulaires) en un point

La vitesse de contrainte peut s'écrire à l'aide du tenseur T, appelé module tangent, grâce à la relation suivante :

$$\frac{d\vec{\sigma}}{dt} = T : \frac{d\vec{\varepsilon}}{dt} \quad (10)$$

b. Explications mécaniques de la MPM

Le matériau est divisé par N_p points matériels individuels, chaque point matériel porte une masse fixe M_p . Ce point se situe à la position $\vec{r}_p(0)$ à l'état initial $t=0$ et il se situe à la position $\vec{r}_p(t)$ au moment t. La masse volumique en tout point de l'espace est déterminée par:

$$\rho(\vec{r}, t) = \sum_{p=1}^{N_p} M_p \delta[\vec{r} - \vec{r}_p(t)] \quad (11)$$

Avec δ : distribution de Dirac

La masse totale est égale à la somme de toutes les masses des points matériels :

$$\int_D \rho(\vec{r}, t) d\Omega = \int_D \sum_{p=1}^{N_p} M_p \delta[\vec{r} - \vec{r}_p(t)] d\Omega = \sum_{p=1}^{N_p} M_p \int_D \delta[\vec{r} - \vec{r}_p(t)] d\Omega \quad (12)$$

Connaissant les propriétés de distribution de Dirac, on obtient

$$\sum_{p=1}^{N_p} M_p \int_D \delta[\vec{r} - \vec{r}_p(t)] d\Omega = \sum_{p=1}^{N_p} M_p \times 1 \quad (13)$$

$$\text{Donc } \int_D \rho(\vec{r}, t) d\Omega = \sum_{p=1}^{N_p} M_p \quad (14)$$

Car on fixe initialement les valeurs des M_p de telle façon que la somme des M_p soit égale à la masse totale du système à $t=0$ ce qui est fixée, l'équation de conservation de masse (1) est satisfaite.

De l'équation (8), on fait l'intégration sur tout domaine D en multipliant avec une fonction de test arbitraire \vec{w} , on obtient :

$$\int_D \rho \bar{w} \cdot \bar{a} d\Omega = \int_D (\overrightarrow{\text{div}} \bar{\bar{\sigma}}) \cdot \bar{w} d\Omega + \int_D \rho \bar{w} \cdot \bar{b} d\Omega \quad (15)$$

Appliquer la formule : $\text{div}(\bar{\bar{\sigma}} \cdot \bar{w}) = \overrightarrow{\text{div}} \bar{\bar{\sigma}} \cdot \bar{w} + \bar{\bar{\sigma}} : \overrightarrow{\text{grad}} \bar{w}$

$$\rightarrow \text{On a } \int_D \rho \bar{w} \cdot \bar{a} d\Omega = \int_D \text{div}(\bar{\bar{\sigma}} \cdot \bar{w}) d\Omega - \int_D \bar{\bar{\sigma}} : \overrightarrow{\text{grad}} \bar{w} d\Omega + \int_D \rho \bar{w} \cdot \bar{b} d\Omega \quad (16)$$

Appliquer le théorème de la divergence : $\int_D \text{div} A d\Omega = \int_{\partial D} A \cdot \bar{n} dS$

$$\rightarrow \text{On a } \int_D \rho \bar{w} \cdot \bar{a} d\Omega = \int_{\partial D} \bar{\bar{\sigma}} \cdot \bar{w} \cdot \bar{n} dS - \int_D \bar{\bar{\sigma}} : \overrightarrow{\text{grad}} \bar{w} d\Omega + \int_D \rho \bar{w} \cdot \bar{b} d\Omega \quad (17)$$

Puisque $\bar{\bar{\sigma}}_{ij} = \bar{\bar{\sigma}}_{ji}$, on obtient :

$$\int_{\partial D} (\bar{\bar{\sigma}} \cdot \bar{w}) \cdot \bar{n} dS = \int_{\partial D} \bar{w} \cdot (\bar{\bar{\sigma}} \cdot \bar{n}) dS \quad (18)$$

On divise la frontière du domaine D en deux parties : $\partial D = \partial D_u \cup \partial D_\tau$ (voir Figure 2)

Avec ∂D_u : les points où l'on impose les déplacements $\bar{g}_{(t)}$

∂D_τ : les points où l'on impose les efforts (force surfacique) $\bar{\tau}_{(t)}$

Contrainte du point matériel est définie :

$$\bar{\bar{\sigma}}(\bar{r}, t) \cdot \bar{n} = \bar{\tau}(t) \text{ sur } \partial D_\tau \quad (19)$$

Notons que le déplacement et la contrainte sont identiques pour tous les points concernés puisqu'ils ne dépendent pas des positions, ni d'un quelconque numéro de point matériel.

$$\rightarrow \int_D \rho \bar{w} \cdot \bar{a} d\Omega = \int_{\partial D_u} \bar{w} \cdot (\bar{\bar{\sigma}} \cdot \bar{n}) dS + \int_{\partial D_\tau} \bar{w} \cdot \bar{\tau} dS - \int_D \bar{\bar{\sigma}} : \overrightarrow{\text{grad}} \bar{w} d\Omega + \int_D \rho \bar{w} \cdot \bar{b} d\Omega \quad (20)$$

$$\text{En supposant que la fonction de test } \bar{w} \text{ est nulle sur } \partial D_u, \text{ on a } \int_{\partial D_u} \bar{w} \cdot (\bar{\bar{\sigma}} \cdot \bar{n}) dS = 0 \quad (21)$$

$$\rightarrow \int_D \rho \bar{w} \cdot \bar{a} d\Omega = \int_{\partial D_\tau} \bar{w} \cdot \bar{\tau} dS - \int_D \rho \bar{\sigma}^s : \overrightarrow{\text{grad}} \bar{w} d\Omega + \int_D \rho \bar{w} \cdot \bar{b} d\Omega \quad (22)$$

Avec $\bar{\sigma}^s = \frac{\bar{\sigma}}{\rho}$: contrainte spécifique à la position du point matériel

En portant l'équation (14) à l'équation (22), on a :

$$\sum_{p=1}^{N_p} M_p \bar{w}(\bar{r}_p(t)) \cdot \bar{a}(\bar{r}_p(t)) = \int_{\partial D_\tau} \bar{w} \cdot \bar{\tau} dS - \sum_{p=1}^{N_p} M_p \bar{\sigma}^s(\bar{r}_p(t)) : \overrightarrow{\text{grad}} \bar{w}(\bar{r}_p(t)) + \sum_{p=1}^{N_p} M_p \bar{w}(\bar{r}_p(t)) \cdot \bar{b}(\bar{r}_p(t)) \quad (23)$$

Une grille de calcul est distribuée au matériau, elle comporte plusieurs cellules isoparamétriques. Isolons et considérons une cellule quelconque, elle est utilisée pour définir la fonction de base nodale $N_i(\bar{r})$ qui associe avec les nœuds spatiaux $x_{i(t)}$, $i=1, \dots, N_n$; N_n est le nombre total des nœuds (dans le cas où la cellule de la grille de calcul est carrée, $N_n=4$). Les coordonnées de tous les points matériels situés dans cette cellule peuvent être déterminées en prenant les fonctions de bases nodales.

