



HAL
open science

Inventaire et hiérarchisation de paramètres structuraux facteurs de variabilité intraspécifique de certaines propriétés mécano physiques des tissus ligneux

Christophe Gachet

► **To cite this version:**

Christophe Gachet. Inventaire et hiérarchisation de paramètres structuraux facteurs de variabilité intraspécifique de certaines propriétés mécano physiques des tissus ligneux. Mécanique [physics.med-ph]. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2003. Français. NNT : . tel-00007161

HAL Id: tel-00007161

<https://theses.hal.science/tel-00007161>

Submitted on 19 Oct 2004

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.

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

par

Christophe GACHET

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : SCIENCES DU BOIS

**INVENTAIRE ET HIÉRARCHISATION DE PARAMÈTRES STRUCTURAUX ET
ULTRASTRUCTURAUX FACTEURS DE VARIABILITÉ INTRA SPÉCIFIQUE
DE CERTAINES PROPRIÉTÉS MÉCANO PHYSIQUES
DES TISSUS LIGNEUX**

Soutenue le 16 décembre 2003

Après avis de :

MM. B. CHARRIER, Maître de Conférences, HDR- IUT de PAU et des Pays de l'Adour
J. GRIL, Directeur de Recherche CNRS-LMGC, Montpellier

Rapporteurs

Devant la commission d'examen formée de :

MM. B. DE JESO, Professeur-LCSV, Institut du Pin, Univ. Bordeaux I
J.R. PUIGGALI, Professeur-LEPT-ENSAM, Univ. Bordeaux I
B. CHARRIER, Maître de Conférences, HDR-IUT de PAU et des Pays de l'Adour
J. GRIL, Directeur de Recherche CNRS-LMGC, Montpellier
D. GUITARD, Professeur-LEPT-ENSAM, Univ. Bordeaux I
A. ZOULALIAN, Professeur-LERMAB, Univ. Nancy 1

**Président
Rapporteur**

Examineurs

Ce travail a été réalisé au Laboratoire Energétique et Phénomènes de Transferts, unité mixte de recherche associée au CNRS, à l'Université de Bordeaux 1 et à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers; il a été soutenu par un financement du Ministère de l'Education Nationale de la Recherche et des Technologies.

Je souhaite tout d'abord remercier sincèrement Monsieur le Professeur Bernard De Jeso pour avoir accepté de présider mon jury de thèse.

C'est un grand honneur que m'ont fait Messieurs Bertrand Charrier, Maître de Conférences, Joseph Gril, Directeur de Recherche au CNRS et André Zoulalian, Professeur, en s'intéressant à mes travaux de recherche et en acceptant de les rapporter.

Tout au long de ce travail, les conseils avisés de Monsieur Joseph Gril, Directeur de Recherche au CNRS, m'ont permis d'appréhender toute la complexité du comportement rhéologique du matériau bois.

Je voudrais tout particulièrement remercier Monsieur Jean Rodolphe Puiggali, Professeur et Directeur du LEPT - ENSAM pour ses remarques, ses conseils avisés comme pour son soutien indéfectible.

Monsieur Daniel Guitard, Professeur et Directeur de Thèse a eu la lourde tâche d'initier (ou de re-initier) aux rudiments de la Mécanique des Solides et de la Résistance des Matériaux, un physico chimiste de formation. Qu'il en soit ici sincèrement remercié ; la mission n'ayant pas toujours été facile. Durant ces trois années j'ai pu également bénéficier de son expérience à l'origine de nombreuses discussions particulièrement enrichissantes.

L'équipe du CIRAD Forêt de Montpellier a mis à ma disposition de nombreux moyens expérimentaux et a su me consacrer une partie de son temps, ô combien précieux ; je tiens donc ici à remercier Anne et Bernard Thibaut ainsi que Gilles Calcheras. Votre aide a été plus qu'appréciable.

Monsieur Philippe Rozenberg, Chargé de Recherches INRA (station d'Olivet), a su m'orienter et me guider dans le domaine bien spécifique des études microdensitométriques.

Enfin, je désire remercier les miens, Béa, mes Parents et Valérie pour leur réconfort permanent.

TABLE DES MATIERES

Introduction	3
1 Inventaire des facteurs essentiels de la variabilité intra arbre des propriétés mécaniques des tissus ligneux	5
1.1 La cellule ligneuse	5
1.1.1 Description cytologique sommaire de la cellule ligneuse dite de « bois normal ».....	5
1.2 Des macromolécules au comportement mécanique de la paroi cellulaire	6
1.2.1 Les polymères fondamentaux de la paroi cellulaire	6
1.2.2 Les microfibrilles de cellulose : des éléments essentiels de renfort pariétal	7
1.2.3 La matrice ligno-cellulosique.....	12
1.2.4 L'angle des microfibrilles dans la sous couche S ₂ : un paramètre micromécanique primordial	14
1.2.5 Prise en compte du caractère multicouche de la paroi cellulaire.....	17
1.2.6 Description du comportement mécanique de sous couche	18
1.2.7 La double cloison, un passage obligé vers le tissu ligneux	18
1.3 L'anisotropie élastique à l'échelle du tissu ligneux	22
1.3.1 La morphologie cellulaire.....	23
1.4 Facteurs explicatifs de l'anisotropie élastique à l'échelle du cerne de croissance.....	26
1.4.1 Le cerne assimilé à un bicouche.....	26
1.4.2 Le rayon ligneux : un élément de renfort radial	27
1.5 Conclusion	29
2 Modèles multi échelles et construction du Résineux Standard Virtuel (RSV).....	30
2.1 Modèles multi échelles retenus pour décrire l'anisotropie élastique du bois de résineux	30
2.1.1 Le concept de modélisation multi échelles.....	30
2.1.2 Modèles à parois cellulaires multicouche (Multicouche).....	30
2.1.3 Modèle à squelette de microfibrilles (Squelette).....	40
2.1.4 Nombre total de paramètres structuraux retenus	41
2.2 Construction du Résineux Standard Virtuel.....	45
2.2.1 Validation des modèles prévisionnels de l'anisotropie élastique	45
2.2.2 Résultats et discussions	46
2.2.3 Situation des paramètres du modèle RSV vis-à-vis de ceux de trois essences résineuses ..	54
2.3 Conclusion	59
3 Hiérarchisation des paramètres descriptifs de l'anisotropie élastique du bois normal	63
3.1 La porosité, facteur de l'anisotropie élastique du réseau cellulaire nid d'abeille	63
3.1.1 Comparaison au modèle de Gibson <i>et al</i> et influence de l'élément de paroi fléchie	66
3.1.2 Conclusion.....	69
3.2 Hétérogénéité tissulaire et anisotropie élastique du bois normal	69
3.2.1 Différence de morphologie cellulaire entre le bois initial et le bois final	70
3.2.2 Distinction densitométrique entre le bois initial et le bois final	72
3.2.3 La texture, facteur d'anisotropie élastique dans le plan transverse.....	73
3.3 Rôle des rayons ligneux dans l'anisotropie élastique du cerne.....	82
3.4 Influence des paramètres ultrastructuraux sur l'anisotropie élastique tissulaire.....	83
3.4.1 Sensibilité de l'anisotropie tissulaire L/T à l'angle des microfibrilles	83
3.4.2 Incidence du module d'élasticité des microfibrilles	86
3.4.3 Influence du module élastique de la matrice	86
3.4.4 Anisotropie tissulaire L/T d'un bois normal imputable à l'AMF dans S ₂	89

3.4.5	Conclusion.....	91
3.5	Différences et complémentarités entre les modélisations Multicouches et Squelette.....	91
3.5.1	Paramètres d'entrées des modélisations confrontées.....	91
3.6	Valeurs de modules élastiques de double paroi présentés dans la littérature.....	92
3.6.1	Choix des valeurs cibles.....	93
3.7	Propriétés élastiques prévues par les différentes modélisations.....	93
3.7.1	Le bicouche M1.....	94
3.7.2	Le multicouche M2.....	95
3.7.3	Modules élastiques de double paroi virtuelle obtenus via le modèle M3.....	96
3.7.4	Degrés d'anisotropie pariétale.....	98
3.8	Comportement en flexion torsion du stratifié pariétal.....	98
3.8.1	Influence d'une modification de l'épaisseur de S_1	99
3.8.2	Influence de l'angle des microfibrilles.....	99
3.9	Conclusion.....	100
4	Vers une description de l'anisotropie élastique du bois de réaction.....	101
4.1	Existence de plusieurs bois de compression.....	101
4.1.1	Description sommaire des caractères anatomiques généraux du bois de compression.....	101
4.2	Etude expérimentale.....	103
4.2.1	Mise en œuvre de l'étude.....	103
4.2.2	Synthèses des différents résultats.....	111
4.2.3	Influence de modifications anatomiques sur les caractéristiques élastiques prédites.....	124
4.2.4	Conclusion.....	129
5	Conclusion et perspectives.....	130

Introduction

Depuis longtemps (tels Carrington en 1922, Kollmann *et al* en 1941 et 1960 rapportés dans Kollmann et Coté, 1984), ou plus récemment (Bodig, 1984, Guitard *et al*, 1987), de nombreux auteurs, se sont préoccupés d'analyser et même de modéliser l'influence de paramètres physiques tels que la masse volumique, le taux d'humidité, ou encore la température sur les propriétés élastiques du matériau bois.

Des modèles prévisionnels des caractéristiques élastiques anisotropes (Guitard *et al*, 1987), s'appuyant sur des indicateurs tels que la nature feuillue ou résineuse de l'essence considérée, la masse volumique, le taux d'humidité et la température ont ainsi démontré leur pertinence quand à l'évaluation, à priori, des constantes élastiques anisotropes ou des coefficients de retraits hydriques (Presioza *et al*, 1986).

Plus de quatre vingt pour cent de la variabilité inter spécifique, et même intra spécifique, de ces propriétés technologiques du bois normal sont ainsi largement expliqués par ces seuls indicateurs.

Les modèles précités, très certainement efficaces pour élucider la variabilité inter spécifique des modules élastiques et des retraits pour le bois « normal », sont pourtant mis en défaut pour décrire la variabilité intra arbre de ces mêmes caractéristiques mécano physiques. Tout au long de sa croissance, outre le bois dit « normal », l'arbre élabore en effet une grande variété de tissus ligneux (bois juvénile, bois adulte, bois initial, bois final, bois de réaction, bois duraminisé), ceci en réponse à des impératifs de développement de la plante, notamment en réaction à des stimuli extérieurs variés (gravitropiques, héliotropiques, climatiques, attaques fongiques ou d'insectes).

Cette diversité tissulaire, s'exprimant tant au niveau de la macrostructure (moelle excentrée, largeur de cernes, texture, duramen) que de la structure cellulaire (formes et diamètres des cellules, épaisseurs de paroi, présence d'une sous couche gélatineuse) voire de l'ultra structure (nature des bio polymères, angle des microfibrilles, taux de cristallinité de la cellulose) peut donc être considérée à l'origine du caractère hétérogène et fortement variable du matériau.

La plupart des propriétés mécano physiques observées à l'échelle du bois massif (échelle macroscopique) résulte donc d'une imbrication à priori étroite de plusieurs niveaux d'hétérogénéité : échelle supramoléculaire (microfibrilles de cellulose, polymères amorphes), échelle pariétale (orientation des microfibrilles dans les sous-couches), échelle de la cellule (morphologie cellulaire), échelle du tissu ligneux (différenciation en bois initial / final) et échelle du cerne d'accroissement (présence de rayons ligneux).

De façon quasi systématique, la sensibilité de l'anisotropie élastique transverse macroscopique (caractérisée par le rapport des modules d'élasticité radial et tangentiel) α , de fait, souvent (et « naturellement ») été analysée par l'anisotropie de la paroi cellulaire, par la géométrie cellulaire, par l'agencement cellulaire (en quinconce, aligné,...) ou encore par la présence de rayons ligneux.

L'objectif de ce travail, limité au seul cas des résineux, est donc, à travers une étude transversale pluridisciplinaire (cytologie, anatomie, mécanique des composites), d'énumérer et de

hiérarchiser, les paramètres les plus pertinents susceptibles de conditionner l'anisotropie élastique du bois normal aux différentes échelles d'observations.

In fine, il s'agit, par un cheminement plus déterministe que statistique, d'établir un jeu de paramètres strictement utiles, capables, de par les intervalles de variations qu'une étude documentaire leur assigne, de rendre compte de la variabilité intra arbre des propriétés mécano physiques du bois normal des résineux.

Cette démarche s'appuie en particulier sur l'exploitation de modèles explicatifs proposés par différents auteurs et sur leur confrontation éventuelle à des jeux de données expérimentales.

1 Inventaire des facteurs essentiels de la variabilité intra arbre des propriétés mécaniques des tissus ligneux

Les différents niveaux de description et d'hétérogénéité de la matière ligneuse sont ici successivement explorés, depuis l'ultrastructure moléculaire, jusqu'à la macrostructure du bois massif sans défaut, dans une perspective mécanicienne. Les éléments bibliographiques essentiels sont évoqués en appui des choix qui sont, in fine, retenus, dans l'objectif d'alimenter une succession de modèles micro-macro (non nécessairement les plus sophistiqués) explicatifs et descriptifs du comportement élastique anisotrope du bois massif. Quelques indications succinctes de la variabilité des paramètres susceptibles de conditionner l'anisotropie élastique sont également précisées.

1.1 La cellule ligneuse

1.1.1 Description cytologique sommaire de la cellule ligneuse dite de « bois normal »

Une fois différenciée, la cellule ligneuse présente plusieurs parois (couches) constitutives, inégales en proportion. Une description des couches externes vers les couches cellulaires plus internes permet de distinguer :

- une couche intercellulaire qui joue le rôle d'un ciment entre deux cellules mitoyennes,
- une paroi primaire tapissant la couche précédente,
- une paroi secondaire se déposant sur la paroi primaire.

La paroi secondaire, par sa structure et son volume, constitue la partie de la cellule ligneuse la plus résistante mécaniquement.

Les études cytologiques classiques distinguent au sein de cette paroi secondaire trois sous couches superposées, appelées S_1 , S_2 , et S_3 , se déposant successivement au cours de la maturation, (Dunning, 1968), et se singularisant, non seulement par leur dimension et par leur composition chimique (proportion de macromolécules), mais aussi par l'inclinaison des microfibrilles par rapport au grand axe cellulaire (angle des microfibrilles noté AMF, Figure 1.1).

La sous couche externe S_1 , formation intermédiaire entre la paroi primaire et les sous couches plus internes de la paroi secondaire, présente une structure lamellaire (3 à 6 lamelles). Dans cette sous couche, qui représente entre 5 et 10% de l'épaisseur totale de la paroi cellulaire (soit au maximum $0.35 \mu\text{m}$, d'après Keller, 1999), l'inclinaison des microfibrilles de cellulose est de l'ordre de 60 à 80 degrés. Le renfort cellulosique de cette sous couche est constitué de deux enroulements de microfibrilles croisés et superposés (treillis de fibres).

La sous couche centrale S_2 (75 à 85% de l'épaisseur totale et au maximum $10 \mu\text{m}$ d'après Keller, 1999) est formée d'une organisation nettement plus dense de lamelles de microfibrilles de cellulose, quasi parallèles et inclinées d'au minimum 5 degrés chez les résineux. Comparativement aux autres sous couches, c'est au sein de S_2 que l'angle des microfibrilles varie le plus selon le « type » de bois observé (bois initial et final, constitutifs du bois normal, mais aussi bois juvénile ou encore bois de compression). La valeur maximale de cet angle des microfibrilles est assez variable ; nous envisagerons ici, dans le cadre d'un bois dit « normal », et comme de nombreux auteurs mécaniciens (Mark, 1967, 1980, Barrett, 1973,

Koponen *et al*, 1989, Navi *et al*, 1995), une valeur maximale de 40 degrés attribuée à la sous couche S₂ du bois initial ou à celle des rayons ligneux.

Composante essentielle de la paroi secondaire, la sous couche S₂ est considérée (Mark, 1967, 1980, Barrett, 1973, Gillis, 1972, Bodig *et al*, 1982, Norimoto, 1986 dans Gril, 1987) comme principale responsable du comportement mécanique global de la cellule ligneuse de bois normal.

La sous couche interne S₃, relativement mince (entre 0,5 et 1,10µm), possède également une structure en lamelle mais les microfibrilles sont moins strictement parallèles entre elles que dans S₂. L'inclinaison des microfibrilles y est de l'ordre de 60 à 90 degrés d'après Kollman *et al* (1984).

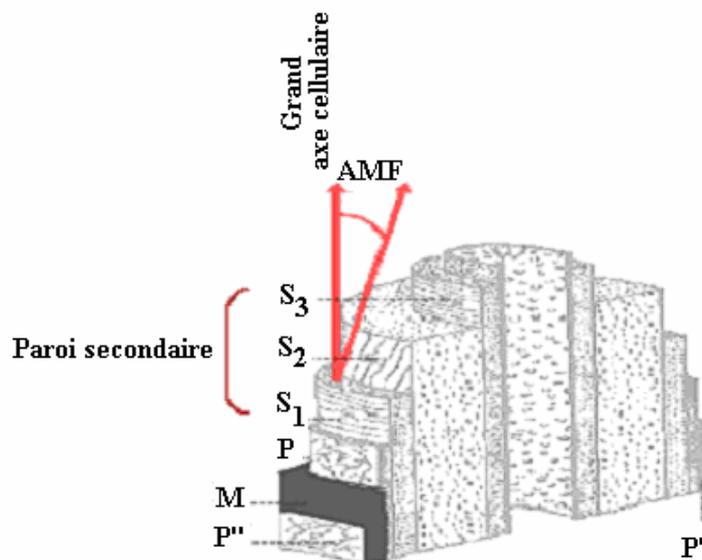


Figure 1.1 Vue schématique d'une paroi cellulaire typique d'une trachéide de conifère, tiré et adapté de Siau (1984)

- P : paroi primaire, P', P'' paroi primaire de cellules adjacentes
- M : lamelle moyenne
- S₁ : sous couche externe de la paroi secondaire
- S₂ : sous couche centrale de la paroi secondaire
- S₃ : sous couche interne de la paroi secondaire

1.2 Des macromolécules au comportement mécanique de la paroi cellulaire

1.2.1 Les polymères fondamentaux de la paroi cellulaire

La matière constitutive de la paroi de la cellule ligneuse est généralement assimilée à un mélange de macromolécules de plusieurs bio polymères, pour l'essentiel de la lignine (ou plutôt des lignines), des hémicelluloses et de la cellulose. De récents travaux ont montré qu'il n'existe pas réellement de différence significative au niveau de la composition chimique massique entre les conifères et les feuillus (Tsoumis, 1991 sur 153 espèces de zones tempérées). La proportion de cellulose est, de plus, remarquablement uniforme dans les deux « catégories » d'essences (Chow, 1946).

La teneur en macromolécules des sous couches constitutives de la paroi cellulaire (comme celle de la paroi dans son ensemble) étant connue depuis longtemps, la plupart des mécaniciens du bois (Barrett, 1973, Cave, 1975, Mark, 1980, Bodig *et al*, 1982, Kollmann *et*

al, 1984, Guitard, 1987) adoptent des valeurs comparables quand à la proportion des polymères essentiels de la paroi.

1.2.1.1 Les substances cristallines

De par sa structure, la cellulose, offre de nombreuses possibilités de liaisons inter et intra moléculaires (son Degré de Polymérisation peut aller jusqu'à 10000). Cet homopolymère linéaire, fondamental du point de vue du comportement mécanique, représente de 40 à 45 % de la masse de la matière ligneuse (Kollmann *et al*, 1984).

Dans la cellule de bois, la cellulose I, forme native de la cellulose, est majoritaire. Ce composé, fortement cristallin, est généralement présent sous la forme d'un mélange de deux isomères ; la forme triclinique (cellulose α) et la forme monoclinique (cellulose β). Si la proportion de chaque isomère est fortement dépendante de l'espèce, la forme monoclinique demeure néanmoins majoritaire dans la cellule ligneuse (VanderHart *et al*, 1984). La cellulose I est avant tout le constituant essentiel des microfibrilles qui confèrent à la fibre sa rigidité. Pour rendre compte de la proportion de ce renfort filamentaire cellulosique dans la paroi cellulaire, la fraction volumique en microfibrilles est généralement considérée par les mécaniciens comme un paramètre descriptif suffisant.