Pour mieux comprendre la fonction de base nodale $N_i(\bar{r})$, un exemple simple est démontré ci-dessous :

Considérons un point $M(x,y)$ présenté par la position géométrique dans l'espace euclidien $\overrightarrow{OM} = \vec{r}$, il se situe dans un carré (cellule) quelconque de la grille de calcul qui est définie par les 4 nœuds : 1(a_1, a_2) ; 2($a_1+\delta, a_2$) ; 3($a_1+\delta, a_2+\delta$) ; 4($a_1, a_2+\delta$) ; δ est le pas de cette grille de calcul (Figure 3)

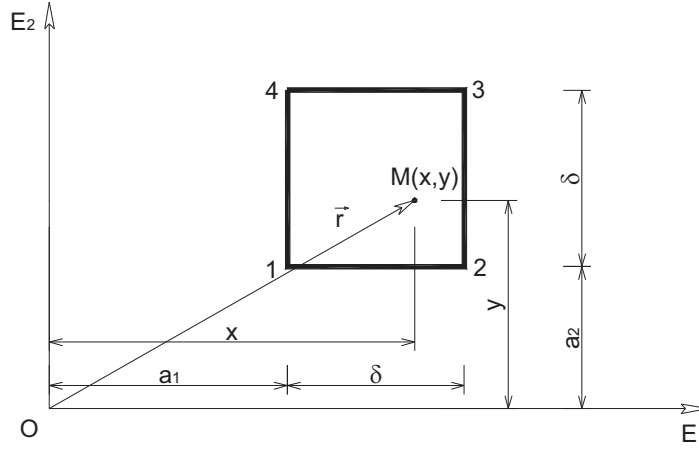


Figure 3 : Point M situé dans une cellule de la grille de calcul

La position du point M est présentée par les fonctions de base nodales :

$$\overrightarrow{OM} = \vec{r} = \sum_{i=1}^4 \vec{r}_i N_i(\vec{r}) \quad (24)$$

$$\text{Avec } \vec{r}_1 = a_1 \vec{E}_1 + a_2 \vec{E}_2 \quad (25)$$

$$\vec{r}_2 = (a_1 + \delta) \vec{E}_1 + a_2 \vec{E}_2 \quad (26)$$

$$\vec{r}_3 = (a_1 + \delta) \vec{E}_1 + (a_2 + \delta) \vec{E}_2 \quad (27)$$

$$\vec{r}_4 = a_1 \vec{E}_1 + (a_2 + \delta) \vec{E}_2 \quad (28)$$

$$\Rightarrow \overrightarrow{OM} = \vec{r} = x \vec{E}_1 + y \vec{E}_2 = \sum_{i=1}^4 \vec{r}_i N_i(\vec{r}) = N_1 \vec{r}_1 + N_2 \vec{r}_2 + N_3 \vec{r}_3 + N_4 \vec{r}_4 \quad (29)$$

$$= N_1 [a_1 \vec{E}_1 + a_2 \vec{E}_2] + N_2 [(a_1 + \delta) \vec{E}_1 + a_2 \vec{E}_2] + N_3 [(a_1 + \delta) \vec{E}_1 + (a_2 + \delta) \vec{E}_2] + N_4 [a_1 \vec{E}_1 + (a_2 + \delta) \vec{E}_2]$$

$$= [N_1 a_1 + N_2 (a_1 + \delta) + N_3 (a_1 + \delta) + N_4 a_1] \vec{E}_1 + [N_1 a_2 + N_2 a_2 + N_3 (a_2 + \delta) + N_4 (a_2 + \delta)] \vec{E}_2$$

$$\Rightarrow N_1 a_1 + N_2 (a_1 + \delta) + N_3 (a_1 + \delta) + N_4 a_1 = x \quad x \in [a_1, a_1 + \delta] \quad (30)$$

$$\text{Et } N_1 a_2 + N_2 a_2 + N_3 (a_2 + \delta) + N_4 (a_2 + \delta) = y \quad y \in [a_2, a_2 + \delta] \quad (31)$$

Ces deux équations (30 et 31) expriment la représentation des coordonnées du point $M(x,y)$ par les fonctions de bases nodales $N_i(\vec{r})$. Dans la MPM, ces fonctions sont déterminées comme celles dans la méthode des éléments finis [Frank, 2010]. On peut trouver donc plusieurs manières différentes pour définir des fonctions nodales dans la littérature [Brackbill, 1986 ; Batoz, 1990]. Basé sur le travail de Chen [2002], on peut choisir simplement les fonctions de base nodales pour la cellule carrée, présentées ci-dessous :

$$N_1 = \left(1 - \frac{x - a_1}{\delta}\right) \times \left(1 - \frac{y - a_2}{\delta}\right) \quad (32)$$

$$N_2 = \left(\frac{x - a_1}{\delta}\right) \times \left(1 - \frac{y - a_2}{\delta}\right) \quad (33)$$

$$N_3 = \left(\frac{x - a_1}{\delta} \right) \times \left(\frac{y - a_2}{\delta} \right) \quad (34)$$

$$N_4 = \left(1 - \frac{x - a_1}{\delta} \right) \times \left(\frac{y - a_2}{\delta} \right) \quad (35)$$

La position de point matériel est alors déterminée en prenant les fonctions de base nodales

$$\vec{r} = \sum_{i=1}^{N_n} \vec{r}_i(t) N_i(\vec{r}) \quad (36)$$

Les déplacements des éléments sont définis par les déplacements des nœuds (position initiale et finale des nœuds), donc les déplacements ont la même forme :

$$\vec{u}(\vec{r}, t) = \sum_{i=1}^{N_n} \vec{u}_i(t) N_i(\vec{r}) \quad (37)$$

La vitesse et l'accélération sont la dérivée de déplacement en fonction du temps, elles représentent alors la même forme :

$$\vec{V}(\vec{r}, t) = \sum_{i=1}^{N_n} \vec{V}_i(t) N_i(\vec{r}) \quad (38)$$

Et

$$\vec{a}(\vec{r}, t) = \sum_{i=1}^{N_n} \vec{a}_i(t) N_i(\vec{r}) \quad (39)$$

On choisit la même forme pour la fonction de test \vec{w} :

$$\vec{w}(\vec{r}, t) = \sum_{i=1}^{N_n} \vec{w}_i(t) N_i(\vec{r}) \quad (40)$$

On prend l'exposant k, k=1, ..., K, pour décrire l'évaluation au temps t^k, par exemple w_i^k décrit w_i(t^k); en remplaçant les équations (39) et (40) à l'équation (23), on obtient

$$\sum_{i=1}^{N_n} \vec{w}_i^k \cdot \sum_{j=1}^{N_n} m_{ij}^k \vec{a}_j^k = - \sum_{i=1}^{N_n} \vec{w}_i^k \cdot \sum_{p=1}^{N_p} M_p \overline{\overline{\sigma_p^{s,k}}} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} N_i(\vec{r}_p^k) + \sum_{i=1}^{N_n} \vec{w}_i^k \cdot \vec{\tau}_i^k + \sum_{i=1}^{N_n} \vec{w}_i^k \cdot \vec{b}_i^k \quad (41)$$

$$\text{Avec } m_{ij}^k = \sum_{p=1}^{N_p} M_p N_i(\vec{r}_p^k) N_j(\vec{r}_p^k) : \text{matrice de masse} \quad (42)$$

$$\vec{\tau}_i^k = \int_{\partial D\tau} N_i(\vec{r}^k) \vec{\tau}(\vec{r}^k) dS \quad (43)$$

$$\vec{a}_j^k : \text{accélération déterminée au nœud } j \text{ au temps } k \quad (44)$$

$$\vec{b}_i^k = \sum_{p=1}^{N_p} M_p \vec{b}(\vec{r}_p^k) N_i(\vec{r}_p^k) : \text{action à distance au nœud } i \text{ au temps } k \quad (45)$$

L'équation de mouvement (41) peut réduire en supprimant le terme $\sum_{i=1}^{N_n} \vec{w}_i^k$:

$$\sum_{j=1}^{N_n} m_{ij}^k \vec{a}_j^k = \vec{f}_i^{\text{int},k} + \vec{f}_i^{\text{ext},k} \quad (46)$$

$$\text{Avec} : \vec{f}_i^{\text{int},k} = -\sum_{p=1}^{Np} M_p \bar{\sigma}_p^{\text{s},k} \cdot \vec{G}_{ip}^k : \text{vecteur de force interne} \quad (47)$$

$$\vec{f}_i^{\text{ext},k} = \vec{b}_i^k + \vec{t}_i^k : \text{vecteur de force externe} \quad (48)$$

$$\vec{G}_{ip}^k = \overrightarrow{\text{grad}} N_i(\vec{r}_p) : \text{gradient de fonction de base à la position } \vec{r}_p^k \quad (49)$$

Pour déterminer les équations de la dynamique, il est nécessaire de rassembler les informations à partir des points matériels. La matrice de masse est établie à l'équation (42), la force interne est accumulée aux nœuds en utilisant la contrainte spécifique aux points matériels et le gradient de la fonction de base nodale (équation 47). La quantité de mouvement est calculée alors :

$$\sum_{j=1}^{Nn} m_{ij}^k \vec{v}_j^k = \sum_{p=1}^{Np} M_p \vec{V}_p^k N_i(\vec{r}_p^k) \quad (50)$$

Avec v_j^k : vitesse au nœud j au pas de temps k
 V_p^k : vitesse au point matériel p au pas de temps k

A ce point, la théorie mécanique de la MPM est illustrée. Cette méthode est justifiée comment pour déterminer les paramètres et les variables du matériau, ainsi que le rôle de la fonction de base nodale dans le calcul. Par ailleurs, le but de cette méthode est de déterminer l'évolution de déformation et de contrainte sous une sollicitation. Il sera présenté dans la partie suivante.

3. Algorithme de la MPM

Après une phase théorique (ci-dessus) de recherche et de compréhension des équations en jeu à résoudre, on commence à détailler l'algorithme qui servira à programmer le modèle.

Pour démontrer l'algorithme de la MPM de façon visuelle, nous présentons d'abord l'algorithme de calcul qui ne consiste qu'un carré de la grille auxiliaire en supposant qu'il entoure quatre points matériels. Le calcul dans une boucle est résumé et représenté dans six étapes qui correspondent aux six petites images ci-dessous (Figure 4)

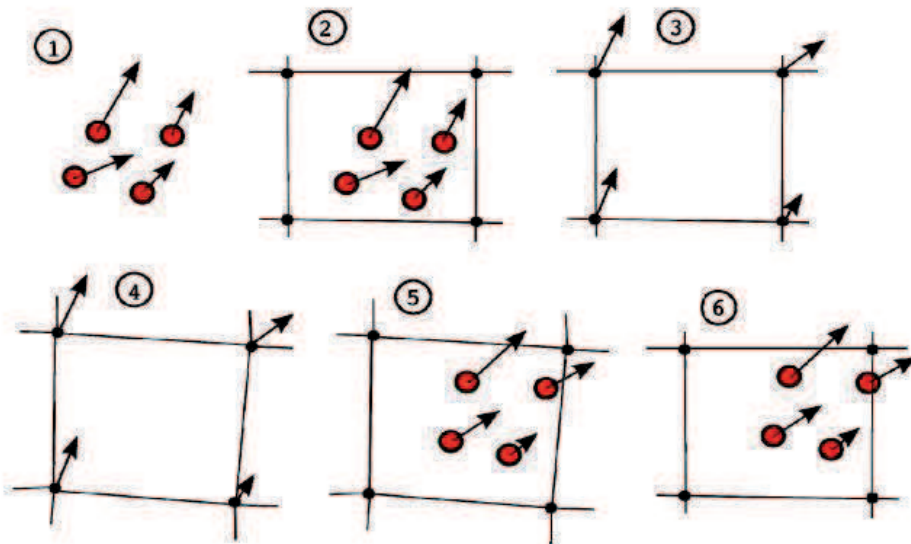


Figure 4: Procédure d'une boucle de la MPM – l'envoi et le renvoi des informations entre les points matériels et les nœuds de la grille auxiliaire [Frank, 2010 adapté de Sulsky, 1994]

Etape 1: Des informations initiales (position, masse, vitesse, accélération, etc.) sont distribués aux points matériels

Etape 2: Une grille auxiliaire est distribuée au système de calcul

Etape 3: Les informations aux points matériels sont envoyées aux nœuds de la grille auxiliaire

Etape 4: Les calculs sont faits aux nœuds de la grille auxiliaire par la méthode des éléments finis

Etape 5: Les résultats de calcul aux nœuds sont renvoyés aux points matériels

Etape 6: La grille auxiliaire est revenue à sa position initiale en laissant les points matériels à ses nouvelles positions.