1.2.1.2 Les substances amorphes

Les hémicelluloses (représentant de 7 à 15% en masse) sont quant à eux des polymères à chaînes plus courtes présentant un Degré de Polymérisation moyen compris entre 50 et 300. Ces polysaccharides ramifiés forment, avec les lignines polyphénoliques réticulées (24 à 36% en masse), une matrice amorphe, thermo et hygro sensible, autour de structures cristallines appelées microfibrilles. Contrairement à la cellulose, les structures et proportions des hémicelluloses et des lignines, dépendent très sensiblement de la nature résineuse ou feuillue de l'essence ligneuse.

De part leur caractère très hydrophile, et leur capacité à se replier sur elles mêmes (faibles longueurs de chaîne), les hémicelluloses sont les principales responsables des phénomènes de retrait - gonflement de la paroi avec les variations des teneurs en eau (Siau, 1984). Les lignines, quant à elles, majoritairement localisées au sein de la lamelle mitoyenne, jouent le rôle d'un adhésif intercellulaire hydrophobe. D'autres substances, appelées pectines (polysaccharides), sont rencontrées, plus anecdotiquement, dans les parties externes de la paroi cellulaire.

Pour les mécaniciens, la matière ligneuse est assimilée à un matériau composite simplifié dont la structure est censée décrire « la paroi cellulaire » dans son intégralité. Cette approche schématique de l'organisation pariétale fait donc abstraction de la variabilité naturelle des teneurs en macromolécules dans la paroi cellulaire ligneuse (celles des lignines a notamment été décrite par Boutelje, 1962, Ruel, 1984, Donaldson, 2001 et Monties 2003, celle des polysaccharides l'a été par Bergander *et al*, 2001) comme de la variabilité des agencements mutuels (supramoléculaires) des bio polymères essentiels.

1.2.2 Les microfibrilles de cellulose : des éléments essentiels de renfort pariétal

Le regroupement en « bâtonnets » rigides rectangulaires des chaînes linéaires cellulosiques est fortement favorisé par la présence de groupements hydroxyles périphériques sur chaque maillon (monomère) cellobiose. Cette association supramoléculaire est appelée « microfibrille de cellulose ». La taille de ces « segments » cellulosiques, quasi cristallins, varie généralement en fonction de l'espèce ligneuse considérée. En dépit de cette variabilité de

dimension, il est possible de donner une estimation de la longueur de la microfibrille de l'ordre de 1,5 à 5 nm. Les faisceaux de microfibrilles, séparés les uns des autres par des couches de cellulose (plus ou moins organisée) ou d'hémicelluloses, se regroupent pour former des agrégats, nommés fibrilles, dont l'épaisseur est généralement comprise entre la dizaine et la vingtaine de nm (Hult *et al*, 2000).

1.2.2.1 Prise en compte des différents caractères de la structure microfibrillaire dans une perspective mécanicienne

Un renfort filamentaire régulier en dépit d'une structure discontinue

Depuis longtemps, des études, menées à l'échelle sub-microscopique (Mark, 1967, Fengel *et al*, 1984) ont souligné le caractère discontinu des microfibrilles. Par diffraction des rayons X puis par microscopie électronique, la présence systématique de zones amorphes désordonnées distribuées sur la longueur de la microfibrille a été montrée. Les cristallites de cellulose ne représentent ainsi pas une phase continue. De surcroît, ces éléments cristallins apparaissent fortement variables dans leurs dimensions (Mark, 1967). L'organisation exacte des cristallites dans la microfibrille n'a, jusqu'alors, pas été parfaitement élucidée (nombre, disposition spatiale). Elle a donc été sujette à de multiples interprétations et a donné lieu à plusieurs modélisations (en particulier celles de Fengel, 1968, et de Mark, 1980).

Diverses techniques expérimentales (localisation de l'accessibilité de la cellulose amorphe à certaines molécules, diffraction rayons X, ...) conduisent à une évaluation du taux de cristallinité de la cellulose du bois de l'ordre de 60 à 70% (Preston, 1964 dans Panshin *et al*, 1980). Devant une telle proportion de cristallites, et une longueur de segment cristallin bien supérieure à celle de la zone amorphe, les descriptions mécaniciennes envisagées à cette échelle considèrent que les microfibrilles assurent un renfort filamentaire régulier et continu à la sous couche S₂. La justification de cette approximation de continuité a été décrite par Salmèn *et al* (1985, 1986) avec son modèle de fibre aplatie. Celui-ci, reprenant les équations de Halpin Tsai (évaluation des caractéristiques élastiques d'un composite renforcé par des fibres courtes), a montré, expérimentalement (fibres mercerisées et régénérées), qu'une diminution de la rigidité axiale de la fibre n'est observée que dans le cadre de modifications simultanées du taux de cristallinité et de la longueur des zones cristallines. Des modifications locales (ponctuelles) de cristallinité le long de la fibre ne conduisent pas à des changements majeurs de rigidités. En quantifiant l'impact d'une modification de la longueur des renforts cellulosiques, sur les modules élastiques de sous couche (méthode « auto cohérente »), Vieville (1992) est également arrivé, de manière plus théorique, à la même conclusion.

Des fibres cellulosiques aux propriétés mécaniques homogènes

Bien que de nombreux travaux (Mark, 1967, Fengel *et al*, 1984) aient montré d'une part l'existence d'incrustations lenticulaires (lignines mêlées d'hémicelluloses) séparant les microfibrilles, et d'autre part la présence de liens désordonnés entre microfibrilles d'une même lamelle (ou entre lamelles adjacentes d'une même sous couche, Boyd *et al*, 1975, Figure 1.2), le renfort cellulosique pariétal est très généralement décrit comme étant assuré par des fibres mécaniquement homogènes.

Certaines modélisations d'effet mécano sorptif survenant lors de la morphogenèse cellulaire (déformations résiduelles de maturation) ne négligent pas l'incidence de ces interactions « fibres – matrice » sur les propriétés mécaniques du réseau microfibrillaire.

Ainsi, la modélisation monodimensionnelle de Gril (1987), inspirée de celle de Boyd *et al*, (1975), schématise la nappe microfibrillaire par un réseau de poutres cellulosiques élastiques encastées, au sein duquel les incrustations lenticulaires de matrice, localisées aux nœuds du milieu périodique, sont assimilées, par leur fonction, à des ressorts. Ces ressorts, schématisant le rôle joué par la lignine lors de la maturation cellulaire, tendraient à « dilater » le réseau cellulosique dans les directions transverses aux microfibrilles et à le raccourcir dans la direction axiale, à la manière d'un « vérin mécanique ».

Un comportement élastique anisotrope

L'hypothèse d'un comportement élastique anisotrope de la microfibrille, imputé à une orientation spécifique des cristallites par rapport au grand axe microfibrillaire a déjà été avancée (Mark, 1975). La prise en compte d'un tel comportement mécanique anisotrope de la fibre dans le comportement mécanique de la paroi n'est cependant pas unanime. Généralement intégré dans les modèles de paroi multicouches à fibres parallèles (Bergander, 2001), il n'intervient sur les modules élastiques de paroi que comme un paramètre de second ordre. Ce degré de sophistication n'est en conséquence pas retenu, dans d'autres approches sélectives du rôle mécanique de chaque sous couche (Guitard *et al*, 1999).

Superposition « locale » des microfibrilles dans la sous couche S_2

Récemment (Daniel *et al*, 1998, dans Bergander, 2001), des microphotographies électroniques de microfibrilles dans la direction longitudinale de la cellule ont montré l'existence de structures ondulantes dans la paroi secondaire assez semblables à la configuration en « treillis » observée en son temps par Boyd *et al* (1975) (Figure 1.2).

D'autres auteurs (Kataoka *et al*, 1992), considèrent que la construction de la sous couche S_2 est assurée par des dépôts successifs et croisés de faisceaux microfibrillaires (Figure 1.3).

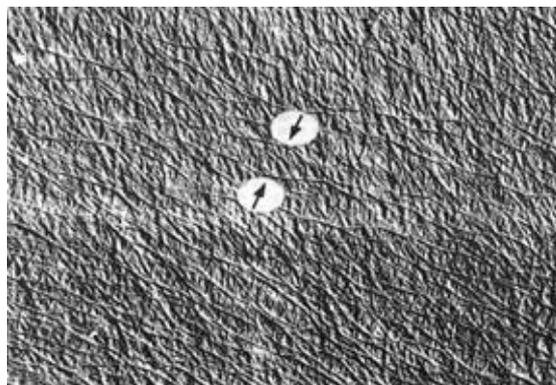


Figure 1.2 Micrographie électronique montrant la configuration en forme de treillis observée entre les microfibrilles de lamelles adjacentes lors de la lignification, tiré de Boyd *et al* (1975).

L'intervalle entre les deux repères correspond à 0.3 μm

Cet empilement ordonné conduirait, selon ces derniers, à l'existence d'une architecture locale en treillis dans l'épaisseur de S_2 . Les angles de croisement des microfibrilles relevés par Kataoka *et al* sur *Cryptomeria Japonica* D (Sugi) sont périodiques et leurs valeurs vont de 11 à 35 degrés. Cette configuration en treillis semble assez semblable à celle relevée habituellement dans la sous couche S_1 (les angles de croisement dans S_2 sont néanmoins plus faibles que ceux obtenus dans S_1). Bien que l'AMF ait été souvent mesuré, les mécanismes

cellulaires à l'origine de sa mise en place ne sont encore pas, à l'heure actuelle, bien élucidés (Chaffey *et al*, 2000).

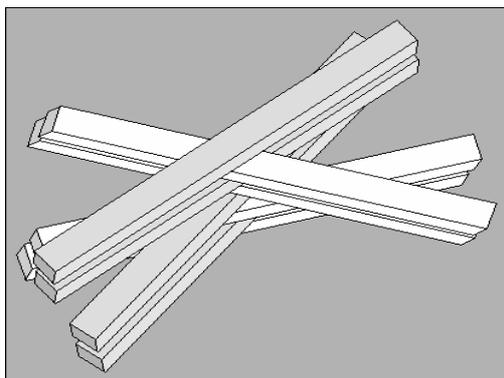


Figure 1.3 Croisement et superposition des microfibrilles (mis en évidence par microscopie électronique) dans les parois radiales de la sous couche S₂

Dans l'ensemble des travaux cherchant à modéliser les voies de passage micro-macro, les microfibrilles dans la sous couche S₂ (et dans les autres sous couches) sont néanmoins considérées comme étant strictement parallèles entre elles. On notera que l'observation des architectures des différentes sous couches (de type treillis ou proche de celles des feutres) est fortement dépendante de la technique expérimentale utilisée (effet de contraste).

Disparité bibliographique des caractéristiques élastiques de la microfibrille de cellulose

Dans leurs propositions de modèles, visant à évaluer les propriétés élastiques de la paroi cellulaire, les mécaniciens du bois utilisent très généralement un module élastique longitudinal de microfibrille (dit « module d'Young des microfibrilles ») assimilé à celui des chaînes de cellulose purement cristalline (cellulose I). Les paragraphes précédents ont évoqué la structure discontinue de cet élément essentiel du renfort filamentaire de la paroi. Il convient donc de préciser les « limites » de la prise en compte de telles valeurs dans les différents modèles proposés.

Une banque de données assez variée

La littérature, qu'elle soit issue d'études ultrastructurales ou plus mécaniciennes, fait état, de diverses valeurs numériques caractérisant, à priori, la rigidité axiale des microfibrilles. L'examen de cet ensemble d'éléments bibliographiques, assez hétérogène, amène quelques commentaires.

Des valeurs représentatives de la structure microfibrillaire ?

La valeur de 137 GPa, obtenue par Sakurada *et al* (1962) est à l'heure actuelle, la référence la plus couramment utilisée dans les modélisations du comportement mécanique de la paroi (Salmèn *et al*, 1985, 1986, 1998, Yamamoto *et al*, 1998,1999, Guitard *et al*, 1999). Elle y représente la rigidité supposée des microfibrilles (Tableau 1.1). Pourtant, l'insertion de telles rigidités de microfibrilles au sein de descriptions « composite multicouche » du comportement élastique de la paroi, conduit à une surestimation des rigidités transverses pariétales en regard de certaines observations expérimentales (Bergander, 2001).

Ce module d'élasticité expérimental a été établi par Sakurada *et al* sur une fibre de Ramie blanchie soumise à une traction sous charge. L'exploitation d'un ensemble de spectres de diffraction des rayons X (plan réticulaire 040), a fourni une évaluation de l'« extension » du réseau cristallin de la cellulose I, puis a permis aux auteurs l'estimation indirecte du déplacement de la fibre. Il s'agit donc d'un module d'élasticité de la « région cristalline » de la microfibrille. Des évaluations plus directes de la rigidité microfibrillaire n'ont malheureusement pas encore été mentionnées dans la littérature.

Il existe en outre, quelques désaccords entre les mesures micromécaniques de l'élasticité de certaines fibres de cellulose et celles obtenues via des « mesures » du déplacement des plans réticulaires. L'exemple de la cellulose II (isomère de conformation de la cellulose I) est assez significatif. De récents essais de traction sur ce type de fibre (Kompella *et al*, 2002) ont en effet montré que le module d'élasticité longitudinal déterminé par exploitation de courbes force – déplacement est très éloigné (2 GPa) de celui calculé par la méthode de diffraction rayons X (valeur de 70-90 GPa obtenue par Bledzki *et al*, 1999).

En employant la même technique (sur le même type de fibres) que Sakurada *et al*, Ishikawa *et al* (1997), ont fait état, via l'utilisation d'une méthode inverse (zones amorphes et cristallines associées en série comme Sakurada *et al*, ou plus originalement en série et parallèle) de valeurs de module élastique de la cellulose I de 114 GPa et 90 GPa.

L'ensemble de ces résultats suggèrent donc que si le module d'élasticité de la cellulose I est sans aucun doute proche de la centaine de GPa, l'alternance de zones amorphes et cristallines au sein d'une même microfibrille, peut lui conférer un module élastique axial sensiblement inférieur à la valeur de Sakurada *et al*. Bledzki *et al* (1999), proposent ainsi un module de microfibrilles situé entre 61 et 130 GPa tandis que Michell (1989) et Fink *et al* (1994) adoptent une valeur moyenne de 70 GPa (Tableau 1.1).

	Références	Module d'élasticité longitudinal de la cellulose I (GPa)
Cités dans Sakurada <i>et al</i> (1962)	Meyer <i>et al</i> (1936)	79-123 et 80-110
	Lyons (1959)	180
Cités dans Salmèn <i>et al</i> (1984)	Treloar (1960)	56,5
	Jaswon <i>et al</i> (1968)	56,6
	Gillis (1969)	246
	Gillis (1969) : valeur admise comme majorant	319
	Sakurada <i>et al</i> (1962)	134
	Mark (1967-1970-1980)	137
	Ishikawa <i>et al</i> (1997)	90
	Michell (1989), Fink <i>et al</i> , (1994) dans Bledzki (1999)	70

Tableau 1-1 Modules élastiques longitudinaux de la cellulose I considérés comme représentatifs de la rigidité microfibrillaire axiale

D'après les résultats de Mott *et al* (1996), suggérant des variations ponctuelles de rigidité le long de la microfibrille, les valeurs affichées ne peuvent, en outre, représenter que des estimations moyennes, résultant de l'intégration sur toute la microfibrille de modules d'élasticité supposés plus « locaux ».

Enfin, d'autres auteurs estiment qu'assimiler le déplacement des chaînes de cellulose, lors d'un essai micromécanique, au seul déplacement des plans réticulaires conduit à majorer la rigidité des fibres. Ils soulignent en effet que le déplacement d'une fibre de cellulose sous charge résulte non seulement d'une elongation des chaînes cristallines (donc d'un déplacement monodimensionnel des plans réticulaires) mais aussi d'une rotation des chaînes autour de l'axe de la fibre (Northolt *et al*, 2001).

1.2.3 La matrice ligno-cellulosique

Composée pour 50% de lignines tridimensionnelles et de 50% de polysaccharides, la matrice est généralement rendue responsable du comportement mécanique différé (viscoélasticité) du matériau bois. Elle suscite néanmoins encore beaucoup d'interrogations quand à ses propriétés mécaniques propres.

1.2.3.1 Propriétés mécaniques des constituants macromoléculaires de la matrice

Les modules d'élasticité des polymères constitutifs de la matrice (lignines, hémicelluloses pour l'essentiel) sont clairement identifiés dans la littérature. Ils doivent néanmoins être considérés, comme des caractéristiques élastiques de polymères obtenus très généralement par des techniques d'extraction, c'est-à-dire mesurés sur des molécules isolées de leur contexte structural (organisation dans un éventuel réseau, structure chimique différente dans le milieu originel). Leur représentativité quant aux caractéristiques élastiques des polymères in situ (non encore mesurées) est donc encore à démontrer.

Pour Cousin (1978), dont les résultats sont très largement repris, les hémicelluloses ont une rigidité (à l'état sec) de l'ordre de 8 GPa, tandis que les lignines ont un module de l'ordre de 5 à 7 GPa.

1.2.3.2 Une isotropie élastique supposée

A l'intérieur des sous couches S_1 et S_2 , certains des polymères constitutifs de la matrice (une partie des hémicelluloses et quelques lignines) sont en contact étroit avec les microfibrilles (Salmèn *et al*, 1998). Au sein de ces associations supramoléculaires quelque peu complexes, regroupées sous le terme de matrice et assimilables à un véritable enchevêtrement, les lignines généralement qualifiées de tridimensionnelles (elles ne le sont en toute rigueur que dans la lamelle moyenne) apparaissent pour certains auteurs comme des éléments importants du comportement mécanique pariétal (Donaldson, 2003, Gindl *et al* 2002, 2003).

La présence de liens covalents entre lignine et hémicellulose (Kerr *et al*, 1975 dans Salmèn *et al*, 1985), ou encore l'existence d'une orientation privilégiée des hémicelluloses par rapport à l'axe des chaînes de cellulose (Liang *et al*, 1960 dans Salmèn *et al*, 1985, Cave, 1972, Hackney *et al*, 1994) suggèrent assez naturellement un comportement élastique anisotrope de la matrice ligno cellulosique.

Chez les essences feuillues, de tels liens entre lignines et hémicelluloses ont d'ailleurs conduit certains auteurs (Yamamoto *et al*, 2003) à modéliser le comportement élastique pariétal du

bois de tension par celui d'un matériau composite formé par un squelette de matrice amorphe renforcé par des microfibrilles parallèles.

Néanmoins, une récente simulation du comportement mécanique de la paroi des résineux (Bergander *et al*, 2000, Bergander 2001), menée via une modélisation multicouche à fibres parallèles a montré, d'une part que l'arrangement des lignines et hémicelluloses n'a pas d'influence majeure sur les propriétés élastiques transverses de la paroi, et plus généralement que la matrice ne joue pas un rôle prépondérant dans le comportement élastique pariétal global.

Pour ces raisons, mais aussi devant le manque de données utiles à une évaluation de l'éventuel degré d'anisotropie de la matrice et le caractère amorphe des unités monomères des lignines, bon nombres de mécaniciens du bois sont conduits à admettre l'existence d'une matrice quasi amorphe au comportement mécanique isotrope. Un module d'élasticité de la matrice de 2 GPa est alors unanimement envisagé (Mark, 1967, 1980, Barrett, 1973, Bodig *et al*, 1982, Gril, 1987, Yamamoto 2001).

On notera enfin que, les homogénéisations mécaniciennes rencontrées dans la littérature, font nécessairement appel à une organisation spatiale simplifiée du milieu bi phasique matrice-microfibrilles (Figure 1.4). La matrice ligno-cellulosique est ainsi assimilée à un ensemble amorphe enveloppant les microfibrilles (elle se place sur leur pourtour pour Mark 1980, Norimoto *et al*, 1985) à la manière d'une gaine. Bien qu'assez éloignée de la stricte réalité microfibrillaire, cette schématisation permet néanmoins d'apprécier le comportement mécanique global de la matière ligneuse à l'échelle de la sous couche. Ainsi, Salmèn (2001) a montré que les dispositions respectives des hémicelluloses en regard des microfibrilles et des hémicelluloses en regard des lignines ne jouent qu'un rôle mineur sur le comportement mécanique de la paroi.