Dans cette procédure de calcul, la première et la dernière étape (étape 1 et 6) sont réalisées dans l'approche eulérienne, les étapes intermédiaires (de 2 à 5) sont réalisées dans l'approche lagrangienne. On utilise alors l'approche lagrangienne réactualisée dans la méthode MPM.

L'algorithme de calcul complet réalisé sur le matériau entier est présenté en plusieurs étapes ci-dessous :

- Détermination des paramètres de points matériels (position \vec{r}_p , vitesse \vec{v}_p , accélération \vec{a}_p , contrainte $\vec{\sigma}_p$ etc.) (étape 1, Figure 4)

- Distribution de la grille auxiliaire et détermination ses fonctions de base nodales $N_i(\vec{r}_p)$ (étape 2, Figure 4)

- Calcul du vecteur de force interne associé avec les nœuds spatiaux. (étape 3, Figure 4)

$$\vec{f}_i^{\text{int},k} = - \sum_{p=1}^{N_p} M_p \vec{\sigma}_p^{s,k} \cdot \vec{G}_{ip}^k \quad \text{avec} \quad \vec{G}_{ip}^k = \overrightarrow{\text{grad}} N_i(\vec{r}_p^k) \quad (51)$$

- Ajout de la force externe au nœud pour obtenir la force totale au nœud.

$$\vec{f}_i^k = \sum_{j=1}^{N_n} \vec{m}_{ij}^k \vec{a}_j^k = \vec{f}_i^{\text{int},k} + \vec{f}_i^{\text{ext},k} \quad (52)$$

- Obtention des composants de la matrice de masse sur le réseau spatial.

$$\vec{m}_{ij}^k = \sum_{p=1}^{N_p} M_p N_i(\vec{r}_p^k) N_j(\vec{r}_p^k) = \sum_{p=1}^{N_p} M_p S_{ip}^k S_{pj}^k \quad (53)$$

- Masse de nœud est obtenue par la somme des lignes.

$$m_i^k = \sum_{j=1}^{N_n} \vec{m}_{ij}^k \quad \text{ou} \quad m_i^k = \sum_{j=1}^{N_p} M_p S_{pj}^k \quad (54)$$

- Vitesse au nœud de la grille est obtenue à partir des vitesses aux points matériels en prenant la fonction de base nodale

$$\vec{P}_i^k = \sum_{j=1}^{N_n} \vec{m}_{ij}^k \vec{v}_j^k = \sum_{p=1}^{N_p} m_p \vec{V}_p^k N_i(\vec{r}_p^k) \quad (55)$$

Ici : \vec{P}_i^k est la quantité de mouvement au nœud i

\vec{v}^k et \vec{V}^k dénotent la vitesse au nœud et au point matériel à l'étape k

- Grâce à la vitesse déterminée à l'équation (55) en prenant l'accélération déterminée à l'équation (46), la mise à jour à la fin de la phase lagrangienne est réalisée (étape 4, Figure 4):

$$\vec{v}_i^L = \vec{v}_i^k + \Delta t \vec{a}_i^k \quad (56)$$

$$\vec{r}_i^L = \vec{r}_i^k + \Delta t \vec{v}_i^L \quad (57)$$

Avec : l'exposant L décrit le paramètre marqué est à la phase lagrangienne

Δt : l'incrément du temps dans deux étapes ; $\Delta t = t^{k+1} - t^k$.

- A partir des informations nodales, les nouvelles valeurs de vitesse et de position sont renvoyées aux points matériels en utilisant les fonctions de base nodales (étape 5, Figure 4):

$$\vec{V}_p^{kL} = \vec{V}_p^k + \Delta t \sum_{i=1}^{N_n} \vec{a}_i^k N_i(\vec{r}_p^k) \quad (58)$$

$$\vec{r}_p^{kL} = \vec{r}_p^k + \Delta t \sum_{i=1}^{N_n} v_i^k N_i(\vec{r}_p^k) \quad (59)$$

- Incrément de la déformation à la position \vec{r}_p^{kL} est obtenu en utilisant la fonction de base nodale :

$$\Delta \vec{\varepsilon}_p = \frac{\Delta t}{2} \sum_{i=1}^{N_n} [\vec{G}_{ip}^k v_i^k + (\vec{G}_{ip}^k v_i^k)^T] \quad (60)$$

- Tenseur de contrainte à chaque point matériel est ensuite mis à jour en utilisant les équations constitutives [Sulsky, 1995 ; Frank, 2010].

A ce point, les points matériels sont complètement mis à jour. Dans la phase de convection (étape 6, Figure 4), les points matériels sont fixés et la grille de calcul est redéfinie.

Puisque les points matériels ne se déplacent pas au cours de la phase de convection, ils ont alors les mêmes propriétés à la fin de la cette phase comme ils avaient à la fin de la phase lagrangienne.

$$\vec{r}_p^{k+1} = \vec{r}_p^L ; \quad \vec{V}_p^{k+1} = \vec{V}_p^L ; \quad \vec{\varepsilon}_p^{k+1} = \vec{\varepsilon}_p^L ; \quad \vec{\sigma}_p^{k+1} = \vec{\sigma}_p^L \quad (61)$$

On a terminé une boucle de calcul. Une nouvelle boucle sera lancée en prenant les informations portées par les points matériels pour initialiser les valeurs nodales de la grille réinitialisée.

4. Travail réalisé à notre équipe

A présent, un modèle de calcul utilisant la théorie de la MPM est en train d'être développé à l'équipe 3B-LERFoB par Patrick Perré [Perré, 2009 ; Frank, 2010]. Ce modèle est écrit en Fortran afin de gagner le temps de calcul, il permet de réaliser des simulations de compression du matériau bois (imposé par déplacement) jusqu'à la densification. Le résultat obtenu est l'évolution de contrainte en fonction de déformation, présenté ci-dessous (Figure 5)

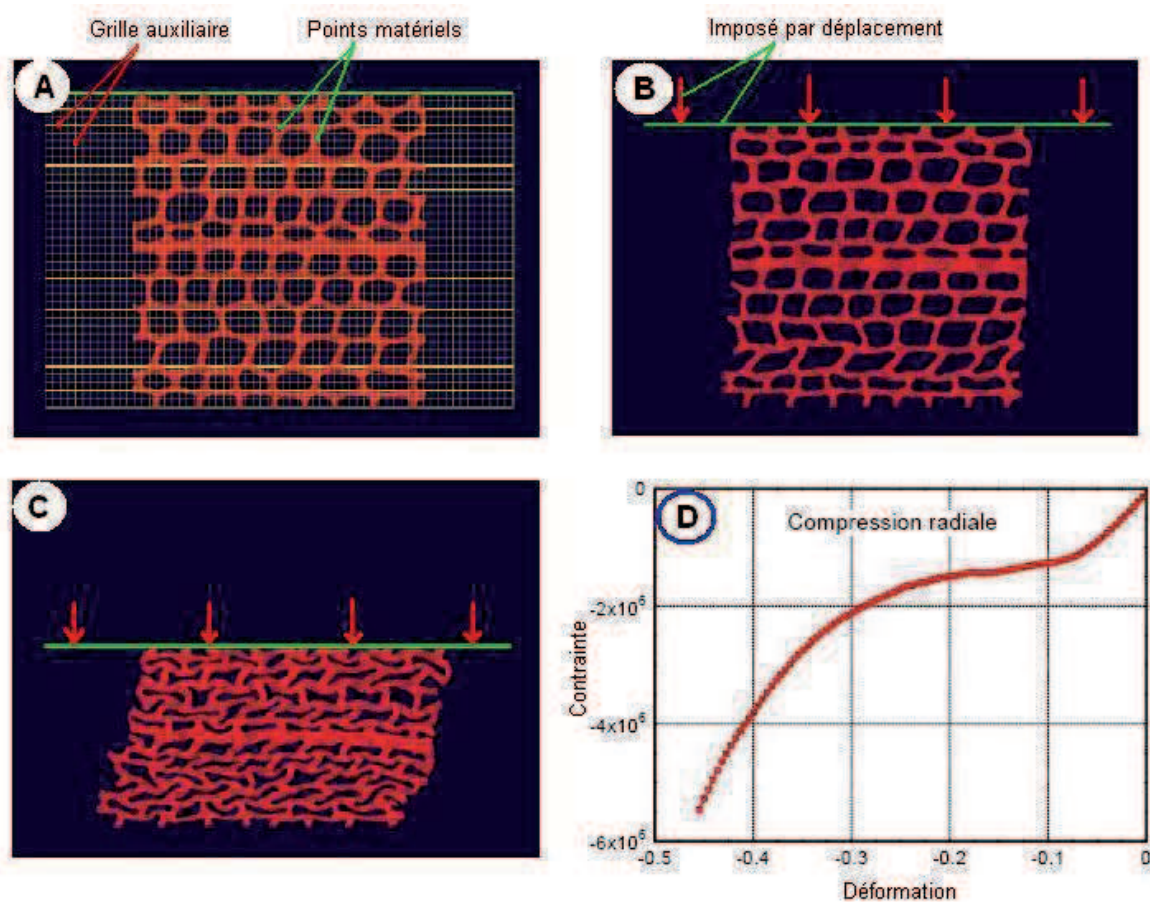


Figure 5: Modélisation de compression de l'épicéa par la MPM, imposé par déplacement: fig. (A), (B) et (C) : compression selon la direction tangentielle jusqu'à la grande déformation et fig. (D) : résultat obtenu dans la simulation de la compression selon la direction radiale [tirée de Perré, 2009]

Dans le préprocessing, le logiciel MeshPore, développé également par Patrick Perré [Perré, 2005 ; 2007], est utilisé pour générer les points matériels à partir d'une image. Tout d'abord, un échantillon bois est passé par microtome afin d'obtenir une surface très propre. Ensuite, son image de l'état de surface à l'échelle des cellules est prise par microscope électronique environnemental à balayage (ESEM) afin de s'assurer qu'elle soit à une haute résolution (voir chapitre 2). Le MeshPore prendra cette image pour créer les contours de cellules tenant compte de son niveau de gris. Enfin, la partie « bois » est divisée en plusieurs « points matériels » (Figure 6). A ce point, nous obtenons un fichier qui est prêt à servir le modèle de calcul présenté précédemment.