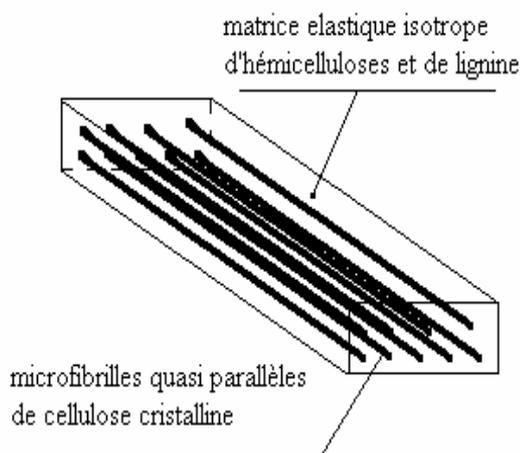


Figure 1.4 : Schématisation du milieu bi phasique constituant chaque sous couche pariétale

1.2.3.3 Perspective ultrastructurale envisagée

Dans le travail ici mené, il s'agit moins de prendre en compte, dans le modèle adopté in fine, de données ultrastructurales précises (qui assureraient une description moléculaire stricte de la matière ligneuse pariétale), que de traduire mécaniquement le rôle du renfort filamentaire cellulosique. La matière constitutive de la paroi cellulaire pourra donc être assimilée, en première approximation, à un milieu bi phasique constitué d'une matrice amorphe entourant

des fibres de renfort quasi cristallines. Dans le terme de module élastique de microfibrilles, comme dans celui de module élastique de matrice ligno cellulosique, il conviendra donc d'entendre plutôt des « grandeurs » caractérisant un matériau mécaniquement « équivalent » à une microfibrille non homogène et à l'agrégat moléculaire quasi amorphe (lignine, hémicelluloses, pectines, éventuellement extractibles) qui comble l'interstice entre les microfibrilles. Les deux phases de ce matériau devront être vues comme étant parfaitement « confondues » l'une dans l'autre (Sassus, 1998). L'échelle de description « moléculaire » sera, par soucis de simplicité, ignorée (peu de travaux atteignent un tel degré de finesse descriptive).

1.2.4 L'angle des microfibrilles dans la sous couche S_2 : un paramètre micromécanique primordial

Comme cela a été évoqué, l'AMF caractérise, au sein de chaque sous couche pariétale, l'inclinaison des microfibrilles par rapport au grand axe cellulaire. Ces fibres cellulosiques, qui assurent l'essentiel du renfort de la paroi, permettent à cette dernière, de résister à toutes sortes de sollicitations mécaniques. Leur inclinaison constitue donc un critère déterminant dans la tenue mécanique de la paroi cellulaire, voire dans les propriétés élastiques « globales » du matériau bois. Nous nous proposons donc de faire un inventaire succinct de quelques sources majeures de variabilité des mesures de l'AMF dans S_2 , puis de préciser, pour chacune d'elles, comment les modélisations mécaniciennes les plus « usuelles » les prennent en compte.

1.2.4.1 Une distribution uniforme de l'AMF dans la sous couche S_2 ?

Perturbations dues à la présence de ponctuations

Certains auteurs, ont montré que la présence de ponctuations dans la sous couche S_2 engendre des déviations locales de l'AMF relevé par diffraction rayons X (Sahlberg *et al*, 1997). Cependant, la longueur de la trachéide relevée sur les résineux (4 mm et plus, Keller dans Jodin, 1994), comparée aux dimensions des ponctuations (diamètre de 0,2 à 4 μm , Siau, 1984) permet de considérer l'influence de cette réorganisation ultrastructurale de la paroi comme non strictement essentielle dans le comportement mécanique global pariétal. Il est donc possible d'admettre, en première approximation et uniquement sous un angle de vision « mécanicien », une distribution homogène de l'angle des microfibrilles dans la sous couche S_2 .

Variations internes de l'AMF dans la sous couche S_2

Des études ultrastructurales (Roland *et al*, 1982) ont évoqué l'existence d'une distribution gaussienne de l'AMF dans l'épaisseur de la sous couche S_2 . D'autres observations montrent une répartition non uniforme de l'AMF le long de la sous couche S_2 de quelques Pins (Khalili *et al*, 2001).

En dépit de ces deux types d'observations, la grande majorité des auteurs mécaniciens se contente d'assimiler, par soucis de simplicité, la sous couche S_2 à une enveloppe cylindrique de composite dans lequel l'inclinaison des microfibrilles est sensiblement constante aussi bien dans l'épaisseur (directions transverses cellulaire) que dans la longueur (direction longitudinale de la cellule).

Une différence d'inclinaison des microfibrilles entre les parois d'une même cellule ?

Dans la plupart des modélisations mécaniques du comportement pariétal, l'inclinaison des microfibrilles entre les parois cellulaires radiales et tangentielles d'une même cellule ligneuse n'est pas distinguée, et ce, contrairement à des propositions déjà anciennes (Frey-Wissling, 1940, cité dans Botosso, 1997, Boutelje, 1962, Boyd, 1974, Boyd *et al*, 1975). Cette différence d'angle microfibrillaire (de 0 à 15 degrés, Preston, 1934, Boutelje, 1962), initialisée durant la lignification de la paroi secondaire (Boyd, 1974), constituerait pour Boutelje (1962) un facteur explicatif de l'anisotropie élastique transverse pariétale des résineux. Pour d'autres auteurs (Mark, 1967, Barrett, 1973), la prise en compte de cette distinction entre les deux parois transverses ne serait pas, à elle seule, suffisante pour expliciter l'anisotropie transverse pariétale.

Ces différences, particulièrement délicates à mettre en évidence expérimentalement, s'avèrent au demeurant assez faibles dans des travaux plus récents (inférieures à 5 degrés pour Kataoka *et al*, 1992, Khalili *et al*, 2001). Elles ne sont généralement pas prises en compte par les mécaniciens. Certains auteurs (Barrett, 1973) évoquent, sans la modéliser, l'éventualité d'une anisotropie transverse élastique pariétale due à une topo chimie des lignines différente dans les deux parois (Bosshard, 1956). Des évaluations micromécaniques directes (nano indentation) de la rigidité dans S_2 montrent, cependant sur *Picea abies*, qu'il n'est pas certain que les propriétés élastiques des parois radiales et tangentielles diffèrent significativement (Wimmer *et al*, 1997).

1.2.4.2 Influence de la technique expérimentale sur la disparité des mesures d'AMF rapportées

La variabilité biologique de l'inclinaison des microfibrilles (AMF), peut s'exprimer sur un ensemble de cernes immédiatement voisins comme à l'intérieur d'un même cerne de croissance, i.e. entre le bois initial et le bois final (Sahlberg *et al*, 1997, Bergander 2001).

Les valeurs mesurées sur un même tissu (bois initial, bois final) varient, en outre, très sensiblement avec les techniques expérimentales mises en œuvre (Tableau 1.2, mesures sur *Picea abies*).

Avec la technique fondée sur l'exploitation des spectres de diffraction des rayons X, des différences sensibles d'AMF relevé peuvent même apparaître selon le plan réticulaire (002 ou 040) sujet de l'étude. Sahlberg *et al* (1997) soulignent ainsi que bien que le plan (002) ait été le plus souvent étudié (diffraction présentant la plus grande intensité), il ne fournit qu'une mesure indirecte nécessitant une calibration. La détermination de l'AMF à partir du plan (040) ne présente pas, pour l'auteur, ce genre d'inconvénient technique.

Sahlberg *et al* (1997), ont comparé les résultats obtenus via des méthodes expérimentales distinctes (Tableau 1.2). Ils expliquent les différences entre les AMF caractérisés via des déviations d'une lumière polarisée et celles obtenues par l'exploitation de spectre de diffraction rayons X, par des perturbations locales de l'AMF autour des ponctuations.

Pour ces auteurs, la technique utilisant une lumière polarisée, lorsqu'elle est appliquée aux parois cellulaires tangentielles, prend uniquement en compte la portion de microfibrilles présentes en dehors de l'environnement local des ponctuations. La valeur moyenne alors obtenue n'intègre donc pas les singularités ponctuelles. La méthode d'interprétation des

spectres de diffraction rayons X, en plus d'être la plus rapide, présente quant à elle l'avantage d'évaluer l'AMF tout autour de la paroi. Cette technique permet donc d'accéder à une information globale. Toujours selon Sahlberg *et al* (1997), la dispersion des mesures d'angle dans les parois radiales est directement attribuée à un nombre important de ponctuations.

Auteurs	Nature de la fibre testée	AMF	Technique employée
Ollinma (1961) dans Sahlberg <i>et al</i> (1997)	Moyenne dans le cerne	25,5	Lumière polarisée
Marton (1970) dans Sahlberg <i>et al</i> (1997)	BI	20,4	Lumière polarisée
	BF	18,1	Lumière polarisée
	BI	11,5	Diffraction R.X (002)
	BF	12,0	Diffraction R.X (002)
Paakkari (1984)	BI	4,9	Diffraction R.X (002)
	BF	4,3	Diffraction R.X (002)
Sahlberg <i>et al</i> (1997)	BI	9,7	Diffraction R.X (040)
	BF	8,3	Diffraction R.X (040)
	Moyenne sur le cerne	5,1	Cristaux d'iodes (Senft <i>et al</i> , 1985)
	BI en moyenne	9,0	Diffraction R.X (040)
	BF en moyenne	8,1	Diffraction R.X (040)
Bergander <i>et al</i> (2001)	BI normal en moyenne	10	Polarisation confocale (CLSM)
		8	Diffraction R,X,
Ruelle (2003)	Bois normal en moyenne	20,18	Cristaux d'iodes (Senft <i>et al</i> , 1985)

Tableau 1-2 Valeurs d'AMF relevées sur le bois initial (BI) et le bois final (BF) de *Picea abies*

1.2.4.3 Une distinction parfois délicate des AMF dans les cellules de bois initial et de bois final

Les différences d'AMF relevés entre les sous couches S₂ des cellules de bois initial et de bois final sont aussi (et a fortiori) très fortement dépendants de la technique expérimentale mise en

œuvre (Sahlberg *et al*, 1997). Certaines mesures laisseront donc apparaître une différence nette dans l'inclinaison microfibrillaire de ces deux tissus tandis que d'autres ne permettront aucune distinction (valeur globale commune).

Des résultats établis via la technique de diffraction des rayons X, montrent ainsi des différences minimes entre l'AMF du bois initial et celui du bois final (1 à 2 degrés pour Paakkari *et al*, 1984, Sahlberg *et al*, 1997, Bergander *et al*, non publié). D'autres, fournis par des mesures plus « locales » (lumière polarisée, orientation des cristaux d'iodes, Senft *et al*, 1985), suggèrent de plus grands écarts entre les deux tissus (jusqu'à 30 degrés pour McMillin, 1973, Herman *et al*, 1999).

L'utilisation directe, dans une modélisation, des résultats rapportés dans la littérature, exige donc une connaissance précise des conditions expérimentales : précision de la mesure effectuée, technique expérimentale employée, mesure individuelle sur une trachéide (fibre unique) ou mesure plus globale (paquet de fibres). La littérature ne présente que très rarement de telles informations ce qui conduit bon nombre d'auteurs à insérer des valeurs médianes au sein de leurs modèles. Une étude numérique paraît indispensable pour élucider le rôle de l'inclinaison des microfibrilles sur l'anisotropie pariétale tout en s'affranchissant des difficultés expérimentales de sa détermination.

Nous admettons ici, comme certains auteurs mécaniciens (Barrett, 1973, Mark, 1967, 1980, Mark *et al*, 1970, Navi *et al*, 1995), une distinction nette entre l'angle des microfibrilles du bois initial et celui du bois final.

1.2.5 Prise en compte du caractère multicouche de la paroi cellulaire

Si toutes les modélisations du comportement mécanique pariétal de la cellule de bois normal accordent un rôle prépondérant à la sous couche S_2 , la hiérarchisation des éléments micro anatomiques participant au comportement mécanique de la paroi cellulaire ne fait pas l'unanimité. Certains auteurs, s'inspirant de constatations cytologiques avérées (microscopie électronique pour la plupart), proposent des modèles à fibres parallèles faisant intervenir d'autres sous couches (trois sous couches pour Yamamoto, 1998, 1999, Yamamoto *et al*, 2001, prise en compte de S_1 en particulier dans le comportement mécanique transverse de la paroi de bois initial dans le cas de Mark, 1972, Cave, 1975, Salmèn *et al*, 1985, Bergander *et al*, 2000a, 2000b).

Ces dernières propositions, traduisant le caractère stratifié de la paroi cellulaire par un empilement multicouches, apparaissent belles et bien réalistes en regard de la diversité des épaisseurs de sous couches (Dunning, 1968) et de la structure cellulaire déjà évoquée (paragraphe 1.1.1). Elles permettent en outre d'exprimer directement (parfois au prix d'un nombre élevé de paramètres descriptifs) la variabilité intra cerne des épaisseurs pariétales (S_1 est jusqu'à 3 fois plus importante dans le bois initial que dans le bois final, Panshin *et al*, 1980, Kollmann *et al*, 1984, Koponen *et al*, 1989, Bergander, 2000) ainsi qu'une part de la variabilité intra cerne des teneurs en macromolécules de la paroi (Fukuzawa *et al*, 1981). Néanmoins, de telles modélisations multicouches, n'amènent pas d'amélioration significative aux résultats de modèles prédictifs des déformations de maturation attribuant à la sous couche S_2 l'essentiel du comportement élastique de la paroi cellulaire (Guitard *et al*, 1999).

Pour ces raisons, d'autres auteurs (Guitard *et al*, 1999, 2002) préfèrent donc décrire le comportement mécanique d'un ensemble de parois par celui d'une couche composite unique

dont les caractéristiques ultrastructurales (en particulier l'AMF) sont empruntées à la sous couche S_2 .

L'origine d'une telle simplification est plus une schématisation du renfort filamentaire, conféré à la paroi par les microfibrilles orientées, qu'une description stricte de l'architecture de la sous couche pariétale S_2 .

Cette unique prise en compte de la sous couche S_2 dans le comportement mécanique global de la paroi, envisagée uniquement pour les résineux, trouvera sans doute des limites dans le cas des feuillus (structure pariétale plus complexe, Clair, 2001) et plus encore si on sort du cadre d'étude du bois normal (sous couche S_3 du bois de réaction riche en cellulose cristalline).

1.2.6 Description du comportement mécanique de sous couche

Si la prise en compte du caractère multicouche de la paroi cellulaire dans le comportement mécanique de la cellule ligneuse ne fait pas l'unanimité, la transition en terme mécanique du passage de l'échelle ultrastructurale à l'échelle de la sous couche, est en revanche assurée, de manière unanime, par l'assimilation du comportement du milieu bi phasique « matrice fibres » à celui d'une couche composite à renfort filamentaire.

Au sein de ce milieu bi phasique, décrivant la matière constitutive de chaque sous couche, l'état mécanique moyen de chaque phase peut être considéré comme décrit par un même champ de déformation (le réseau microfibrillaire s'intrique dans la matrice).

Pour permettre l'évaluation des composantes du tenseur des rigidités dans chaque sous couche, la matrice et les fibres cellulosiques sont associées en parallèle dans la direction longitudinale, en série dans les directions transverses.

1.2.7 La double cloison, un passage obligé vers le tissu ligneux

Dans la très grande majorité des modélisations proposées afin d'évaluer les propriétés élastiques tissulaires, la juxtaposition des parois ligneuses adjacentes de deux cellules contiguës est prise en compte par la création d'un multicouche (ou stratifié), plus ou moins complexe, élaboré par l'assemblage d'un nombre variable (selon les modèles) de sous couches composites (Figure 1.5). Chaque pli ou sous couche est principalement caractérisé, par une orientation microfibrillaire propre (paramétrée par l'AMF), de signe opposé à celle de son homologue située de l'autre côté de la lamelle mitoyenne.

Ainsi élaboré, ce stratifié antisymétrique rend notamment compte, du comportement élastique de membrane (discuté plus loin) de deux parois élémentaires tissulaires attenantes. La quantité de matière ligneuse comprise entre deux lumens immédiatement voisins sera appelée, par la suite, la double cloison cellulaire ou double cloison.

Il convient ici de préciser la différence essentielle entre l'étape descriptive précédente et celle ici évoquée. A travers l'assimilation du milieu bi phasique à celui d'un composite renforcé par des fibres, l'étape antérieure visait la description du comportement mécanique d'une unique sous couche (voire d'une paroi si seule la sous couche S_2 est considérée). Par l'assemblage de deux sous couches voisines, le formalisme évoqué maintenant a pour objectif essentiel de transcrire le comportement mécanique d'un ensemble de parois ; il se situe donc plus sous l'angle de description des propriétés mécaniques tissulaires que sous celui des propriétés mécaniques de la paroi isolée.

1.2.7.1 La double paroi cellulaire décrite par un empilement multicouche de sous couches à fibres parallèles.

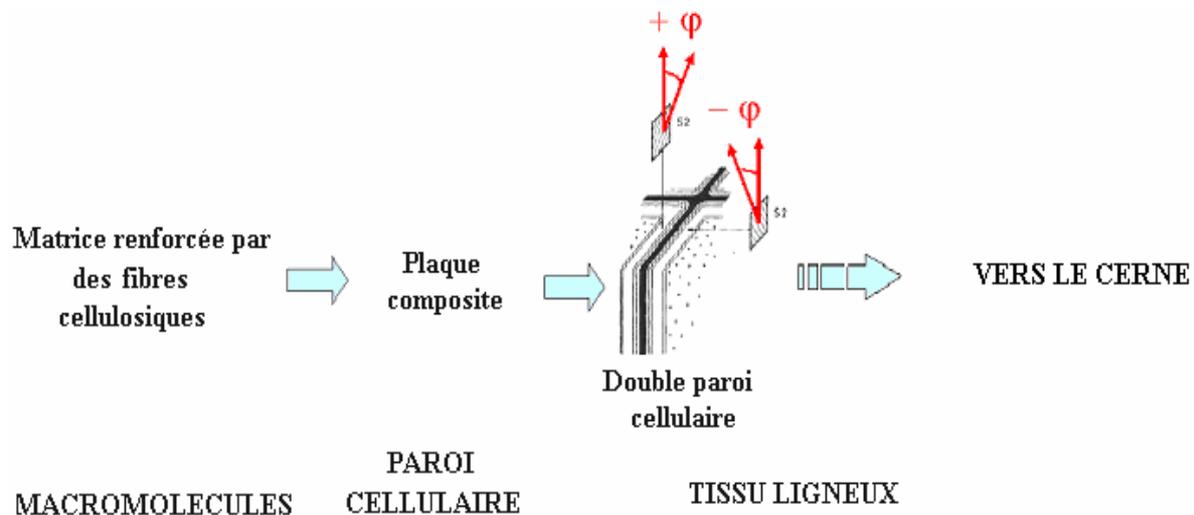


Figure 1.5 Transition du comportement mécanique d'une sous couche à celui de la double paroi par la création d'un multicouche à plis anti symétriques (tiré et adapté de Salmén et al, 1986). La notation ϕ représente ici l'AMF propre à la sous couche S_2 .

Ce type de modélisation (Carlsson *et al*, 1986, Frey-Wyssling, 1968 dans Bodig, 1982, Barrett, 1973, Gillis, 1972, Cave, 1975,1976, Mark, 1980, Koponen *et al*, 1989, 1991, Norimoto, 1986, Salmén, 1986), visant à décrire le comportement élastique de la double paroi cellulaire, fait appel à la théorie classique des stratifiés (Tsai *et al*, 1980, Daviaud *et al*, 1983, Guitard *et al*, 1987).

Cette deuxième étape de la modélisation intégrative micro-macro, assure la transition mécanique de l'échelle de la sous couche à celle de la double cloison. Elle permet notamment d'exprimer les rigidités de membrane (sous l'hypothèse de contraintes planes) et conduit, in fine, à des estimations des modules bipariétaux longitudinal et transverses (double paroi).

Les modèles multicouches les plus simples définissent ainsi ce même passage par un assemblage de deux sous couches S_2 (à fibres parallèles) parfaitement collées. D'autres, plus complexes et certainement cytologiquement plus réalistes, autorisent diverses distinctions (épaisseurs, composition chimique, AMF) entre les différentes sous couches envisagées.