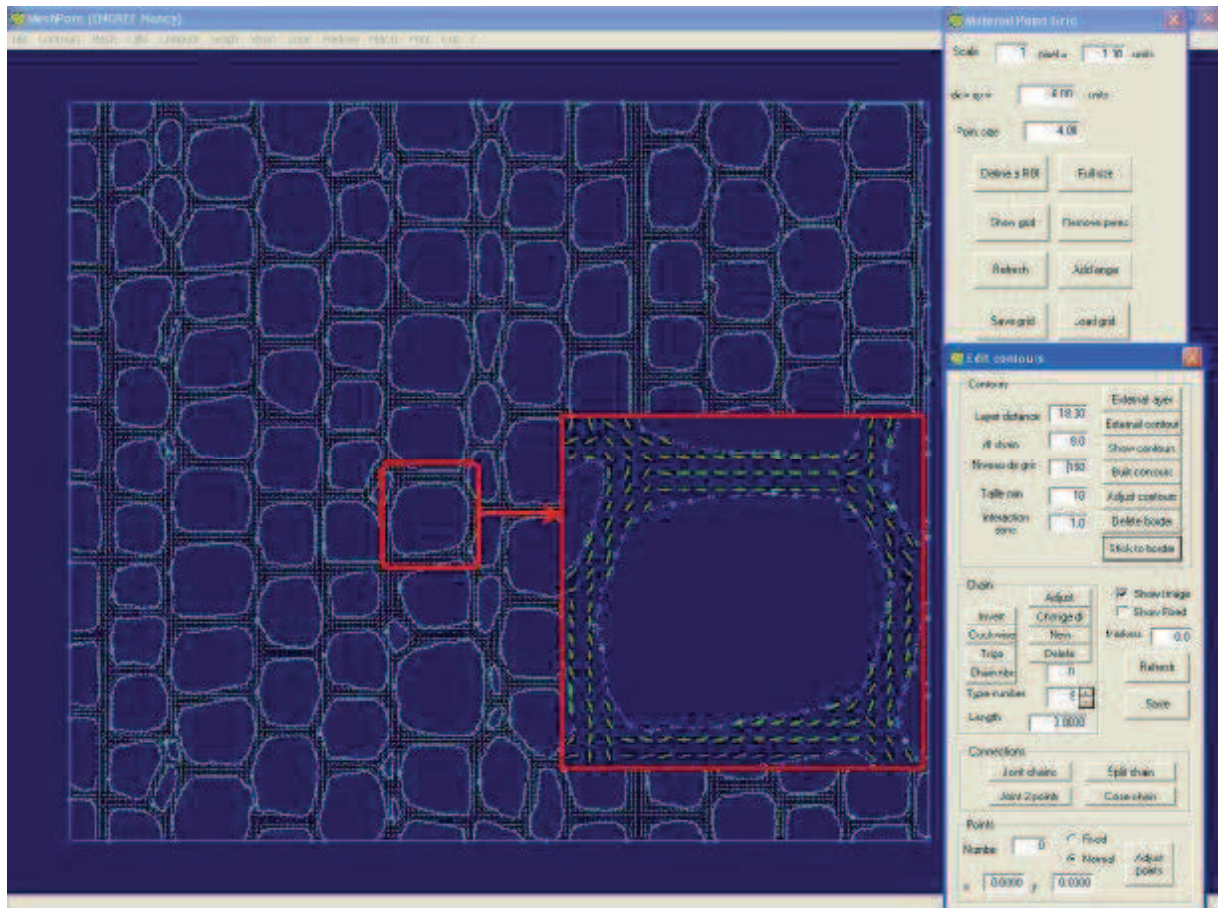


Figure 6 : Modélisation de la coupe transversale de l'épicéa par MeshPore

Malheureusement, nous n'avons pas réussi à réaliser un calcul définitif en raison du manque de temps.

Références:

- Anonymous (1955) – *Wood Handbook* – U.S. Dept. of Agric. Handbook No.72, U.S. Gov. Print. Off.
- Ander P. and Nyholm K. (2000) – *Deformations in wood and spruce pulp fibre: Their importance for wood and pulp properties*, Proc. Int. Symp. on wood machinig, Ed. Stanzl-Tschegg and Reiterer, September 2000, Vienna, Austria, pp 3-19
- Ander P. (2002) – *Dislocations and balloon swelling in spruce kraft pulp fibres – Effect of cellulose, Xylan and Laccase/HTB*, Special issue biotechnol. Pulp paper Ind ., Progr. Biotechnol., Elsevier science
- Armstrong L. D., Kingston R. S. T. (1962) – *Effect of moisture changes on the deformation of wood under stress* – Australia Journal of Applied Science, Vol.13, N°4, p.257-276
- Badel E., Perré P. (1999) - *Détermination des propriétés élastiques d'éléments individuels du plan ligneux du chêne par des essais de traction sur micro-éprouvettes* – Ann. For. Sci. Vol. 65, pp 467-478.
- Bardenhagen S. G., Brackbill J. U., Sulsky D. (2000) – *The materiel point method for granular materials* – Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. – Vol. 187, pp. 529-541
- Bergander A. and Salmen L. (2002) – *Cell wall properties and their effects on the mechanical properties of fibres* – Journal of materials science 37; 151-156
- Bardenhagen S. G., Brydon A. D., Guilkey J. E. (2005) – *Insight into the physics of foams densification via numerical simulation* – Journal of the Mechanical and Physics of solids, Vol. 53, pp. 597-617
- Batoz J-L., Dhatt G. (1990) – *Modélisation des structure par éléments finis-Volume 1 : solides élastiques* – Les presse de l'université Laval
- Bodig J. and Jayne B.A. (1982) – *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold Company.
- Boutelje J. B. (1962) – *The relationship of structure to transverse anisotropy in wood with reference to shrinkage and elasticity* – Holzforschung 16, Nr.2
- Boyd JD (1977) - *Relationship between fiber morphology and shrinkage of wood*. Wood Sci Technol 11:3–22
- Brackbill J. U and Ruppel H.M (1986) - *FLIP: a method for adaptively zoned, Particle in cell calculation of fluid flows in two dimensions* - Journal of computational physic Vol. 65, pp 314-343
- Brackbill J. U, Kothe D. B and Ruppel H. M. (1988) - *FLIP: a low dissipation, particle in cell method for fluid flow* - Computer physics communications Vol. 48, pp 25-38
- Brancheriau L., Bailleres H., Guitard D.: *Comparison between modulus of elasticity values calculated using 3 and 4 point bending tests on wooden sample*. Wood Science and Technology 36 (2002) 367-383

- Centre Technique du bois (C.T.B - 1980) – *Etude du bois des peupliers I 54-51, Fritzi Pauley et F41*. Etude générale CTB R373. Courrier de l'industriel du bois et de l'ameublement.
- Chen Z., Brannon R. (2002) – *An evaluation of the Material Point Method* – Sand report, prepared by Sandia National Laboratories, California – U.S.A
- Clair B. et Thibaut B. (2001) – *Shrinkage of the gelatinous layer of poplar and beech tension wood* – IAWA Journal, Vol. 22(2), pp. 121-131
- Coutand C., Jeronimidis G., Chanson B., Loup C. (2004). *Comparison of mechanical properties of tension and opposite wood in Populus*. Wood Science and Technology 38, 11-28
- Danvind J. (2005) - *Analysis of drying wood based on nondestructive measurements and numerical tools* – Rapport de these – Lulea University of Technology – Sweden
- De La Cruz Sanchez M. (2006) – *Mesure des constantes élastiques du bois d'épinette noire (Picéa mariana (Mill.) B.S.P) dans des conditions d'équilibre du séchage à basse température* – Rapport du DEA – Université Laval – Québec – Canada.
- De Magistris F., Salmén L. (2008) – *Finite element modelling of wood cell deformation transverse to the fibre axis* – Nodric Pulp and Paper Research Journal, Vol. 23, No. 2/2008, pp. 240-246
- Doumalin P. (2000) – *Microextensométrie locale par corrélation d'images numériques: Application aux études micromécaniques par Microscopie Electronique à balayage* – Rapport de thèse – Ecole Polytechnique
- Dubois Frédéric (2004) – *Modélisations numériques des comportements viscoélastiques vieillissants des matériaux du génie civil* – Mémoire de HDR – Université de Limoges
- Easterling K. E., Harrysson R., Gibson L. J., Ashby M. F. (1982) – *On the mechanics of balsa and other wood* – Proc. R. Soc. A 383, 31-41
- Eichhorn S. J. et Young R. J. (2001) – *The Young's modulus of a microcrystalline cellulose* – Cellulose, Vol. 8, pp. 197-207
- Evan M. W., Harlow F. H (1957) – *The particle-in-cell method for hydrodynamic calculation* – Los Alamos Scientific Laboratory report LA-2139.
- 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*, rapport de thèse, ENGREF Nancy
- Farruggia F., Perré P. (2000) – *Microscopic tensile tests in the transverse plane of earlywood and latewood part of spruce* – Wood Science and Technology Vol. 34, pp. 65-82
- Frank X., Perré P. (2010) – *The potential of meshless methods to address physical and mechanical phenomena involved during drying at the pore level* – Drying technology, Vol. 28, pp. 932-943
- Gachet C. (2003) – *Inventaire et hiérarchisation de paramètres structuraux et ultrastructuraux facteurs de variabilité intra spécifique de certaines propriétés mécano physiques des tissus ligneux* – Rapport de thèse – Université de Bordeaux I