Par l'empilement de sous couches (plis) à inclinaison de fibres de renforts antisymétrique, la double cloison est décrite par un stratifié non équilibré. Par conséquent, on notera la présence de termes de couplages non nuls entre les rigidités de membrane et les moments de flexion torsion.

Nous reviendrons sur les expressions des différentes caractéristiques élastiques des multicouches pariétaux au cours des chapitres suivants (chapitres 2 et 3).

La restriction de cisaillement

Dans le réseau cellulaire propre à un tissu ligneux, les mouvements de torsion de chaque cellule imbriquée sont fortement gênés (blocages par les cellules immédiatement voisines). Un tel environnement implique donc la nullité des déformations de cisaillement, phénomène mécanique souvent appelé "restriction de cisaillement" (Bodig *et al*, 1982, Gril, dans Perré, 1998). Dans une telle situation, la double paroi cellulaire présente alors une rigidité nettement supérieure à celle d'une double paroi de même structure extraite de son environnement histologique.

Néanmoins, la prise en compte de cette restriction de cisaillement dans les modèles multicouches, ne fait pas l'unanimité. Norimoto *et al* (1986) considèrent ainsi que sa prise en compte amène à des prédictions en désaccord avec leurs résultats expérimentaux.

Description mécanique du renfort cellulosique de la double cloison par un squelette de microfibrilles entrecroisées.

La sous couche S_2 étant la plus épaisse et la plus riche en cellulose (exception faite de la sous couche S_3 , dite couche gélatineuse, du bois de réaction des feuillus), certaines modélisations du comportement mécanique de la double paroi cellulaire (Guitard *et al*, 1999, 2002) résument le comportement mécanique de la cellule à celui d'une unique sous couche virtuelle dont les caractéristiques ultrastructurales sont empruntées essentiellement à la sous couche S_2 .

La cellule ligneuse vue comme une structure cylindrique de matériau composite

La cellule, réduite à une unique sous couche S_2 , (schématisation proposée initialement par Barber *et al*, 1964 afin de prédire le retrait longitudinal), est assimilée à un cylindre à paroi fine constitué d'un matériau composite fibres cristallines isotropes - matrice amorphe très spécifique.

La matière constitutive de la cellule virtuelle est en effet décrite par une matrice amorphe, élastique et isotrope, de lignine et d'hémicelluloses, renforcée par un réseau de microfibrilles cristallines isotropes parfaitement interconnectées (double enroulement croisé, Figure 1.6).

Dans ce type de modélisation (Guitard *et al*, 1999), initialement proposée pour rendre compte des déformations de maturation, la composition chimique pariétale de la sous couche S_2 n'est pas distinguée selon le type (bois initial, bois final) de cellule considérée, conformément à certaines récentes constatations chimiques (Bergander, 2001, Salmèn communication personnelle, sur *Picea abies*).

Contrairement aux modèles multicouches précédents (paragraphe 1.2.7.1), ce modèle à squelette de fibres, décrivant une double cloison virtuelle, assure directement la restriction de cisaillement interpariétale par l'intermédiaire d'un réseau dense de microfibrilles entrecroisées.

Il n'a en outre pas pour vocation de rendre compte du comportement mécanique de deux parois mitoyennes (double cloison) mais plutôt de décrire celui d'un ensemble de cinq cellules ligneuses par le comportement d'une cellule virtuelle, énergétiquement équivalente. Ce faisant, il s'agit plus d'un modèle de tissu cellulaire homogène qu'un modèle de cellule isolée.

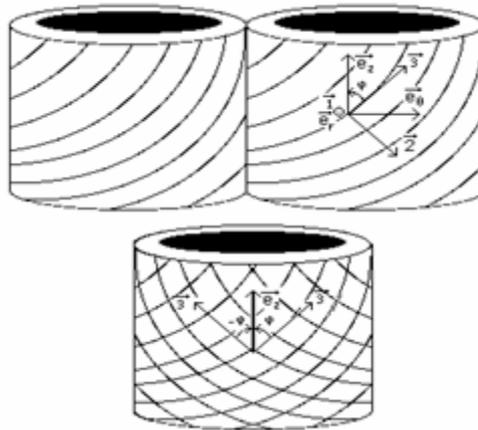


Figure 1.6 Passage de deux cellules adjacentes à enroulement hélicoïdal de microfibrilles à une cellule unique virtuelle avec double enroulement croisé, d'après le modèle de Yamamoto cité dans Guitard *et al*, 1999.

Enfin, contrairement aux stratifiés pariétaux les caractéristiques élastiques de la double cloison virtuelle sont, par construction, indépendantes de l'épaisseur du composite i.e. des caractéristiques géométriques de la cellule ligneuse (Guitard *et al*, 1999). Les propriétés élastiques de double pariétale fournies par ce modèle seront détaillées dans le chapitre 2.

Le modèle proposé par Guitard *et al* (1999) a prouvé sa pertinence quand à la prédiction des déformations résiduelles de maturation (variations dimensionnelles de la paroi au cours du processus de maturation cellulaire) tant longitudinales (DRLM) que tangentielles (DRTM) et ce à partir des mesures d'angles des microfibrilles dans S_2 . Il n'a pas été nécessaire d'envisager une paroi cellulaire multicouche pour simuler le passage du retrait au gonflement pour des angles inférieurs à 30 degrés. Cette modélisation rend ainsi compte de l'inversion de la DRLM prévue pour un angle situé entre 20 et 30 degrés, et se révèlent apte à la prédiction simultanée des DRLM et DRTM sur deux essences résineuses japonaises (*Cryptomeria Japonica* D. Don, *Chamaecyparis obtusa* Endl).

Contrairement à des propositions de schématisation multicouche de la paroi, il n'a en outre pas été nécessaire de modifier la constitution chimique des sous couches cellulaires avec l'angle des microfibrilles pour rendre compte du comportement de la cellule virtuelle lors du processus de maturation.

1.3 L'anisotropie élastique à l'échelle du tissu ligneux

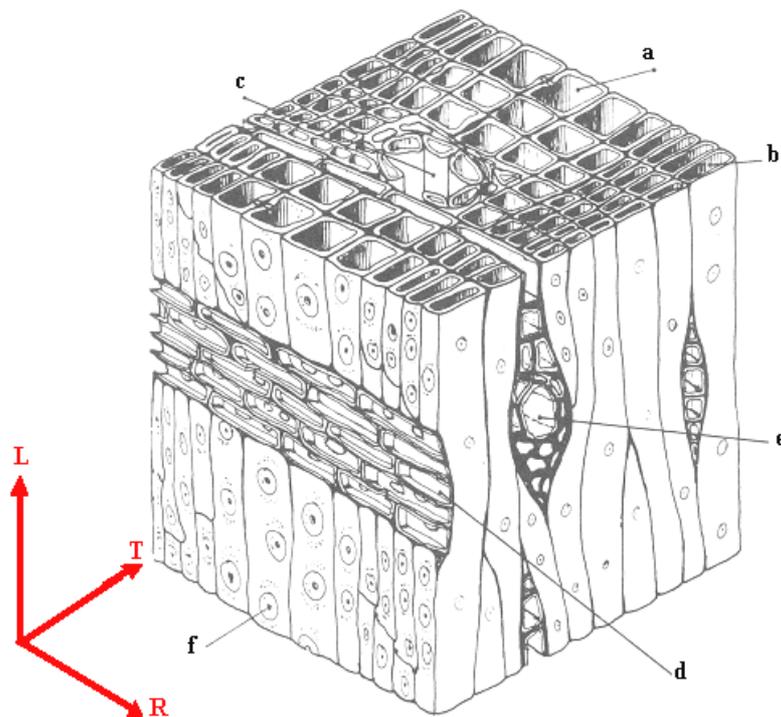


Figure 1.7 Organisation cellulaire d'un bois de résineux (Guitard, 1987)

a : trachéide dans le bois de printemps

b : trachéide dans le bois d'été

c : canal résinifère

d : rayon ligneux

e : rayon ligneux avec canal résinifère

f : ponctuation.

La nature, le nombre et l'organisation spatiale des cellules du bois peuvent être décrits par l'observation de trois coupes matérielles (LR, RT, TL) identifiées en définissant la base (\vec{R} , \vec{T} , \vec{L}) comme le repère d'orthotropie du matériau bois (Figure 1.7). Ces plans de référence décrivent le « plan ligneux » d'une espèce. Bien que l'architecture du cerne soit considérée comme un caractère systématique, quasiment invariable pour une même essence, puisque génétiquement prédéterminée, la proportion des différentes cellules qui constituent « le plan ligneux » est très fortement dépendante des conditions de croissance de l'arbre (substrat, climat,...).

A partir de différentes observations (microphotographies) et dans le cas des résineux présentant une organisation du plan ligneux relativement simple, il est possible d'assimiler le matériau bois à une structure alvéolée de type nid d'abeille.

Sous l'hypothèse d'une masse volumique de la matière ligneuse constante (i.e. assimilée à celle des parois cellulaires), le module d'Young macroscopique longitudinal (noté par la suite E_L) peut être alors évalué à partir du module élastique pariétal correspondant et de la porosité (Gibson *et al*, 1988). Ce passage micro-macro s'avère bien plus délicat dans le plan transverse. A cette échelle, et dans ce même plan de description (où les démarches d'homogénéisations apparaissent relativement complexes), la morphologie cellulaire joue un rôle important et conduit à une importante anisotropie élastique (Farruggia, 1998, Farruggia *et al*, 1996, 2000).

1.3.1 La morphologie cellulaire

Selon divers auteurs (Gillis, 1972, Gibson *et al*, 1988, Koponen *et al*, 1989, 1991, Perré *et al*, 1994, Farruggia, 1998, Farruggia *et al*, 1996, 2000, Perré, 1998, Holmberg *et al*, 1999), pour une même porosité, les propriétés élastiques transverses macroscopiques de structures tubulaires de type nids d'abeilles sont fortement variables (modules élastiques). Gillis (1972) a ainsi montré que des bois de densité proches pourront posséder des modules élastiques transverses (E_R et E_T) très différents s'ils se distinguent les uns des autres par la forme (morphologie cellulaire) ou par la disposition spatiale de leurs cellules (arrangement cellulaire).

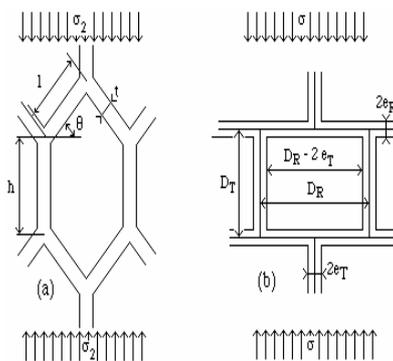


Figure 1.8 : Deux morphologies cellulaires envisagées : (a) modèle de Gibson et al (1988), (b) modèle de Guitard et al (2002)

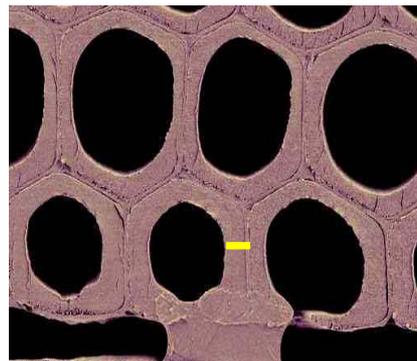


Figure 1.9 : Micrographie électronique (ESEM) montrant le cas d'une cellule hexagonale sur *P. radiata*, (d'après Donaldson, 2003) Barre d'échelle 16 μ m

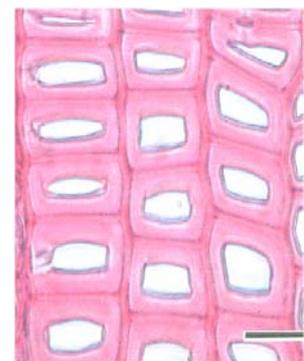


Figure 1.10 : Cellule de forme quasi rectangulaire de *P. abies* observée par double coloration safranine/ bleu alcyon (Ruelle, 2003). Barre d'échelle 25 μ m

Le tissu ligneux est ici défini comme un ensemble de cellules identiques, regroupées en réseau, et assurant dans l'arbre, la même fonction physiologique (conduction de la sève brute, fonction mécanique de support, conduction et renfort radial respectivement pour les trois cellules essentielles constituant le bois initial, le bois final et les rayons ligneux).

Pour prédire le comportement macroscopique élastique d'une structure aussi hétérogène dans sa constitution que le bois, et ce à partir de sa morphologie et des propriétés microscopiques de ses constituants, la littérature fait généralement état de nombreuses démarches de changement d'échelles (Gillis, 1972, Farruggia, 1998, Badel 1999, Badel *et al*, 1999, Perré,

1998) consistant en la représentation d'un milieu équivalent et en la construction d'un modèle applicable à ce même milieu.

De telles approches, impliquent la désignation d'une cellule ou d'un ensemble de cellules (Volume Élémentaire Représentatif) comme élément(s) unitaire(s) du milieu périodique, ce qui apparaît, à priori, assez délicat compte tenu de la variabilité intra et interspécifique de la forme géométrique de la cellule ligneuse constatée habituellement chez les résineux comme chez les feuillus (Venet *et al*, 1986, Watanabe *et al*, 1999, 2000).

1.3.1.1 Choix de la cellule unitaire comme élément architectural représentatif du tissu ligneux

Une grande variabilité de formes cellulaires

La forme microscopiquement observable des cellules de résineux peut être tour à tour approximativement rectangulaire (Keller, 1999), hexagonale (Decoux *et al*, non publié), ou variable selon le type de tissu ligneux (hexagonal et rectangulaire respectivement pour les cellules initiales et finales du bois normal de *Picea abies*, Bergander, 2001, voire presque circulaire pour les cellules de bois de compression de plusieurs essences résineuses, Timell, 1986, Ruelle, 2003). Les Figures 1.9 et 1.10 illustrent ainsi, pour deux essences résineuses (*Pinus radiata* et *Picea abies*), un exemple de morphologie cellulaire rencontrée dans le bois final dit « normal ».

Certains récents travaux (Marion, 2001, Sarèn *et al*, 2001), menés sur *Picea abies*, ont montré, par analyse d'images, une importante variabilité inter cerne de la morphologie cellulaire. L'« indice de circularité » des cellules de bois normal décroît ainsi avec l'âge de la couche d'accroissement ; la forme des lumens est proche de l'ovale près de la moelle et devient progressivement rectangulaire au fur et à mesure d'une progression radiale vers le cambium. Des précisions complémentaires sur ces évolutions morphologiques intra cerne seront fournies ultérieurement (chapitre 3).

Devant un tel éventail de formes cellulaires possibles, les modélisations du comportement mécanique tissulaire admettent donc nécessairement une morphologie cellulaire simplifiée (moyenne), n'ayant pour but que de préciser les éléments de la cellule ligneuse susceptibles de répondre à des sollicitations mécaniques spécifiques (traction, compression, flexion).

Des paramètres géométriques communs aux différents modèles de cellule ?

Les modules d'élasticité des différents tissus étant le reflet direct du comportement de la cellule à une sollicitation spécifique (traction et/ou compression, éventuellement flexion), à modules élastiques de double paroi identiques, les différences les plus notables entre les propriétés élastiques tissulaires rencontrées dans la bibliographie, proviennent donc, essentiellement, de la géométrie cellulaire adoptée dans chaque modèle.

Des modèles assimilant la morphologie cellulaire à un rectangle (modèles proposés par Navi *et al*, 1995, Holmberg *et al*, 1999, Guitard *et al*, 2002) ou à une structure hexagonale (modèles de Gibson *et al*, 1988, Koponen *et al*, 1991) conduisent ainsi chacun à des évaluations de modules élastiques de tissu sensiblement différentes (respectivement par excès et par défaut). Dans le cadre de schématisation du plan ligneux par différents réseaux de cellules hexagonales, l'épaisseur pariétale dans le coin cellulaire constitue de plus un paramètre essentiel (rôle de renfort) dans l'évaluation du module élastique tissulaire tangentiel (Watanabe *et al*, 2000).

Néanmoins, et même s'ils apparaissent de prime abord différents, les paramètres géométriques traduisant la forme générale de la cellule « moyenne » sont généralement communs (le lien est plus ou moins direct) aux schématisation de forme envisagées.

Ainsi la variable θ , du modèle hexagonal de Gibson *et al* (1988), (Figure 1.8a), ou son équivalent RCW fixé à 30 degrés dans la modélisation proposée par Koponen *et al* (1991), fournissent tous les deux une indication de l'angle entre la direction radiale R du bois et celle de l'élément de paroi soumis à une flexion lors d'un chargement tangentiel. Avec une description du plan ligneux par un nid d'abeille à élément rectangulaire (Figure 1.8b), les facteurs de forme précédents sont pris égaux à zéro dans le modèle de Guitard *et al* (2002). L'influence de ce même paramètre angulaire θ n'est néanmoins pas ignorée dans ce dernier modèle, elle est prise en compte de façon indirecte en considérant que l'épaisseur (e_R) de la paroi radiale peut être différente de l'épaisseur (e_T) de la paroi tangentielle.

On notera enfin une autre singularité du modèle à cellules rectangulaires envisagé par Guitard *et al* (2002). La longueur de paroi fléchie prise en compte est égale au diamètre (D_R) diminué de deux fois l'épaisseur de paroi (e_T), contrairement au modèle proposé par Gibson *et al*, (1988) considérant le diamètre cellulaire, indépendamment de l'épaisseur pariétale. A porosité fixée, cette différence confèrera, a priori, une plus grande rigidité au nid d'abeille tissulaire, puisque les dimensions de l'élément cellulaire soumis à la flexion sont moindres. Une étude complémentaire sur la part d'anisotropie tissulaire imputable à la flexion des parois sera donc menée plus loin (chapitre 3).

1.3.1.2 Disposition spatiale des cellules dans le plan transverse : l'arrangement cellulaire

Admettant une organisation bidimensionnelle du cerne, Khale *et al* (1994), ont décrit l'architecture du plan ligneux de résineux, à partir de microphotographies. Dans la direction radiale, les cellules (provenant de la division d'une même initiale cambiale) sont globalement alignées (elles forment en fait de petits « zig zag », combinaison de paroi orientées dans la direction radiale et dans la direction tangentielle), tandis qu'une distribution bien plus anarchique est constatée dans la direction tangentielle. Le long d'une même disposition « zig zag », les auteurs précisent que le faible nombre de paroi tendant à s'éloigner de la direction radiale permet de supposer que lors d'un chargement radial tous les efforts sont supportés par les parois disposées en prolongement les unes des autres (soumises à une telle sollicitation, les parois tangentielles ne joueraient le rôle que d'entretoise, Bergander *et al*, 2000a, 2000b, Guitard *et al*, 2002).

D'autres travaux essentiels, visant à obtenir un maillage numérique de tissu ligneux, aboutissent, sur les résineux, à ces mêmes conclusions (Perré *et al*, 98, Farruggia, 1998). On notera ici que les équations développées par l'ensemble des auteurs, à partir des théories classiques de la résistance des matériaux, ne sont que des approximations du comportement mécanique complexe du plan ligneux (lors de tout chargement, l'absence d'alignement dans la direction tangentielle induit l'existence de régions à haute concentration de contraintes).

Les Figures 1.11 et 1.12 illustrent, dans le plan transverse de deux résineux (*Pinus pinaster* et *Pinus radiata*), l'existence d'une disposition quasi ordonnée des parois cellulaires dans la direction radiale \vec{R} et d'une orientation bien plus aléatoire dans la direction tangentielle \vec{T} .

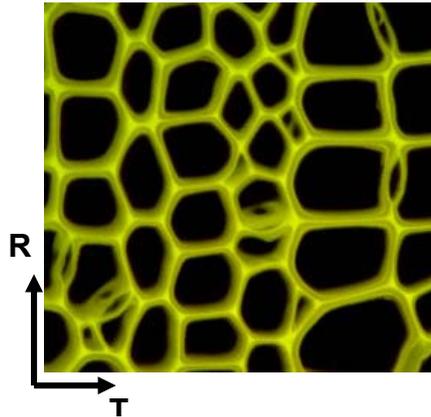


Figure 1.11 : Microscopie confocale associée à l'auto fluorescence de la lignine sur *Pinus radiata* (site internet www.forestresearch.co.nz). Fenêtre de 160*160 μm .

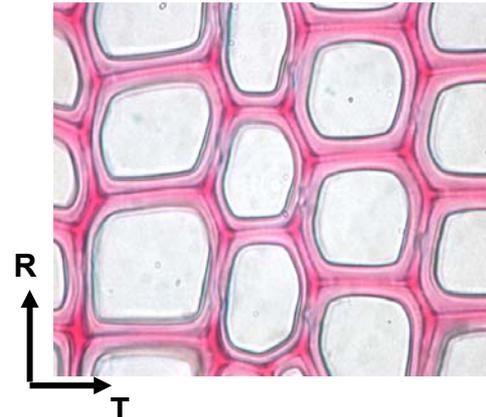


Figure 1.12 : Double coloration à la safranine bleu alcyan sur *Pinus pinaster*, (Ruelle, 2003). Barre d'échelle, 25 μm

1.3.1.3 Une estimation des modules élastiques transverses tissulaires par excès ?

Dans leurs appréciations du comportement mécanique tissulaire, la plupart des modélisations admettent le collage parfait par la lignine de deux parois cellulaires contiguës (double cloison). Dans le cadre de la cohésion de l'ensemble des cellules disposées en réseau, excluant tout mouvement entre parois voisines, la rigidité à la flexion est nettement supérieure (flexion réduite d'un facteur 4 pour une porosité de 0,64, Perré *et al*, 1994) à celle obtenue en autorisant un glissement sans frottement entre les parois de deux cellules adjacentes (permis par une lamelle mitoyenne hypothétique).

La réalité, en terme de rigidité tissulaire en flexion, se situe sans doute entre ces deux dernières propositions « limites », en raison d'une part d'une morphologie moyenne cellulaire de résineux plus fréquemment proche de l'ovale (Marion, 2001, Hunter, 2001) ou de l'hexagonal (Decoux *et al*, non publié) que du rectangulaire (Navi *et al*, 1995, Guitard *et al*, 2002), et de l'existence de lignifications différentes entre les parois radiales et tangentielles (Bosshard, 1956).

1.4 Facteurs explicatifs de l'anisotropie élastique à l'échelle du cerne de croissance

1.4.1 Le cerne assimilé à un bicouche

Sur les résineux, une coupe transversale suivant les directions radiale et tangentielle de la grume permet généralement d'observer, à l'oeil nu, les cernes de croissance dans lesquels se distingue (sur les essences de zones non tropicales) le bois initial du bois final plus dense.

Divers clichés radiographiques, illustrent ainsi, par un profil microdensitométrique (Figure 1.13), l'alternance, dans la direction radiale, de couches de bois de printemps de masse volumique moyenne voisine de $0,35 \text{ g/cm}^3$ et de bois d'été de masse volumique moyenne pouvant atteindre, voire dépasser, $0,75 \text{ g/cm}^3$ (chez les résineux, la masse volumique du bois initial est deux à trois fois inférieure à celle du bois final, Kramer *et al*, 1979).

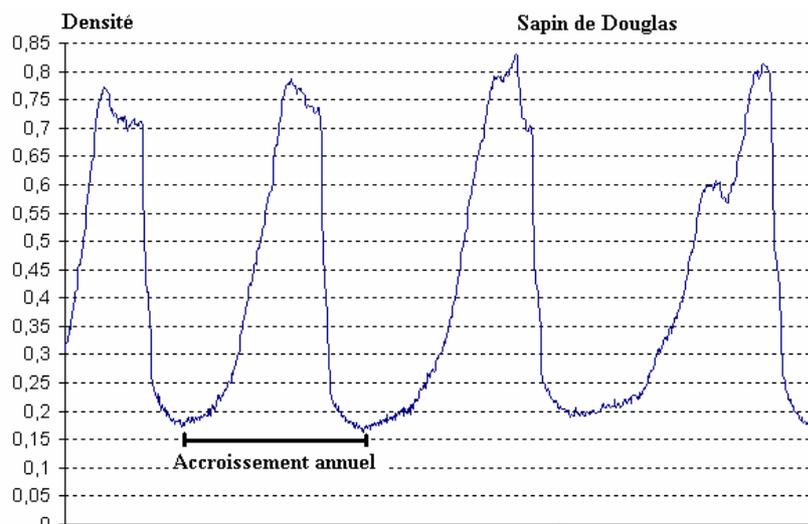


Figure 1.13 : Exemple de profil microdensitométrique obtenu sur un bois adulte de Douglas Fir (données numériques fournies par P. Rozenberg)

Une grande partie de l'anisotropie mécanique à l'échelle de la couche d'accroissement est attribuée à la présence de ces deux tissus physiologiquement spécifiques (Ylinen *et al*, 1967, Keller, 1999, Dumail, 1995, Farruggia, 1998).

1.4.1.1 Une discrétisation du cerne essentiellement fondée sur des critères technologiques

Admettant la spécificité propre des propriétés mécaniques du bois initial et final, les mécaniciens du bois utilisent un critère appelé texture, et généralement employé pour l'appréciation des qualités technologiques du matériau. D'après la norme NF B 50-002 n°42, la texture définit « le rapport de la largeur de bois d'été à la largeur totale de la couche d'accroissement ». D'un point de vue biologique, ce même paramètre est le reflet des conditions de croissance de l'arbre au cours de la saison de végétation.

Ainsi discrétisé, le cerne de croissance est assimilé à un bicouche composite, figurant la stratification en deux couches de bois initial et de bois final. Ce matériau équivalent au cerne est élaboré à partir des propriétés de ces deux tissus ligneux constitutifs, supposés biologiquement homogènes (Schniewind, 1959, 1972, Guitard *et al*, 1987, Koponen *et al*, 1991). Pour ce faire, ces deux tissus ligneux essentiels sont considérés comme deux milieux orthotropes.

1.4.2 Le rayon ligneux : un élément de renfort radial

Aux deux tissus différenciés que sont le bois initial et le bois final, il convient d'adjoindre un troisième tissu constitué des rayons ligneux, qui, bien que moins important en terme de poids relatif dans le cerne, intervient de manière essentielle dans le comportement mécanique macroscopique du matériau.

De récents travaux expérimentaux sur *Picea abies* (Farruggia *et al*, 2000 : isolement des rayons ligneux dans un échantillon de bois initial, Bergander, 2001) ont en effet confirmé le rôle mécanique des rayons ligneux à l'échelle de la couche d'accroissement comme à l'échelle du bois massif.

1.4.2.1 Mise en évidence du rôle mécanique des rayons ligneux

En associant des essais de traction sur des éprouvettes de petites dimensions, à une extensométrie optique, Schniewind (1959) a pu étudier l'influence de paramètres macroscopiques et microscopiques sur l'anisotropie élastique. Ses travaux l'ont amené à proposer une liste d'équations (inspirés de celles de Ylinen *et al*, 1967, et des travaux de Barkas, 1941), prédictives de l'anisotropie élastique macroscopique. Le formalisme introduit lui a notamment permis d'obtenir les caractéristiques élastiques du bois massif sans défaut en prenant comme variables, l'humidité, la texture et la proportion en rayons ligneux dans le cerne.

Schniewind (1959) est ainsi un des premiers auteurs à considérer que les rayons ligneux sont responsables de la rigidité radiale macroscopique. Selon lui, le module d'élasticité du cerne de croissance, exprimé dans cette même direction, peut être considéré comme une fonction linéaire de la proportion de rayons ligneux.

S'inspirant de l'hypothèse du rôle des rayons ligneux sur l'anisotropie de retrait proposée par Barkas (1941) et appuyée par Schniewind (1959), des recherches sur leur rôle dans l'anisotropie élastique ont également été menées par Guitard *et al* (1987). Ces auteurs ont repris les modèles antérieurs (Ylinen, 1954, Schniewind, 1959) en y ajoutant la contribution des rayons ligneux placés en quadrature par rapport à la disposition des tissus bois initial et final.

Pour Guitard *et al* (1987), la fraction volumique (n) en rayons ligneux est utilisée comme indicateur du degré d'anisotropie macroscopique car reliée aux modules d'élasticités du bois massif (E_R , E_T , E_L) par la relation (1.1) donnée par Barkas (1941) :

$$(1.1) \quad n = \frac{E_R - E_T}{(E_R - E_T) + (E_L - E_T)}$$

Cette même prise en compte de la fraction volumique en rayons ligneux a permis à Guitard *et al* (1987) d'améliorer une relation statistique entre les modules d'Young macroscopiques et la masse volumique (ρ) tant en ce qui concerne les résineux que les feuillus.

Deux modèles prévisionnels (résineux, feuillus) ont ainsi été établis en se basant sur l'hypothèse selon laquelle une fraction volumique en rayons ligneux importante induit un renfort radial au détriment de la rigidité longitudinale.

Chez les résineux, les modules d'élasticité du bois propre dans les directions radiale (E_R) et longitudinale (E_L), exprimés en MPa sont ainsi liés à la fraction volumique (n) en rayons ligneux et à la masse volumique ρ (en g/cm^3) par les relations statistiques (Guitard *et al*, 1987) :

$$(1.2) \quad E_L = -663 + 37200 \rho - 282n \quad \text{avec } R = 0,939$$

$$(1.3) \quad E_R = -875 + 3250 \rho + 39,6n \quad \text{avec } R = 0,932$$

Insertion du renfort radial des rayons ligneux dans le bicouche bois initial / bois final

Pour rendre compte, à l'échelle du cerne d'accroissement, du rôle mécanique de ces cellules essentielles, la démarche d'homogénéisation usuelle, consiste à les inclure sous la forme d'un renfort radial dans le bicouche bois initial / bois final. Pour ce faire, les rayons ligneux simplifiés sont assimilés à un tissu dont les propriétés mécano physiques (modules d'élasticité, densité) sont localement homogènes et aux caractéristiques anatomiques parfaitement identifiées.

Ce type d'hypothèse, naturellement indispensable à la détermination du solide homogène mécaniquement équivalent, fait, ipso facto, abstraction d'une partie de la nature réelle de la structure des rayons ligneux (section non régulière, distribution aléatoire dans le cerne, existence de gradient de propriétés mécaniques internes, Bodig *et al*, 1982, gradient intra (faible) et inter cerne de densité des rayons rapportée sur le Chêne, Guilley, 2000).

La variabilité des caractéristiques anatomiques des rayons ligneux est d'ailleurs telle qu'elle a donnée lieu à la création d'une échelle de classification (Venet *et al*, 1986) s'appuyant principalement sur leurs dimensions (longueur, diamètre).

Pour les mécaniciens, les rayons (disposés essentiellement dans la direction radiale) donc sont assimilés à des cellules homogènes dont les microfibrilles sont fortement inclinées par rapport à leur axe longitudinal propre (40 degrés, Barkas, 1941 ; 30 degrés, Barrett, 1973 ; Koponen *et al*, 1991). On leur attribue en outre des épaisseurs de paroi faibles (Barrett, 1973; Venet *et al*, 1986).

1.5 Conclusion

Les facteurs de variabilité de l'anisotropie élastique du bois normal, classiquement cités dans la littérature, ont été évoqués depuis l'échelle ultrastructurale (bio molécules) jusqu'à l'échelle du cerne. S'inspirant de cet inventaire « orienté », tout en extrayant des paramètres jugés essentiels, une modélisation multi échelles prédictive de l'anisotropie élastique peut être proposée dans la suite de l'étude.

2 Modèles multi échelles et construction du Résineux Standard Virtuel (RSV)

Un grand nombre des paramètres évoqués au chapitre précédent, susceptibles de conditionner le comportement mécanique macroscopique du bois, sont intégrés dans ce qui suit dans une modélisation prédictive déterministe. Il s'agit de modèles multi échelles permettant les Passages successifs, en terme de propriétés mécaniques (élastiques) entre les différents « angles » d'observations des hétérogénéités de la matière ligneuse ; les macromolécules essentielles, les sous couches pariétales, la double paroi cellulaire, le tissu ligneux, le cerne d'accroissement.

Dans une première partie, les éléments constitutifs d'un modèle micromécanique relativement classique, assimilant la paroi cellulaire à un assemblage multicouches, sont présentés. Une variante plus originale, faisant passer directement des macromolécules à la double paroi cellulaire virtuelle en privilégiant certains paramètres essentiels de l'ultrastructure (supramoléculaire) est proposée. Cette alternative est privilégiée dans la suite du travail.

Dans un second temps, le modèle retenu est alimenté par un jeu de paramètres dont les valeurs de départ sont suggérées par la bibliographie analysée au chapitre précédent (chapitre 1). C'est à travers un processus d'optimisation contrainte qu'est dégagé un jeu de valeurs de ces paramètres associés au « **Résineux Standard Virtuel** » noté **RSV**. Les valeurs cibles sont les trois modules d'élasticité traduisant l'anisotropie élastique ainsi que la masse volumique du résineux standard définis par Guitard (1987).

La carte d'identification du bois normal de résineux standard est discutée en fin de chapitre dans la perspective d'une extension de la démarche vers la description de bois particuliers : bois juvénile, bois de compression, ...etc.

2.1 Modèles multi échelles retenus pour décrire l'anisotropie élastique du bois de résineux

2.1.1 Le concept de modélisation multi échelles

L'objectif est de décrire les propriétés élastiques anisotropes macroscopiques du bois massif sans défaut de résineux, ceci à travers une succession de changements d'échelles :

Passage 1 : des macromolécules à la sous couche pariétale ;

Passage 2 : de la sous couche pariétale à la double cloison cellulaire ;

Passage 3 : de la double paroi cellulaire au tissu ligneux homogène ;

Passage 4 : des tissus ligneux au bois massif sans défaut.

Deux modélisations sont présentées dans les deux sous paragraphes suivants. La seconde comporte un raccourci par rapport à la première qui minimise le nombre de paramètres retenus.

2.1.2 Modèles à parois cellulaires multicouche (Multicouche)

Le modèle gigogne « Multicouche » comporte les quatre changements d'échelle, ou Passages, évoqués ci-dessus. A chaque changement d'échelle, les expressions analytiques, donnant des estimations des propriétés élastiques du solide homogène équivalent à l'échelle considérée

sont proposées en fonction des caractéristiques élastiques de l'échelle immédiatement inférieure et des paramètres retenus comme étant caractéristiques de la transition envisagée.

Les techniques d'homogénéisations restent simples, voire simplistes, elles sont basées essentiellement sur la loi des mélanges. Elles considèrent des assemblages en série ou en parallèles des sous-ensembles, l'objectif étant de prendre en compte les paramètres considérés, au mieux de ce que permettent les techniques utilisées. Chaque Passage de la modélisation gigogne constitue un « tiroir » alimenté par un jeu de paramètres d'entrée et délivrant un ensemble de paramètres de sortie. Sans changer le principe de la méthode, l'un des « tiroirs » peut être changé au profit d'un sous modèle plus performant (éventuellement plus réaliste). Le paragraphe 2.1.3, relatif au modèle Squelette, illustre ce propos.

2.1.2.1 Passage 1 : des macromolécules à la sous couche pariétale

Le Passage 1 traduit les propriétés élastiques d'une sous couche pariétale, en l'occurrence, chacune des composantes du tenseur des modules élastiques C_{ijkl} , ceci en fonction des propriétés élastiques des polymères constitutifs.

Une sous couche pariétale « s » est assimilée à un composite à renfort filamentaire constitué d'une matrice amorphe de lignine et d'hémicelluloses, supposée homogène et isotrope, renforcée par un faisceau de fibres parallèles ; les microfibrilles de cellulose fortement cristallines.

Les propriétés des constituants pris en compte sont donc :

Propriétés élastiques isotropes de la matrice ligno-cellulosique :

E^m : Module d'Young de la matrice
 ν^m : Coefficient de Poisson de la matrice

Propriétés élastiques des microfibrilles de cellulose :

E^f : Module d'élasticité longitudinal
 ν^f : Coefficient de Poisson des fibres de cellulose

Une grandeur caractéristique de ce premier changement d'échelle, quantifiant la proportion de renfort filamentaire dans le milieu bi phasique est adoptée :

V : Fraction volumique en microfibrilles.

Le solide équivalent, correspondant à la sous couche pariétale, est supposé homogène, élastique, orthotrope, et à isotropie transverse. L'expression matricielle associée au tenseur des complaisances élastiques S_{ijkl} dans un repère $(\bar{1}, \bar{2}, \bar{3})$ dont l'axe $(\bar{1})$ est colinéaire au renfort filamentaire est notée sous la forme suivante (2.1) :

$$(2.1) \quad \left(S_{ijkl}^s \right) = \begin{bmatrix} S_{11}^s & S_{12}^s & S_{12}^s & 0 & 0 & 0 \\ S_{12}^s & S_{22}^s & S_{12}^s & 0 & 0 & 0 \\ S_{12}^s & S_{23}^s & S_{22}^s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44}^s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55}^s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55}^s \end{bmatrix}$$

Dans la direction longitudinale ($\vec{1}$) de la sous couche envisagée, une association « en parallèle » de la matrice amorphe et des fibres cristallines conduit à :

$$(2.2) \quad S_{11}^s = \frac{1}{V E^f + (1-V) E^m}$$

Compte tenu de la relation d'ordre entre la rigidité des fibres cristallines (quasi indéformables) et celle de la matrice ligno cellulosique, dans les directions transverses ($\vec{2}, \vec{3}$) un arrangement de type « série » conduit à l'expression (2.3) :

$$(2.3) \quad S_{22}^s = S_{33}^s = \frac{V}{E^f} + \frac{(1-V)}{E^m} \approx \frac{(1-V)}{E^m}$$

En raison de cette même relation d'ordre, les composantes S_{23}^s et S_{44}^s de la matrice des complaisances sont évaluées par les expressions (2.4) et (2.5):

$$(2.4) \quad S_{23}^s \approx S_{23}^m = -\frac{v^m}{E^m}$$

$$(2.5) \quad S_{44}^s = \frac{(1-V)2(1+v^m)}{E^m}$$

La souplesse au cisaillement dans le plan ($\vec{1}, \vec{2}$) est estimée par la somme pondérée des souplesses au cisaillement des fibres et de la matrice :

$$(2.6) \quad S_{66}^s = S_{55}^s = V \frac{2(1+v^f)}{E^f} + (1-V) \frac{2(1+v^m)}{E^m}$$

Les seules autres composantes non nulles sont alors S_{12}^s et S_{13}^s , complaisances élastiques toutes les deux identiques sous l'hypothèse d'une isotropie transverse de sous couche (2.7) :

$$(2.7) \quad S_{12}^s = S_{13}^s = -V \frac{v^f}{E^f} - (1-V) \frac{v^m}{E^m}$$

Les formules permettant d'exprimer les composantes C_{ij} de la matrice des rigidités en fonction des composantes S_{ij} de la matrice des souplesses sont reproduites dans le Tableau 2.1.

$D = S_{11} S_{22} S_{33} + 2 S_{12} S_{23} S_{31} - S_{11} S_{23}^2 - S_{22} S_{31}^2 - S_{33} S_{12}^2$		
$C_{11} = \frac{1}{D} (S_{22} S_{33} - S_{23}^2)$	$C_{22} = \frac{1}{D} (S_{33} S_{11} - S_{31}^2)$	$C_{33} = \frac{1}{D} (S_{11} S_{22} - S_{12}^2)$
$C_{32} = C_{23} = \frac{1}{D} (S_{31} S_{12} - S_{32} S_{11})$	$C_{23} = C_{32} = \frac{1}{D} (S_{12} S_{23} - S_{13} S_{22})$	
$C_{21} = C_{12} = \frac{1}{D} (S_{23} S_{31} - S_{21} S_{33})$		
$C_{44} = \frac{1}{S_{44}}$	$C_{55} = \frac{1}{S_{55}}$	$C_{66} = \frac{1}{S_{66}}$

Tableau 2-1 Expression des modules élastiques C_{ij} en fonction des complaisances S_{ij}

2.1.2.2 Passage 2 : de la sous couche à la double paroi

Le Passage 2 conduit à l'expression des modules d'élasticité longitudinal E_{Lp} et transverses E_{Tp} de la double paroi. Ces mêmes modules élastiques, appelés par la suite modules élastiques bipariétaux, représentent des caractéristiques élastiques de tissus ligneux (chapitre 1, paragraphe 1.2.5) et non des modules élastiques de paroi.