- Gaissen A. (1976) – *The effect of temperature and moisture content on the elastic and strength properties of wood in the freezing range.* (In German.) Ph.D. Diss., Dept. Biol., Univ. Hamburg
- Gibson L. J. and Ashby M. F. (1997) – *Cellular solids: structure and properties* – second edition – Cambridge University Press
- Gillis P. (1972) – *Orthotropic Elastic Constants of Wood* – Wood Science and Technology – Vol. 6, pp. 138-156
- Gril Joseph (1988) – *Une modélisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure* – Rapport de these – Ecole Polytechnique, Université Paris VI
- Grosser D. (1977) – *Die Hölzer Mitteleuropas.* Springer Veglas, 208p
- Grossmann. P. U. A (1976) – *Requirements for a model that exhibits mechano-sorptive behaviour* – Wood sci. Technol. 10 – pp. 163-168.
- Guitard D. (1987) – *Mécanique du matériau bois et composites.* Cepadues, Collection Nabla
- Guitard D. et Fournier M. (1994) – *Comportement mécanique du bois - Le bois, matériau d'ingénierie* – Textes rassemblés par Philippe Jodin – A.R.BO.LOR.
- Hapca A. I. (2004) - *Distribution du bois de compression dans l'arbre en relation avec sa forme externe. Application à l'Epicéa commun (Picea Abies Karst)* – Rapport de thèse – Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois UMR INRA-ENGREF Nancy
- Hardy B. J. (1996) – *Molecular dynamics simulations and diffraction-based analysis of the native cellulose fibre: structural modelling of the I- α et I- β phases and their interconversion* – Polymer, Vol. 37 No. 10, pp. 1833-1839
- Harlow F. H. (1963) – *The particle- in- cell method for numerical solution of problems in fluid dynamics* – Proc. Symp. Appl. Math. – Vol. 15, pp. 269
- Harlow F. H. (2004) – *Fluid dynamics in group T-3 Los Alamos National Laboratory (LA-UR-03-3852)* – Journal of computational physics – Vol. 195, pp. 414-433
- Hearmon, R. F. S - *The elasticity of wood and plywood* - Dept. Sci. and Indust. Res., For. Prod. Res., Spec. Rept. No. 7. HMSO, London, 1948
- Heine A. P., Teleman O. (1996) – *Structural reporter parameters for the characterisation of crystalline cellulose* – Pure & Appl. Chem., Vol. 68, No. 11, pp.2187-2192
- Holmberg S., Persson K., Petersson H. (1999) - *Nonlinear mechanical behaviour and analysis of wood and fibre materials.* Computers and Structures 72 - pp.459-480
- Huber F., (1991) – *Modélisation de l'infradensité du bois en fonction de la largeur de cerne et de l'âge médullaire chez les chênes indigènes (Quercus robur L. et Quercus petraea Liebl.).* Annexe au Compte-Rendu final du contrat CEE « Genetics and Breeding of Oaks », Station de Recherches sur la Qualité des Bois, CRF-INRA, Champeboux, 21p
- Husson J. M. (2009) – *Loi de comportement viscoélastique avec effet mémoire application à la mécanosorption dans le bois* – Rapport de thèse – Université de Limoges.
- Keller R. (1994) – *La constitution du bois - Le bois, matériau d'ingénierie,* Textes rassemblés par Philippe Jodin - A.R.BO.LOR. – ENGREF Nancy

Kollmann; Côté (1984) – *Principles of wood science and technology – Volume I: Solid Wood*, Springer- Verlag

Koponen S., Toratti T., Kanerva P. (1989) - *Modelling longitudinal elastic and shrinkage properties of wood* – Wood Sci. Technol. 23: 55-63

Lahbabi R. (1995) - *Mesure par analyse d'image de paramètres microscopiques requis pour une prédiction déterministe des propriétés du bois* – Rapport de thèse – ENGREF Nancy

Marchal R. ; Berthelot A. ; Reuling D. ; Aleon D. ; El Haouzali H. ; Paillassa E. (2009) - *Référentiel qualités du bois des cultivars de peuplier* – Forêt Privée Française ; FCBA ; Arts et Métiers ParisTech de Cluny ; Chambre Syndicale du Peuplier de France

Marhofer RJ, Reiling S, Brickmann J. (1996) - *Computer simulations of crystal structure and elastic properties of cellulose*. Ber. Bunsenges. Phys. Chem., Vol. 100, pp. 1350–1354.

McCullogh R. L., Wu C. T., Seferis J. C., Lindenmeyer P. H. (1976) – *Predictions of limiting mechanical performance for anisotropic crystalline polymers*. Polym. Eng. Sci., Vol. 16, pp. 371-387

Meguid S. A., Cheon S. S., El-Abbasi N. (2002) – *FE modelling of deformation localization in metallic foams* – Finite Elements in Analysis and Design 38; pp. 631-643

Moutee Mohssine (2006) – *Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage* – Rapport de thèse – Université Laval - Canada

Nairn J. A. (2006) – *Numerical simulations of transverse compression and densification in wood* – Wood and Fiber Science – Vol. 38, Issue 4, pp. 576-591

Nairn J. A. (2007) – *Material point method simulations of transverse fracture in wood with realistic morphologies* – Holzforschung – Vol. 61, Issue 4, pp. 375-381

Navi P. (1988) – *Three dimensional analysis of wood microstructural influences on wood elastic properties*. In proceedings of the 1988 international conference on timber engineering, Seattle, pp. 411-429

Navi P.; Heger F. (2005) – *Comportement thermo-hydromécanique du bois*. Presses polytechniques et universitaires romandes, CH – 1015 Lausanne

Nepveu G. (1994) – *Variabilité – Le bois, matériau d'ingénierie* – Textes rassemblés par Philippe Jodin – A.R.BO.LOR.