La double paroi représente la quantité de matière comprise entre deux lumens constitutifs, elle est, dans ce premier modèle, assimilée à un stratifié multicouches comportant un nombre N de sous couches empilées.

La sous couche de rang « p » est caractérisée par :

- les modules élastiques E_{Lp} et E_{Tp} déduits du paragraphe précédent,
- l'orientation AMF φ^p , angle des microfibrilles de la sous couche (p) par rapport au grand axe de la cellule (Figure 1.1),
- l'épaisseur e^p de la sous couche considérée.

Le calcul des caractéristiques élastiques de la double paroi comporte deux étapes :

a) expressions des modules élastiques de chaque sous couche dans le référentiel de paroi

$$(2.8) \quad C_{ijkl}^P = C_{pqrs}^S \cdot \alpha_{pi}^P \cdot \alpha_{qj}^P \cdot \alpha_{rk}^P \cdot \alpha_{sl}^P$$

Les composantes α_{ij} sont celles de la matrice de changement de base faisant passer du référentiel de sous couche au référentiel de cellule :

$$(2.9) \quad \left[\alpha_{ij}^P \right] = \begin{vmatrix} c^P & -s^P & 0 \\ s^P & c^P & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

b) l'assemblage des N sous couches permet de dégager notamment les rigidités de membranes A_{ij} du multicouche, auxquelles sont associées les modules d'élasticité longitudinal et transverses de double paroi notés respectivement E_{Lp} et E_{Tp} :

en posant $c = \cos(\varphi)$, $s = \sin(\varphi)$, avec $h = \sum_{p=1}^N e^{(p)}$ l'épaisseur de la double cloison et avec $z^{(p)}$ la côte du plan moyen de rang (p) par rapport au plan du stratifié, il vient :

$$(2.10) \quad E_{Lp} \approx \frac{1}{h} \sum_{p=1}^N e^{(p)} \left\{ C_{11}^{(p)} c^{p4} + (2C_{12}^{(p)} + 4C_{66}^{(p)}) s^{p2} c^{p2} + C_{22}^{(p)} s^{p4} - \frac{(C_{13}^{(p)} c^{p2} + C_{32}^{(p)} s^{p2})^2}{C_{33}^{(p)}} \right\}$$

$$(2.11) \quad E_{Tp} \approx \frac{1}{h} \sum_{p=1}^N e^{(p)} \left\{ C_{22}^{(p)} c^{p4} + (2C_{12}^{(p)} + 4C_{66}^{(p)}) s^{p2} c^{p2} + C_{11}^{(p)} s^{p4} - \frac{(C_{13}^{(p)} s^{p2} + C_{23}^{(p)} c^{p2})^2}{C_{33}^{(p)}} \right\}$$

Cette même construction permet également d'expliciter (via les rigidités de flexion torsion) les modules équivalents de flexion torsion E_{11} et E_{22} des structures multicouches. Leurs évolutions avec certains paramètres essentiels seront détaillées plus loin (chapitre 3).

$$(2.12) \quad E_{11} \approx \frac{12}{h^3} \left\{ \sum_{p=1}^N e^{(p)} z^{(p)2} + \frac{e^{(p)3}}{12} \right\} \left\{ C_{11}^{(p)} c^{p4} + (2C_{12}^{(p)} + 4C_{66}^{(p)}) s^{p2} c^{p2} + C_{22}^{(p)} s^{p4} - \frac{(C_{13}^{(p)} c^{p2} + C_{32}^{(p)} s^{p2})^2}{C_{33}^{(p)}} \right\}$$

$$(2.13) \quad E_{22} \approx 12 \frac{D_{11}}{h^3} \approx \frac{12}{h^3} \left\{ \sum_{p=1}^N e^{(p)} z^{(p)2} + \frac{e^{(p)3}}{12} \right\} \left\{ C_{22}^{(p)} c^{p4} + (2C_{12}^{(p)} + 4C_{66}^{(p)}) s^{p2} c^{p2} + C_{11}^{(p)} s^{p4} - \frac{(C_{13}^{(p)} s^{p2} + C_{23}^{(p)} c^{p2})^2}{C_{33}^{(p)}} \right\}$$

Remarque : cette présentation du modèle ne préjuge pas du nombre N de sous couches prises en compte.

2.1.2.3 Passage 3 : de la double paroi cellulaire au tissu ligneux homogène

Le Passage 3 correspond au changement d'échelle permettant l'évaluation de la masse volumique ρ_x ainsi que les modules d'élasticité longitudinal E_L^X , radial E_R^X et tangential

E_T^x d'un tissu cellulaire « x » élaboré à partir d'un ensemble de cellules jointives supposées localement identiques.

La représentation schématique d'un tissu ligneux retenue Figure 2.1, est un nid d'abeille à cellules rectangulaires. Les données d'entrée de ce troisième changement d'échelle sont :

- les modules d'élasticité longitudinal E_{Lp} et transverse E_{Tp} , E_{Rp} de la double paroi considérée,
- les caractéristiques géométriques du tissu ligneux représentées par les diamètres radial (D_R) et tangentiel (D_T) ainsi que les épaisseurs de parois radiales (e_R) et tangentielles (e_T) de la cellule représentative du tissu.

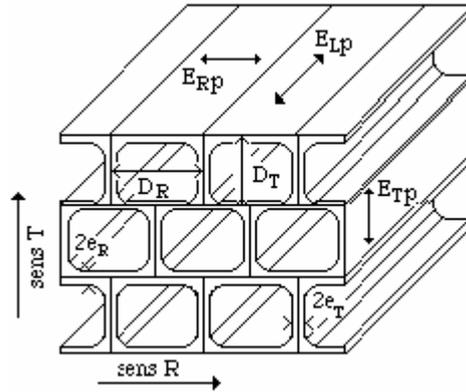


Figure 2.1 Schéma en perspective retenu pour un tissu ligneux de résineux

Quatre grandeurs sont déduites, la masse volumique tissulaire ρ_x , les modules d'élasticité tissulaire mésoscopique, longitudinal E_L^x , radial E_R^x et tangentiel E_T^x .

Nb : à cette étape de la modélisation, le qualificatif mésoscopique est employé pour distinguer les deux « catégories » de modules élastiques tissulaires ; les modules élastiques bipariétaux évoqués précédemment et les modules élastiques d'un V.E.R de chaque tissu du plan ligneux.

a) Porosité et masse volumique d'un tissu ligneux

Sous l'hypothèse couramment retenue selon laquelle la masse volumique du matériau ligneux constituant les parois cellulaires est une constante $\rho_m = 1,51 \text{ kg/m}^3$, la donnée des quatre paramètres cellulaires géométriques (D_R , D_T , e_R , e_T), retenus ici, fixe la porosité P_0 du matériau, et en conséquence la masse volumique ρ_x du tissu ligneux « x » considéré. On prendra garde dans la suite que les données géométriques tissulaires et la masse volumique ne sont pas des paramètres indépendants.

$$(2.14) \quad P_0 = \frac{\text{Vol.lumen}}{\text{Vol.Total}} = \left(\frac{(D_R - 2e_T)(D_T - 2e_R)}{D_R D_T} \right) = 1 - 2 \left[\frac{e_T}{D_R} + \frac{e_R}{D_T} - 2 \frac{e_T e_R}{D_R D_T} \right]$$

$$(2.15) \quad \rho_x = \rho_m (1 - P_0) = 2\rho_m \left[\frac{e_T}{D_R} + \frac{e_R}{D_T} - 2 \frac{e_T e_R}{D_R D_T} \right]$$

b) Evaluation du module élastique longitudinal E_L^x d'un tissu « x »

Un effort longitudinal est distribué sur une surface égale à celle de la section droite de la cellule représentative. En conséquence, le module d'élasticité longitudinale E_L^x du solide homogène équivalent au nid d'abeille, s'évalue à partir de E_{Lp} et en proportion de l'aire de la surface « mécaniquement » active de la paroi par rapport à l'aire de la section droite de cellule, soit :

$$(2.16) \quad E_L^x = \left[\frac{D_R D_T - (D_R - 2e_T)(D_T - 2e_R)}{D_R D_T} \right] E_{Lp} = 2 \left[\frac{e_T}{D_R} + \frac{e_R}{D_T} - 2 \frac{e_T e_R}{D_R D_T} \right] E_{Lp}$$

Compte tenu de l'avant dernière expression (2.14) de la masse volumique tissulaire ρ_x , (2.15) devient :

$$(2.17) \quad E_L^x = \frac{\rho_x}{\rho_m} E_{Lp}$$

Cette relation exprime la dépendance des paramètres géométriques évoquée ci-dessus en a).

c) Evaluation du module d'élasticité radial E_R^x d'un tissu « x »

Un effort appliqué suivant la direction radiale, comme représenté sur la Figure 2.2, se transmet par les parois radiales des cellules, supposées positionnées dans le prolongement les unes des autres (Khale *et al*, 1994).

En conséquence, le module élastique radial E_R^x , du solide homogène équivalent se déduit du module d'élasticité transverse E_{Tp} de la double paroi dans le rapport de l'épaisseur de la double paroi radiale ($2e_R$) au diamètre tangentiel (D_T) :

$$(2.18) \quad E_R^x = \frac{2e_R}{D_T} E_{Tp}$$

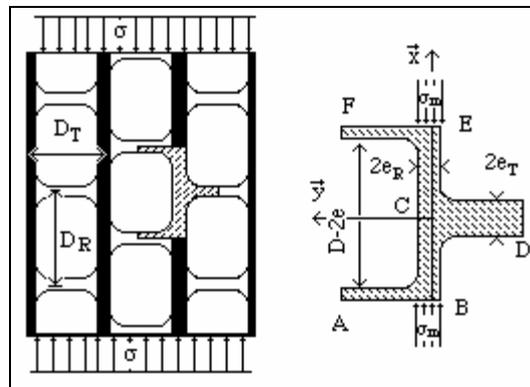


Figure 2.2 Illustration de la distribution des efforts dans le cas d'un chargement radial

d) Evaluation du module élastique tangentiel E_T^X d'un tissu « x »

Un effort appliqué suivant la direction tangentielle comme précisé sur la Figure 2.3, se transmet par les parois radiales mais aussi par les parois tangentielles des cellules, du fait de la disposition en quinconces de celles-ci. Les éléments de paroi tangentiels (AB, CD, EF, Figure 2.3) travaillent en traction compression de façon analogue aux sollicitations décrites dans le paragraphe précédent. De plus, l'élément de paroi radiale (BCE, Figure 2.3) travaille en « flexion trois points ».

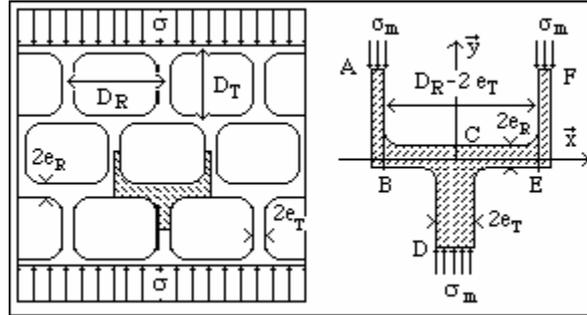


Figure 2.3 Illustration de la distribution des efforts dans le cas d'un chargement tangentiel

Les assemblages de rigidités sont réalisés de la façon suivante ; les éléments AB et EF, assemblés en parallèles sont associés en série avec les éléments BCE et CD. En conséquence, le module élastique tangentiel E_T^X du solide homogène élastique équivalent s'écrit comme la somme de deux termes :

$$(2.19) \quad \frac{1}{E_T^X} = \frac{1}{2E_{Tp}} \frac{D_R}{e_T} + \frac{1}{128.E_{Rp}} \frac{D_R}{D_T} \frac{(D_R - 2e_T)^3}{e_R^3}$$

Le premier terme du second membre, comparable à l'expression (2.18), correspond aux éléments travaillant en traction compression, tandis que le second terme est relatif à l'élément travaillant en flexion (poutre de largeur unité et de hauteur $2e_R$ « encastée » aux deux extrémités).

$$(2.20) \quad \frac{1}{E_T^X} = \frac{1}{2.E_{Tp}} \frac{D_R}{e_T} \left[1 + \frac{1}{64} \frac{E_{Tp}}{E_{Rp}} \frac{e_T}{D_T} \frac{(D_R - 2e_T)^3}{e_R^3} \right]$$

Les configurations cellulaires choisies (directement inspirées de microphotographies de résineux), illustrées sur les Figures 2.1, 2.2 et 2.3, correspondent respectivement à des alignements des parois radiales et à des dispositions en quinconce des parois tangentielles (Bodig *et al*, 1982, Khale *et al*, 1994, Bergander *et al*, 2000). Il s'agit de situations extrêmes qui donnent des estimations respectives par excès du module radial E_R^X et par défaut du module tangentiel E_T^X .

2.1.2.4 Passage 4 : des tissus ligneux au bois propre

Le cerne de croissance d'un résineux est assimilé à un composite de trois tissus ligneux ; le bois initial (bois de printemps), le bois final (bois d'été) et les rayons ligneux.

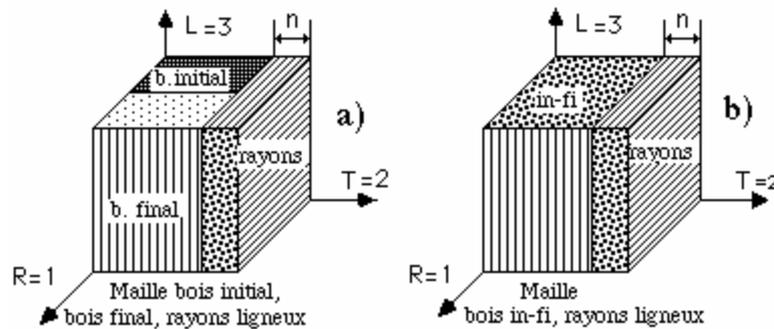


Figure 2.4 : Schéma d'un volume élémentaire de cerne de croissance : a) constitué de trois tissus ; b) en deux tissus après homogénéisation des bois initial et final.

La maille élémentaire représentative d'un cerne de croissance est constituée d'un cube, limité par les faces perpendiculaires respectivement à chacun des axes d'orthotropie (\vec{R} , \vec{T} , \vec{L}) du matériau. L'arête du cube élémentaire est égale à la largeur de cerne.

Le Passage 4 assure donc le changement d'échelle entre les trois tissus ligneux constitutifs et le cerne de croissance.

Les variables d'entrée sont les caractéristiques élastiques de chacun des trois tissus constitutifs, à savoir : les trois modules d'élasticité longitudinal E_L^X , radial E_R^X et tangentiel E_T^X .

Les paramètres complémentaires sont spécifiques de l'organisation des tissus ligneux dans le cerne :

- la texture T_X , rapport de l'épaisseur de bois final à la largeur de cerne, caractérise la proportion bois initial et de bois final,
- la fraction volumique en rayon ligneux, notée n , définit la proportion de ce tissu par rapport à l'ensemble des tissus constitutifs.

Le Passage 4 est assuré en deux phases successives :

- Homogénéisation selon le sens radial du bois initial et du bois final

L'épaisseur du cerne (e) est assimilée à un bicouche, de bois initial formé en début de croissance, suivi d'une couche de bois final.

Le solide homogène élastique anisotrope équivalent est noté « infi », les modules élastiques correspondants sont évalués par la loi des mélanges, en considérant des assemblages série et des assemblages parallèles.

Suivant la direction radiale, les rigidités radiales E_R^{ini} , E_R^{fin} du bois initial et du bois final sont en série, en conséquence, les souplesses s'additionnent au prorata des épaisseurs :

$$(2.21) \quad \frac{1}{E_R^{infi}} = \frac{(1 - T_x)}{E_R^{ini}} + \frac{T_x}{E_R^{fin}}$$

Suivant la direction tangentielle, les rigidités tangentielles E_T^{ini} , E_T^{fin} du bois initial et du bois final sont en parallèle, en conséquence, les rigidités s'additionnent également au prorata des épaisseurs :

$$(2.22) \quad E_T^{infi} = (1 - T_x)E_T^{ini} + T_x E_T^{fin}$$

Suivant la direction longitudinale, les rigidités longitudinales E_L^{ini} , E_L^{fin} du bois initial et du bois final sont en parallèle, en conséquence, les rigidités s'additionnent au prorata des épaisseurs :

$$(2.23) \quad E_L^{infi} = (1 - T_x)E_L^{ini} + T_x E_L^{fin}$$

b) Homogénéisations selon le sens tangentiel du bois « infi » et des rayons ligneux

Il s'agit de caractériser l'assemblage du tissu « infi » décrit au paragraphe précédent et des rayons ligneux considérés comme un tissu ligneux spécifique.

Suivant la direction radiale, la disposition en parallèle des tissus entraîne que la rigidité radiale E_R^{infi} du bois « infi » et la rigidité radiale E_R^{Rayon} des rayons ligneux s'additionnent selon:

$$(2.24) \quad E_R = (1-n) E_R^{infi} + n E_R^{Rayon}$$

Suivant la direction tangentielle, la disposition en série des tissus fait que la souplesse tangentielle $\frac{1}{E_T^{infi}}$ du bois « infi » et la souplesse tangentielle $\frac{1}{E_T^{Rayon}}$ des rayons ligneux s'additionnent selon :

$$(2.25) \quad \frac{1}{E_T} = \frac{(1-n)}{E_T^{infi}} + \frac{n}{E_T^{Rayon}}$$

Suivant la direction longitudinale, la disposition en parallèle des tissus fait que la rigidité longitudinale E_L^{infi} du bois « infi » et la rigidité longitudinale des rayons ligneux E_L^{Rayon} s'additionnent selon :

$$(2.26) \quad E_L = (1-n) E_L^{\text{infi}} + n E_L^{\text{Rayon}}$$

Les relations (2.24), (2.25) et (2.26) expriment ainsi les modules d'élasticité homogénéisés E_R , E_T et E_L du Bois propre en fonction des modules d'élasticité homogénéisés du bicouche « infi », E_R^{infi} , E_T^{infi} , E_L^{infi} et des modules d'élasticité du tissu rayon ligneux, E_R^{Rayon} , E_T^{Rayon} et E_L^{Rayon} compte tenu de la fraction volumique en rayons ligneux n .

Trois tissus ligneux constituent le cerne de croissance dont la composition est réglée par deux paramètres, la texture (T_X) qui fixe la proportion de bois initial et de bois final et la fraction volumique (n) en rayon ligneux. A l'instar des tissus bois initial et bois final, les cellules de rayons sont caractérisées ici par un jeu de quatre paramètres géométriques ; épaisseurs (radiale et tangentielle) et diamètres (radial et tangentiel).

2.1.2.5 Conclusion sur les modélisations M1 et M2

Les relations (2.1) à (2.26) assurent les quatre changements d'échelles (Passages) considérées au paragraphe 2.1.1. On remarquera que la double paroi cellulaire est un multicouche dont le nombre N de sous couches est laissé à l'appréciation de l'utilisateur. Nous discuterons par la suite et dans le chapitre 3, de deux configurations particulières de la modélisation Multicouche:

- le modèle M1 comportant deux sous couches S_2 ,
- le modèle M2 comportant neuf sous couches (neuf plis).

2.1.3 Modèle à squelette de microfibrilles (Squelette)

Le modèle M3 à squelette de microfibrilles est directement inspiré des travaux discutés précédemment. Cette modélisation diffère de la précédente (paragraphe 2.1.2) en ce que les deux premiers Passages (Passage 1, des macromolécules à la sous couche pariétale ; Passage 2, de la sous couche à la double paroi cellulaire) sont fusionnés en un seul changement d'échelle noté Passage 1-2. Le Passage 1-2 conduit directement des propriétés des macromolécules à celles de la double paroi cellulaire. Les caractéristiques de la sous couche S_2 sont ici privilégiées, notamment en ce qui concerne l'orientation des microfibrilles (φ). Les caractéristiques et la vocation de cette modélisation ont été évoquées au chapitre 1.

2.1.3.1 Passage 1-2 : des macromolécules à la double paroi virtuelle

Comme au paragraphe précédent, (2.1.2.1), les propriétés des constituants pris en compte sont :

- les propriétés élastiques isotropes de la matrice (Module d'Young E^m , coefficient de Poisson ν^m),

- les propriétés élastiques des microfibrilles de cellulose (Module d'élasticité longitudinal E^f , coefficient de Poisson ν^f),
- la proportion de renfort filamentaire décrite par la fraction volumique en microfibrilles V ,
- l'angle des microfibrilles (noté dans ce modèle φ) de la sous couche S_2 du tissu ligneux considéré.

Les modules élastiques bipariétaux longitudinal E_{Lp} et transverse E_{Tp} sont évalués en fonction de ces paramètres micromécaniques, comme indiqué par les relations (2.27) et (2.28).

$$(2.27) \quad E_{Lp} = (1 - V) \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} E^m + V (1 - s^4) E^f$$

$$(2.28) \quad E_{Tp} = E_{Rp} = (1 - V) \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} E^m + V (1 - c^4) E^f$$

2.1.4 Nombre total de paramètres structuraux retenus

A chaque niveau de description (ultra structural, tissulaire ou à l'échelle du cerne) est associé un jeu de paramètres bio mécaniques et/ou bio structuraux. Lorsqu'ils sont pris en compte dans chacune des différentes modélisations détaillées ici, ces ensembles de paramètres se révèlent aptes à rendre compte, localement, de l'anisotropie élastique. A l'échelle macroscopique, l'anisotropie élastique du bois sans défaut est décrite, par un empilement gigogne de différents niveaux d'hétérogénéités (démarche micro macro, synopsis Figure 2.5). Dans ce cadre, il est possible de dresser un inventaire du nombre total de paramètres nécessaires à la modélisation pyramidale envisagée (Tableau 2.2).

2.1.4.1 Recensement du nombre de paramètres utiles à une description de l'anisotropie élastique bipariétale

La première partie du Tableau 2.2 (colonnes A et B), fait l'inventaire du nombre de paramètres micromécaniques ou microstructuraux nécessaires aux Passages 1, 2 et 1-2.

L'examen des deux colonnes A et B, montre que le nombre de variables d'entrées, utiles à une description du comportement élastique de la double cloison par celui d'un Multicouches à fibres parallèles est directement lié aux nombres N de sous couches pariétales empilées ($7N$ pour N sous couches). Un bicouche simple (M1) formé de l'empilement de deux sous couches S_2 fera ainsi appel à 14 paramètres descriptifs, un 9 couches (M2) plus complexe (4 sous couches S_1 pour traduire au mieux l'existence d'un réseau de microfibrilles croisées dans une sous couche S_1 , 2 sous couches S_2 , 2 sous couches S_3 et une lamelle mitoyenne composée) ne nécessitera pas moins de 67 paramètres micromécaniques.

On rappelle de plus ici que le comportement isotrope des fibres cellulosiques, envisagé dans de tels modèles, tend bien évidemment à minimiser le nombre de paramètres micromécaniques.

2.1.4.2 Importance du Passage 2 sur le nombre total de paramètres bio structuraux retenus dans une description gigogne de l'anisotropie élastique du bois normal

La colonne C récapitule le nombre de paramètres nécessaires à la description de l'anisotropie élastique tissulaire, tandis que la colonne D du Tableau 2.2 résume le nombre de paramètres nécessaires à une description de l'anisotropie élastique macroscopique du matériau bois.

L'étape de transition d'un comportement mécanique de sous couche à celui de la double cloison (Passage 2, colonne B) se révèle particulièrement importante. Pour les deux derniers Passages, dans le cadre de l'utilisation d'un multicouche « N-couches » à fibres parallèles disjointes, le nombre total de paramètres utiles à la description de l'anisotropie élastique tissulaire est $7N+4$, il s'élève à $21N+14$ à l'étape finale macroscopique (colonne D).

Dans le cadre du modèle bicouche M1 l'anisotropie élastique macroscopique est alors décrite par un jeu de 56 éléments, ce jeu de paramètres passe à 189 pour un 9 couches M2. Le modèle Squelette M3 ne nécessite quand à lui « que » 22 paramètres.

Pour cette raison le choix de telle ou telle option de description de la double paroi (Multicouches ou Squelette), en regard de critères spécifiques (valeurs cibles de modules longitudinal E_{Lp} et transverse E_{Tp} , E_{Rp} , réalisme cytologique) sera discuté plus loin (chapitre 3).

			A	B	C	D
			Passage 1	Passage 2	Passage 3	Passage 4
			Sous couche	Double paroi à N sous couches	Tissu ligneux	Bois propre
Paramètres ultrastructuraux	Module d'Young de la matrice	E^m	1	N	N	3N
	Coefficient de Poisson de la matrice	ν^m	1	N	N	3N
	Module d'Young des microfibrilles	E^f	1	N	N	3N
	Coefficient de Poisson des microfibrilles	ν^f	1	N	N	3N
	% de microfibrilles	V	1	N	N	3N
Paramètres de la sous couche pariétale	Angle des microfibrilles dans S_2	φ		N	N	3N
	Epaisseurs de sous couches	$e^{(p)}$		N	N	3N
Paramètres de la géométrie cellulaire dans un tissu	Diamètres cellulaires	D_R			2	6
		D_T				
Paramètres caractéristiques du cerne	Texture	e_R			2	6
		e_T				
Paramètres caractéristiques du cerne	Texture	T_X				1
	% en rayons ligneux	n				1
Nombre de paramètres nécessaires à la modélisation gigogne	Nombre total de paramètres pour N sous couches à fibres parallèles		5	7N	7N+4	21N+14
	Hypothèse du bicouche M1			14	18	56
	Hypothèse du 9 couches M2			63	67	189
	Hypothèse du Squelette de fibres entrecroisées M3		5	6	10	22

Tableau 2-2 Tableau récapitulatif du nombre de paramètres nécessaires à une modélisation multi échelles de l'anisotropie élastique

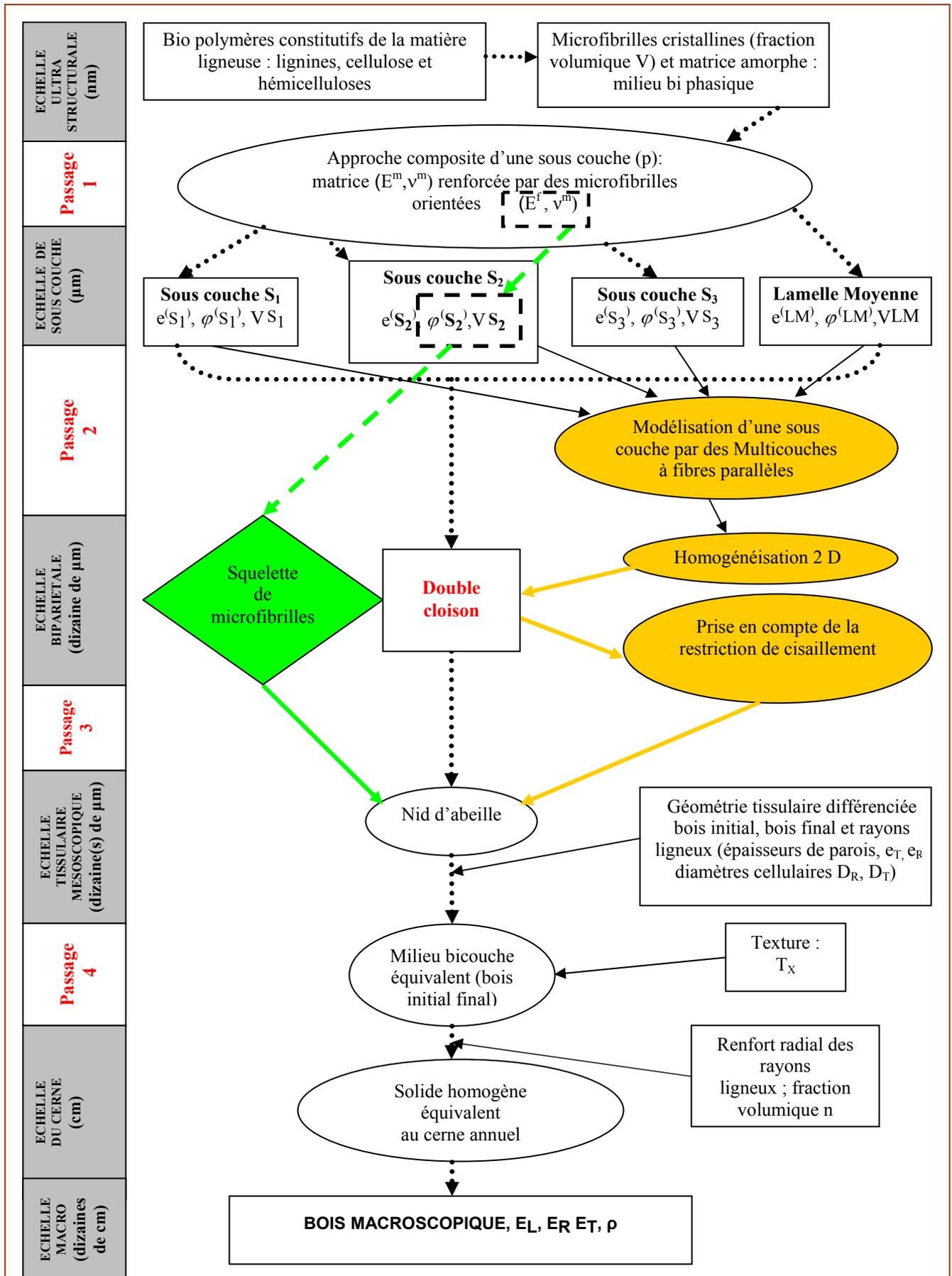


Figure 2.5 : Voies de passages micro macro et « options » de la modélisation gignone envisagée

2.2 Construction du Résineux Standard Virtuel

On soulignera ici, que les homogénéisations prédictives mises en œuvre à chaque niveau d'hétérogénéité du matériau bois, ne constituent certainement pas des solutions optimales à la recherche des propriétés élastiques des solides homogènes équivalents. Elles répondent toutefois à l'objectif de ce travail qui est moins de prévoir, avec une précision sévère, les propriétés du matériau bois à partir de celles de ses constituants, que de rendre compte avec pertinence de l'influence des différents paramètres pris en compte, sur le comportement macroscopiquement observable, ceci à des fins de hiérarchisation de l'influence de ces paramètres.

2.2.1 Validation des modèles prévisionnels de l'anisotropie élastique

Valider la pertinence de la pyramide des modèles introduits précédemment pose deux classes de problèmes. Il convient, d'une part, de disposer de valeurs cibles cohérentes des propriétés macroscopiques élastiques que la modélisation est sensée simuler et il faut, d'autre part, choisir un jeu réaliste de l'ensemble des paramètres utilisés par les différents modèles.

2.2.1.1 Des propriétés matérielles cibles

La masse volumique du bois résineux standard

Conformément aux propositions de Guitard (1987), la masse volumique ρ du résineux standard, première valeur cible de l'optimisation, est fixée à $0,45\text{g/cm}^3$.

Sachant que la masse volumique de chacun des tissus (ρ_{initial} , ρ_{final} , ρ_{rayon}) est fixée par la donnée des paramètres géométriques de chacun de ceux-ci, la contrainte sur la masse volumique du bois ρ_b est satisfaite en considérant que la fraction volumique en rayons ligneux (n) et la texture (T_x) sont tels que :

$$(2.29) \quad \rho_b = (1-n) \rho_{\text{infi}} + n \rho_{\text{rayon}}$$

$$(2.30) \quad \rho_{\text{infi}} = (1-T_x) \rho_{\text{initial}} + T_x \rho_{\text{final}}$$

Etant donnée que la masse volumique du bois ρ_b est fixée, que (n) est donnée et que ρ_{rayon} est calculé, la relation (2.29) implique ρ_{infi} . De plus, ρ_{initial} et ρ_{final} ayant été calculées, alors la relation (2.30) implique la texture (T_x). Tout ceci suppose que les données choisies soient réalistes « biologiquement » pour conduire à des résultats cohérents.

Des propriétés élastiques cibles

Les caractéristiques élastiques utilisées comme cibles pour valider la modélisation sont celles du « résineux standard ». Il s'agit des propriétés élastiques d'un bois résineux, stabilisé à un taux d'humidité de 12 % et de masse volumique $\rho = 0,45\text{ g/cm}^3$, statistiquement représentatif d'une banque de données expérimentales relatives à 38 essences résineuses (Guitard, 1987).

Les caractéristiques retenues sont les modules d'élasticité suivant les trois directions d'orthotropie du bois, soit :

$E_R = 1,00\text{ GPa}$	Module d'élasticité radial
$E_T = 0,636\text{ GPa}$	Module d'élasticité tangentiel
$E_L = 13,1\text{ GPa}$	Module d'élasticité longitudinal

Les rapports d'anisotropie élastique $E_L / E_R = 13,1$ et $E_R / E_T = 1,57$, bien que redondants, sont de même considérés.

A des fins de comparaison, avec les modules élastiques du résineux standard, les propriétés élastiques modélisées, correspondant à un bois vert, sont corrigées en humidité et ramenées du point de saturation des fibres, estimé ici à $H_{PSF} = 30\%$ à l'humidité de référence $H = 12\%$, moyennant les relations données dans Guitard (1987).

Une base de données de paramètres structuraux

Le Tableau 2.3 regroupe, pour des essences résineuses, une partie des valeurs de différents paramètres considérés, extraites des travaux discutés au chapitre 1. D'autres données, tirés d'examens microdensitométriques ou par planimétrie sont reportées dans le Tableau 2.6. Sur cette base pluridisciplinaire, un jeu de paramètres de départ a été défini. Les valeurs initiales choisies sont reportées dans la colonne A des Tableaux 2.4 et 2.5

L'optimisation dont il est ici rendu compte a été conduite sous deux types de contraintes :

Les angles des microfibrilles (φ) de la sous couche S_2 des tissus ligneux présents à l'intérieur du cerne ont été forcés, de telle sorte qu'ils diffèrent et soient situés dans l'intervalle compris entre 5 et 10 degrés pour le bois final et supérieurs à 20 degrés pour le bois initial (Barrett, 1973, Sahlberg *et al*, 1997, Herman *et al*, 1999).

La masse volumique doit être celle choisie comme représentative du résineux standard.

2.2.2 Résultats et discussions

2.2.2.1 Procédures d'optimisation des paramètres structuraux

L'ensemble des relations introduites dans les paragraphes précédents sont aisément saisies puis traitées sur un tableur numérique de type Excel. Les différentes estimations de propriétés élastiques arrondies à trois chiffres significatifs, ainsi que les valeurs des paramètres qui ont permis de les obtenir sont répertoriées dans les colonnes A à F des Tableaux 2.4 et 2.5. L'analyse des résultats obtenus à chaque étape, suggère des modifications des valeurs numériques assignées aux paramètres pour l'étape suivante. Cette procédure d'optimisation empirique, quelque peu archaïque, a été préférée à une méthode mathématique qui aurait conduit plus rapidement mais en aveugle, au jeu de paramètres optimisés. Elle a été facilitée par une automatisation complémentaire issue d'un programme élémentaire réalisé sous MATLAB.

Les discussions et commentaires qui suivent, illustrent l'intérêt de la démarche, notamment sur le plan pédagogique et méthodologique.

Tableau 2-3 : Paramètres structuraux et ultrastructuraux issus de la littérature. * signifie données ne permettant pas de distinguer le bois initial (BI) du bois final (BF).

		Auteurs	Srinivasan (1941) dans Mark (1967)	Schniewind (1959)	Sakurada <i>et al</i> (1962)	Mark (1967)	Fengel (1968), Fengel <i>et al</i> , (1976)	Gillis (1969)	Barrett (1973)	Cave (1976)	Panshin <i>et al</i> (1980)	Bodig <i>et al</i> (1982)	Roland <i>et al</i> (1982)	Siau (1984)	Norimoto (1986) dans Gril (1987)	Salmen <i>et al</i> (1986)	Gril (1987)	Koponen (1989-1991)	Labbabi (1995) sur Epicéa	Navi <i>et al</i> (1995) sur Sitka Spruce	Botosso (1997)	Farruggia (1998) sur Epicéa	Guitard <i>et al</i> (1999)	Keller (1999)	Benoit et Dirol (2000)	Yamamoto <i>et al</i> (2001)	Guitard <i>et al</i> (2002) RSV
Paramètres de l'ultra structure ligneuse	E ^m GPa	2	-	-	1,23 et 2,04	-	-	2	-	-	-	2	-	-	2	-	1,8	-	-	-	-	-	1,2	-	-	1,2	2
	v ^m	-	-	-	0,3	-	0,3	0,3	-	-	-	0,3	-	-	-	0,3	0,3	-	-	-	-	-	0,3	-	-	-	0,3
	V %	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	-	50	-	-	-	-	-	40	-	-	40	50
	E ^f GPa	-	-	137	137	-	246	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	-	-	40	62
Paramètres de sous couche S ₂	BI φ ₃ (°)	-	-	-	30 à 50	-	-	40	15 à 30	10 à 30	-	10	30	-	20	-	10 à 40	-	30 à 50	20	-	-	-	-	-	-	22
	BF φ ₁ (°)	-	-	-	10 à 30	10 à 30	-	10	15 à 30	10 à 30	-	10	10	-	20	-	0 à 30	-	15 à 30	20	-	-	-	-	-	-	5,9
Paramètres du réseau cellulaire	BI	D _{Ti} (μm)	-	-	-	25 à 38	-	36	-	30 à 45	-	-	15 à 80	-	-	-	-	-	38	-	25	-	-	-	20 à 60	-	30
		D _{Ri} (μm)	-	-	-	30 à 50	-	34	-	-	-	-	35	-	-	-	30	-	53	-	34	-	-	-	-	-	37,5
		e _{Ti} (μm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 à 2	-	1-5*	-	1 à 2	-	3,4	-	3	-	-	-	-	-	1,07
		e _{Ri} (μm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1 à 2	-	1-5*	-	1 à 2	-	3,4	-	4	-	-	-	-	-	0,85
	BF	D _{Tf} (μm)	-	-	-	23 à 38	-	36	-	30 à 45	-	-	15 à 80	-	-	-	30	-	36	-	60	-	-	-	20 à 60	-	35
		D _{Rf} (μm)	-	-	-	13 à 24	-	16	-	-	-	-	35	-	-	-	10	-	25	-	18	-	-	-	-	-	15
		e _{Tf} (μm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3 à 8	-	1-5*	-	4 à 5	-	4,4	-	9	-	-	-	-	-	2,87
		e _{Rf} (μm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3 à 8	-	1-5*	-	4 à 5	-	4,4	-	9	-	-	-	-	-	2,87
Paramètres du cerne	n %	-	17	-	-	-	-	6	-	7	5	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	6	-	3 à 12	-	-	2
	Tx %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	≤ 50	≤ 30	-	51,2

Vers un jeu de paramètres caractéristiques du résineux standard

La colonne A du Tableau 2.4 correspond au jeu initial des paramètres structuraux. Ces premiers résultats suggèrent trois remarques essentielles :

- le module d'élasticité longitudinal $E_L = 8,16$ GPa est 40% plus faible que la valeur cible,
- la texture (T_X) de l'ordre de 4% est anormalement basse en regard de la biologie (Keller, 1999) bien que déjà rencontrées dans des propositions plus mécaniciennes (Khale *et al*, 1994),
- les rapports d'anisotropie obtenus ne sont pas réalistes.

Un premier ajustement a été d'augmenter la rigidité (E^f) des microfibrilles, en proportion du déficit constaté sur la valeur de E_L . L'efficacité de ceci est traduite dans la colonne B où la valeur de E_L est fixée à 12,9 GPa.

Une masse volumique de bois initial de $\rho_{\text{initial}} = 0,44$ g/cm³ est trop élevée. En référence à divers profils microdensitométriques (fournis par P. Rozenberg) qui indiquent une valeur inférieure à 0,3g/cm³ (un exemple sur le Sapin de Douglas est illustré sur la Figure 1.13 du chapitre 1), la seconde modification a porté sur une diminution de l'épaisseur pariétale du bois initial, à diamètre cellulaire inchangé. L'incidence de cette seconde modification est illustrée en colonne C. Il en résulte une texture plus réaliste et la relation d'ordre entre les modules d'élasticité (E_L , E_R , E_T) est maintenant respectée. Si l'estimation de E_L est satisfaisante, celle de E_T et surtout E_R sont encore très supérieures aux valeurs cibles, respectivement, de 20 et de 75 %.