Nishiguchi A., Yabe T. (1983) – *Second- order fluid particle scheme* – Journal of Computational Physics – Vol. 52, Issue 2, pp. 390-413

Norimoto M., Hayashi S., Yamada T. (1978) – *Anisotropy of dielectric constant in coniferous wood* – Holzforschung 32 (5), 167-172

Okuyama T.; Yamamoto H.; Iguchi M.; Yoshida M. (1990) - *Generation process of growth stresses in cell walls. II. Growth stress in tension wood*. Mokuzai Gakkaishi 36:797–803

O'Sullivan A. C. (1997) – *Cellulose: the structure slowly unravels* – Cellulose, Vol. 4, pp. 173-207

Oudjene M., Khlifia M. (2009) – *Finite element modelling of wooden structures at large deformations and brittle failure prediction* – Materials and Design, Vol. 30, pp. 4081-4087

Outahyon A., (2008) – *Influences de paramètres d'usinage et de stockage sur les propriétés fonctionnelles des surfaces de bois de Douglas* – Rapport de thèse – ENSAM de Cluny

Perré P. (1987) – *Le séchage convectif de bois résineux : Choix, validation et utilisation d'un modèle* – Rapport de thèse – Université Paris VII

Perré P. (1994) – *Le séchage du bois – Le bois, matériau d'ingénierie*. Textes rassemblés par Philippe Jodin - A.R.BO.LOR. – ENGREF Nancy

Perré P. (2005) - *Meshpore: A Software Able to Apply Image- Based Meshing Techniques to anisotropic and Heterogeneous Porous Media* – Drying Technology, Vol. 23, pp. 1993-2006

Perré P., Huber F. (2007) - *Measurement of free shrinkage at the tissue level using an optical microscope with an immersion objective: results obtained for Douglas fir (Pseudotsuga menziesii) and spruce (Picea abies)* – Ann. For. Sci. Vol. 64, pp 255-265

Perré P., Frank X. (2009) – *Modélisation par MPM du comportement de l'agencement cellulaire du bois en grandes déformations* – Congrès Français de Mécanique, 24-28 août 2009

Placet V. (2006) – *Conception et exploitation d'un dispositif expérimental innovant pour la caractérisation du comportement viscoélastique et de la dégradation thermique du bois dans des conditions sévères* – Rapport de thèse – Université de Henri Poincaré, Nancy I.

Pluvinage G. (1992). La rupture du bois et de ses composites. Cépaudès Editions. Toulouse. 319 p.

Randriambolona H. (2003) – *Modélisation du comportement différé du bois en environnement variable* – Rapport de thèse – Université de Limoges.

Ressel J. B. (2007) – *Wood anatomy - an introduction – Fundamental of wood drying* – Edited by Patrick Perré – European COST - A.R.BO.LOR.

Ruelle J., Yamamoto H., Thibaut B. (2007) – Growth stresses and cellulose structural parameters in tension and normal wood from three tropical rainforest angiosperm species- BioResources Vol. 2, pp. 235-251

Sakudara I., Nukushina Y, Ito T. (1962) - *Experimental determination of the elastic modulus of crystalline regions of oriented polymers*. Journal of polymer science, Vol. 57, pp.651–660.

Samarasinghe S., Kulasiri D. (2004) - *Stress Intensity Factor of Wood from Crack-Tip Displacement Fields Obtained from Digital Image Processing* – Sylva Fennica, Vol. 38, pp. 267-278

Sano E. (1961) - *Effects of temperature on the mechanical propertie of wood. I. Compression parallel to grain*. (In Japanese.) J. Japan Wood Res. Soc. 7(4) : 147-150

Scurfield and Waldrop (1962) – *The nature of reaction wood VI. The reaction anatomy of seedlings of woody perennials*. Australian J. Bot. 10: 93-105

Siau J. F. (1995) – *Wood: Influence of moisture on physical properties* – Department of Wood Science and Forest Products Virginia Tech - USA

Simon P. (2009) – *Approche multiéchelle du comportement mécanique du bois dans le plan transverse* – Rapport de thèse – I.N.S.A de Lyon

Skaar C. (1988) – *Wood-water relation* – Springer Verglas

Sulsky D.; Zhou S. J.; Schreyer H. L. (1995) – *Application of a Particle-In-Cell method to solid mechanics*. Computer physics communications. Vol. 87, N° 1, pp 236-252

Sun Z., Lyons J. S., McNeill S. R. (1997) – *Measuring microscopic deformations with digital image correlation* – Optics and Lasers in Engineering, Vol. 27, pp. 409-428

Sheng Du' and Yamamoto F. (2007) - *An overview of the biology of reaction wood formation*. Journal of Integrative Plant Biology, 49 (2): 131-143

Taiz L., Zeiger E. (2002) – *Plant Physiology, Third Edition* – Sinauer Associates.

Thibaut B., Gril J., Fournier M. (2001) – *Mechanics of wood and trees : some new highlights for an old story* – C. R. Acad. Sci. Paris, t. 329, Série II b, p. 701-716

Tsai S. W. (1988) – *Composite design*. Think Composites, USA

Venet J. (1986) - *Identification et classement des bois français* – Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts – 14 rue Girardet 54042 Nancy

Viéville P., Guitard D. (1996) - *Simulation numérique des liaisons microstructure-anisotropie du matériau bois à ses différentes échelles* – Ann. Sci. For. Vol. 53, pp 1137-1151

Watanabe U., Norimoto M., Ohgama T., Fujita M. (1999) – *Tangential Young's modulus of coniferous early wood investigated using cell models* – Holzforschung Vol. 53, pp. 209-214

Watanabe U., Fujita M., Norimoto M. (2002): *Transverse Young's Moduli and Cell Shapes in Coniferous Early Wood*. Holzforschung 56, pp. 1-6

Wengert G., Meyer D. (2002) – Woodweb :

www.woodweb.com/knowledge_base_images/zp/warp_68-1.gif (22.08.2002)

Yamamoto H.; Okuyama T.; Sugiyama K., Yoshida M. (1992) - *Generation process of growth stresses in cell walls. IV. Action of the cellulose microfibrils upon the generation of the tensile stresses*. Mokuzai Gakkaishi 38:107–113

Yamamoto H. (2004) - *Role of the gelatinous layer on the origin of the physical properties of the tension wood*. J Wood Sci 50:197–208

Yamamoto H.; Abe K.; Arakawa Y.; Okuyama T.; Gril J. (2005) - *Role of the gelatinous layer (G-layer) on the origin of the physical properties of the tension wood of Acer sieboldianum*. J Wood Sci 51:222–233

York AR., Sulsky D., Schreyer HL. (1999) – *The material point method for simulation of thin membranes* – International journal for numerical methods in engineering – Vol. 44, Issue 10, pp. 1429-1456

Youssef S., Maire E., Gaertner R. (2004) – *Finite element modelling of the actual structure of cellular materials determined by X-ray tomography* – Acta Materialia 53; pp. 719-730

Zhou S. (1998) – *The numerical prediction of material failure based on the material point method* – Rapport de these – University of New Mexico – USA

Zhu H. X., Mills N. J., Knott J. F. (1997) – *Analysis of the high strain compression of open-cell foams* – J. Mech. Phys. Solids, Vol. 45, No. 11/12, pp. 1875-1904