A travers les résultats de la colonne D, c'est la sensibilité de la modélisation à l'angle des microfibrilles (φ) dans S_2 qui est illustrée. La troisième modification envisagée porte sur l'AMF de la seule paroi de bois final, qui passe de $\varphi = 10$ à 8,5 degrés.

La sensibilité des caractéristiques élastiques à ce paramètre est très forte. Une réduction de 1,5 degré de l'AMF dans S_2 , (depuis 10 degrés), induit une diminution de 11% de E_R et de 18% de E_T . Le module E_L est en revanche pratiquement insensible à cette modification.

2.2.2.2 Commentaires sur les paramètres optimisés.

La colonne E des Tableaux 2.4 et 2.5 rend compte d'un jeu de paramètres structuraux optimisés, obtenus moyennant le critère d'un écart relatif de chaque constante élastique calculée à la valeur cible correspondante, inférieur à 1%. Les contraintes étant celles indiquées au paragraphe 2.2.1.1, à savoir une masse volumique du bois fixée et un AMF (φ) significativement différent dans le bois initial et dans le bois final.

Une première remarque porte sur le module d'élasticité des microfibrilles, dont la valeur optimisée est sensiblement la moitié du module d'élasticité de 134 GPa affiché par Sakurada *et al* (1962). Deux commentaires explicatifs permettent de justifier cette différence.

En premier lieu, la modélisation micromécanique du renforcement de la paroi cellulaire par des microfibrilles de cellulose que nous utilisons ici (Guitard *et al*, 1999, 2002), défini par les

relations (2.25) et (2.26), diffère des modèles classiquement mis en œuvre pour évaluer les propriétés des fibres, par méthode inverse, à partir de mesures de rigidité de tissus ligneux. Notre modèle assure la « restriction » du cisaillement induit entre deux cellules voisines vraies, en envisageant une cellule élémentaire fictive constituée d'un squelette tridimensionnel de microfibrilles noyé dans une matrice amorphe. Ce modèle est rigidifiant en regard de celui d'une structure multicouche renforcée par des nappes de fibres parallèles disjointes. Il assure notamment la rigidification du module d'élasticité transverse avec l'augmentation de l'AMF (ce point sera discuté dans le chapitre 3).

En second lieu, on rappellera ici qu'un module de 130 GPa est une évaluation des propriétés élastiques de la cristallite de cellulose obtenue par des mesures de déplacement de plans réticulaires par diffraction rayons X, mesure dont la représentativité a déjà été évoquée au chapitre 1.

Ces deux arguments convergent ici pour expliquer que le module élastique apparent optimisé des microfibrilles soit plus faible que le module de fibrilles purement cristallines.

Le bois « virtuel » correspondant à ce jeu de paramètres est fortement hétérogène quand à la masse volumique des tissus constitutifs, avec $0,73 \text{ g/cm}^3$ pour le bois final et $0,167 \text{ g/cm}^3$ pour le bois initial, en accord avec les divers profils microdensitométriques déjà évoqués.

Une seconde hétérogénéité tient à la différence d'angle des microfibrilles, avec une valeur d'AMF de 22 degrés pour le bois initial contre 5,9 degrés pour le bois final. Notons que ceci répond à l'une des contraintes imposées lors du processus d'optimisation.

La différence d'ovalisation des cellules entre bois initial et bois final est un troisième facteur d'hétérogénéité. Le rapport géométrique D_R / D_T évolue en effet de 1,25 pour le bois initial à 0,43 pour le bois final. Ce résultat est sensiblement conforme à ce que suggère la littérature (Marion, 2001, Sarèn *et al*, 2001).

Les paramètres de cerne, une texture de l'ordre de 50 % et une fraction volumique en rayons ligneux de 2%, fixent les proportions des tissus ligneux constitutifs du cerne. Avec 2%, la proportion en rayons ligneux (n) est probablement une valeur un peu faible.

En conclusion, le jeu de paramètres optimisés de la colonne E constitue un ensemble cohérent susceptible de caractériser un bois résineux virtuel de référence.

On remarque ici, en référence aux relevés planimétriques du Tableau 2.6, que les différentes masses volumiques tissulaires ρ_{initial} et ρ_{final} affichées par cette optimisation doivent être considérées comme des valeurs extrêmes qui demeurent néanmoins admissibles par la prise en compte, dans le modèle RSV d'une texture fixée à 0,512.

2.2.2.3 Multiplicité des solutions

Un second jeu de paramètres optimisés, présenté dans la colonne F, a été obtenu en levant la contrainte précédente sur l'AMF, l'orientation des microfibrilles est dans ce cas identique dans les trois tissus constitutifs de l'ordre de 12,3 degrés.

L'expérience numérique confirme la possibilité d'une multiplicité de solutions optimales. Il est en conséquence possible de fixer un certain nombre de contraintes d'optimisation devant conduire aux différents jeux de paramètres associés à chacun des types de bois observables au sein d'un même arbre (bois juvénile, bois adulte, bois de réaction).

2.2.2.4 Conclusions

Un jeu cohérent de paramètres optimisés a été obtenu pour décrire le « Résineux Standard Virtuel », sous deux types de contraintes ; une masse volumique du bois fixée à $0,45 \text{ g/cm}^3$ et des angles de microfibrilles différenciés entre bois initial (10 degrés) et bois final (20 degrés).

Cet outil de simulation ouvre des possibilités d'expérimentation numérique en appui aux campagnes expérimentales traditionnelles de caractérisation du matériau bois, en permettant notamment:

- une analyse détaillée de la sensibilité des propriétés élastiques macroscopiques à la variabilité des différents paramètres structuraux et ultrastructuraux,
- d'associer à la diversité des bois, présent au sein d'une même grume, des jeux de paramètres microstructuraux spécifiques, en tenant compte de contraintes d'optimisations découlant d'observations expérimentales,
- d'étendre la démarche vers un champ d'investigation beaucoup plus complexe, celui des essences feuillues.

On rappellera enfin que sur la plan méthodologique, la démarche de modélisation micro-macro, à plusieurs étages et proposée ici, est parfaitement adaptable, en procédant, à l'une ou l'autre des échelles de description, à des substitutions de modèles élémentaires jugées plus opportunes.

	A	B	C	D	E	F
Paroi de cellule bois initial						
E^m matrice en GPa	1,2	1,2	1,2	1,2	2	0,55
ν^m coefficient de Poisson de la matrice	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,35
E^f fibrilles en GPa	40	64	64	64	62	61,5
AMF dans S_2 en degrés (φ_i)	25	25	25	25	22	12,3
V taux de microfibrilles	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Tissu de bois initial						
D_{Ti} diamètre tangentiel en μm	30	30	30	30	30	50
e_{Ti} épaisseur paroi tangentielle en μm	2	2	1	1	1,068	2,35
OV paramètre d'ovalisation D_{Ti}/D_{Ti}	1,166	1,166	1,166	1,166	1,25	1
$e_i = e_{Ri}/e_{Ti}$ paramètre d'épaisseur pariétale	1,5	1,5	1,5	1,5	0,8	1
$\rho_{initial}$ masse volumique en g/cm^3	0,44	0,44	0,229	0,229	0,167	0,271
Paroi de cellule bois final						
E^m matrice en GPa	1,2	1,2	1,2	1,2	2	0,55
ν^m coefficient de Poisson de la matrice	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,35
E^f fibrilles en GPa	40	64	64	64	62	61,5
AMF dans S_2 en degrés (φ_f)	10	10	10	8,5	5,9	12,3
V taux de microfibrilles	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,541
Tissu de bois final						
D_{Tf} diamètre tangentiel en μm	35	35	35	35	35	50
e_{Tf} épaisseur paroi tangentielle en μm	3	3	3	3	2,87	4,5
OV paramètre d'ovalisation D_{Rf}/D_{Tf}	0,514	0,514	0,514	0,514	0,43	0,44
$e_f = e_{Rf}/e_{Tf}$ paramètre d'épaisseur pariétale	1	1	1	1	1	1
ρ_{final} masse volumique en g/cm^3	0,676	0,676	0,676	0,676	0,729	0,778

Tableau 2-4 Données pariétales et géométrie cellulaire des tissus bois initial et bois final

	A	B	C	D	E		F
Paroi de cellule de rayon							
E^m matrice en GPa	1,2	1,2	1,2	1,2	2		0,55
ν^m coefficient de Poisson de la matrice	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3		0,35
E^f microfibrilles en GPa	40	64	64	64	60		61,5
AMF dans S_2 en degrés	40	40	40	40	46		12,3
V taux de microfibrilles	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5		0,5
Tissu de rayon							
D_{Tr} diamètre tangentiel en μm	30	30	30	30	34,5		50
e_{Tr} épaisseur paroi tangentielle en μm	2	2	2	2	1,032		2,4
OV paramètre d'ovalisation D_{Rf}/D_{Tr}	1,166	1,166	1,166	1,166	1,18		1
$e_R = e_{Rf}/e_{Tr}$ paramètre d'épaisseur pariétale	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		1
ρ_{rayon} masse volumique en g/cm^3	0,44	0,44	0,44	0,44	0,202		0,276
Paramètres de cerne							
T_x texture	0,043	0,043	0,495	0,495	0,512		0,36
n fraction volumique en rayons en %	2	2	2	2	2		1,75
Les critères cibles							
Masse volumique $\rho = 0,45 g/cm^3$	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45		0,45
$E_R = 1,00$ GPa	2,95	4,46	1,75	1,55	1		0,995
$E_T = 0,636$ GPa	0,36	0,545	0,758	0,621	0,635		0,634
$E_L = 13,1$ GPa	8,16	12,9	13,1	13,1	13,1		13,2
$E_L/E_R = 13,1$	2,76	2,89	7,5	8,47	13,1		13,3
$E_R/E_T = 1,57$	8,2	8,17	2,31	2,5	1,57		1,57

Tableau 2-5 Données pariétales et géométrie cellulaire des rayons ligneux, paramètres de cerne et les critères cibles

South Finland Pine	54 ans	Relevés planimétriques			North Finland Pine	52 ans	Relevés planimétriques			Finland spruce	36 ans	Relevés planimétriques			France spruce	35 ans	Relevés planimétriques			France Fir	49 ans	Relevés planimétriques		
		N° cerne	Densité [kg/m ³]	ep. de paroi [μm]			D _R en [μm]	D _T en [μm]	N° cerne			Densité [kg/m ³]	ep. de paroi [μm]	D _R en [μm]			D _T en [μm]	N° cerne	Densité [kg/m ³]			ep. de paroi [μm]	D _R en [μm]	D _T en [μm]
1	508	3,046	38,76	30,37	1	433	3,791	35,14	28,09	1	363	2,878	47,39	31,05	1	351	3,081	41,36	32,8	1	330	2,642	42,87	29,25
2	374	2,83	43,3	30,74	2	371	3,652	35,31	27,35	2	285	2,808	48,24	30,8	2	286	2,853	41,98	33,19	2	287	2,471	43,25	29,65
3	355	2,808	43,63	31,64	3	352	3,538	36,88	27,86	3	299	2,852	44,38	30,84	3	289	2,864	39,19	33,28	3	286	2,511	42,73	29,93
4	346	2,896	39,06	31,2	4	361	3,454	37,37	28,36	4	307	2,889	40,59	30,75	4	288	2,884	38,67	33,69	4	303	2,564	42,55	29,91
5	348	2,96	38,91	30,9	5	362	3,435	37,82	27,19	5	319	2,942	41,18	30,94	5	300	2,948	36,95	33,62	5	314	2,661	41,88	30,94
6	360	2,999	41,32	30,63	6	354	3,565	37,19	27,99	6	317	2,962	40,11	30,09	6	306	2,974	35,83	33,23	6	327	2,796	40,91	31,25
7	383	3,13	39,56	29,99	7	366	3,785	39,23	28	7	316	2,991	39,33	29,9	7	318	3,221	40,15	32,89	7	337	2,962	41,58	30,79
8	398	3,244	38,43	30,2	8	376	3,875	42,09	28,01	8	328	3,037	40,48	30,02	8	338	3,504	40,96	32,09	8	351	3,132	39,34	30,52
9	406	3,288	39,56	30,13	9	375	3,991	39,69	28,01	9	340	3,07	39,21	29,37	9	364	3,674	39,89	31,95	9	382	3,186	35,86	30,44
10	427	3,251	36,75	30,6	10	378	4,064	37,82	28,38	10	361	3,138	38,1	29,25	10	396	3,717	36,51	31,64	10	420	3,381	36,11	30,7
11	453	3,423	35,86	30,28	11	396	4,213	39,05	28,35	11	397	3,191	36,56	29,09	11	420	4,197	34,12	31,31	11	453	3,616	34,83	30,66
12	530	3,648	35,8	29,51	12	425	4,599	35,06	28,37	12	433	3,465	34,24	29,4	12	442	4,065	35,66	31,6	12	505	3,868	31,49	30,61
13	706	3,972	32,84	29,56	13	479	5,642	35,24	28,3	13	455	3,68	33,63	28,96	13	456	4,26	36,04	31,06	13	552	4,251	30,51	31,24
14	817	4,224	27,76	29,95	14	530	6,09	33,93	28,26	14	498	4,156	33,07	29,31	14	479	4,288	36,04	31,47	14	620	4,566	27,59	30,46
15	845	4,613	26,98	28,54	15	628	6,334	28,55	28,6	15	554	4,203	32,14	29,07	15	516	4,766	34,26	31,59	15	700	4,74	25,83	28,96
16	859	5,36	25,21	29,66	16	746	6,11	24,68	27,47	16	642	4,925	29,47	29,74	16	592	5,086	30,9	31	16	716	4,833	26,54	29,35
17	975	5,796	25,15	31,8	17	826	6,914	23,08	27,1	17	713	5,295	26,02	28,95	17	685	5,253	27,51	30,79	17	783	5,108	23,66	28,86
18	997	5,96	25,87	31,8	18	921	6,867	23,11	27,5	18	765	5,743	25,34	29,17	18	827	5,855	25,97	30,49	18	814	5,273	23,98	28,45
19	998	5,992	24,05	30,03	19	959	6,58	22,39	26,62	19	864	6,422	24,04	29,56	19	962	6,121	22,6	31,24	19	842	5,325	22,64	28,65
20	862	4,647	19,85	31,06	20	875	5,824	19,35	27,04	20	867	5,823	19,12	31,1	20	1027	6,145	19,21	32,5	20	861	5,074	18,28	28,73

Tableau 2-6 Relevés planimétriques de dimensions cellulaires de cinq essences résineuses (Leban). La densité est mesurée par l'absorption d'un rayonnement X.

2.2.3 Situation des paramètres du modèle RSV vis-à-vis de ceux de trois essences résineuses

2.2.3.1 Méthodologie

Ruelle (2003) a relevé l'angle des microfibrilles (φ) et certains paramètres de forme des cellules de bois initial et de bois final sur trois essences résineuses. Les différentes méthodes expérimentales utilisées seront détaillées dans le chapitre 4. L'étude anatomique a porté sur 2 échantillons de bois normal d'Épicéa commun (*Picea abies*) de Pin maritime (*Pinus pinaster*) et de Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*). Les paramètres mesurés par l'auteur sont les diamètres radial et tangentiel de lumens (FLDR) et (FLDT), ainsi que les épaisseurs de double paroi, dans les directions radiales (FePR) et tangentielle (FePT). Les formules exprimant les caractéristiques géométriques relevées par l'auteur en fonction des paramètres de forme (D_R , D_T , e_R , e_T) envisagés dans notre modèle de tissu ligneux sont :

$$e_T = \frac{FePR}{2}$$

$$e_R = \frac{FePT}{2}$$

$$D_R = FLDR + 2 e_T$$

$$D_T = FLDT + 2 e_R$$

Les écarts types sur l'AMF (φ) et sur ces mêmes paramètres (D_R , D_T , e_R , e_T) ont été calculés à partir de ceux relevés par Ruelle (ils sont reportés sur les Figures 2.6 à 2.12 sous la forme de barres d'erreurs).

Les moyennes des dimensions cellulaires (D_R , D_T , e_R , e_T) pour chaque tissu et pour un cerne ont été fournies sur chaque échantillon. Par application de la formule (2.14) on calcule la porosité moyenne puis la masse volumique moyenne de chaque tissu et du cerne. Une approximation de la texture (T_x) est alors déduite (méthode inverse) à partir des masses volumiques tissulaires et de celle du cerne (l'intervention de la masse volumique des rayons ligneux dans la masse volumique du cerne est négligée).

$$T_x = \frac{\rho_{\text{cerne}} - \rho_{\text{initial}}}{\rho_{\text{final}} - \rho_{\text{initial}}}$$

On notera que la masse volumique des éprouvettes (complètes) relevée par l'auteur n'a pas été utilisée, pour déterminer la texture par cette méthode, puisque le nombre de cernes dans chaque éprouvette n'est pas précisé.

Pour chaque essence et chaque tissu, l'AMF (φ) (Figures 2.6 à 2.8), et les paramètres géométriques des cellules de bois normal (noté BN sur les Figures 2.9 à 2.11) sont comparés à ceux du modèle RSV.

La Figure 2.12 permet, pour chaque essence, de comparer les valeurs moyennes de la texture, des masses volumiques du bois initial, du bois final et du cerne aux valeurs correspondantes du RSV.

Les faibles écarts types des valeurs d'AMF (φ) mesurées par Ruelle (2003), suggèrent que les AMF ne diffèrent pas significativement dans le bois initial et final. Pour cette raison sont représentés sur chacune des Figures 2.6 à 2.11, les paramètres ayant servi à la construction d'un RSV ($i=f$) ayant le même AMF(φ) dans les bois initial et final (colonne F des Tableaux 2.4 et 2.5).

2.2.3.2 Situation du modèle RSV en regard des trois essences.

A l'échelle de la double cloison

La valeur de 22 degrés attribuée à l'AMF (φ) des tissus bois initial dans le modèle RSV est assez proche de celles relevées par Ruelle sur le bois initial des trois essences. La valeur de ce même paramètre (φ) envisagée dans le bois final du RSV (5,9 degrés) demeure bien inférieure à celle relevée expérimentalement (Figures 2.6 à 2.8).

A l'échelle tissulaire

Pour les trois essences (Figures 2.9 à 2.12), les épaisseurs de paroi tangentielle et radiales qu'elles caractérisent un bois initial (e_{Ri} , e_{Ti}) ou un bois final (e_{Rf} , e_{Tf}) sont systématiquement supérieures à celle insérées dans le modèle RSV. En revanche, les diamètres radial et tangentiel de tissus (D_{Ri} , D_{Ti} , D_{Rf} , D_{Tf}) sont assez proches des valeurs moyennes relevées expérimentalement.

Une conséquence directe de la faiblesse de ces épaisseurs pariétales optimisées réside en une masse volumique de tissu (ρ_{init}) et (ρ_{fin}) du bois RSV inférieure ou égale (cas du Pin maritime, Figure 2.12) à celles estimées par une assimilation du plan ligneux des trois essences à un réseau de cellules rectangulaires.

Devant les écarts types des autres paramètres il est délicat de rapprocher, en terme de paramètres géométriques comme en terme d'AMF (φ), le modèle RSV de telle ou telle essence.

2.2.3.3 Situation en regard des 3 essences d'un cas particulier du RSV ; le RSV ($i=f$)

L'AMF (φ) de 12,3 degrés envisagé dans le modèle RSV ($i=f$) est assez proche des valeurs relevées par l'auteur sur les trois essences. Deux différences essentielles distinguent le modèle RSV ($i=f$) du modèle RSV; des diamètres cellulaires ($D_{Ri} = D_{Ti} = D_{Tf} = 50 \mu m$) élevés et un angle des microfibrilles communs au deux tissus.

La nécessité de cette forte augmentation des valeurs de diamètres cellulaires (D_{Ri} , D_{Ti} , D_{Tf}) pour des faibles variations d'angle (φ) laisse présager que les caractéristiques élastiques ayant servies de cible pour la construction du RSV sont très sensibles aux variations de l'angle des microfibrilles.

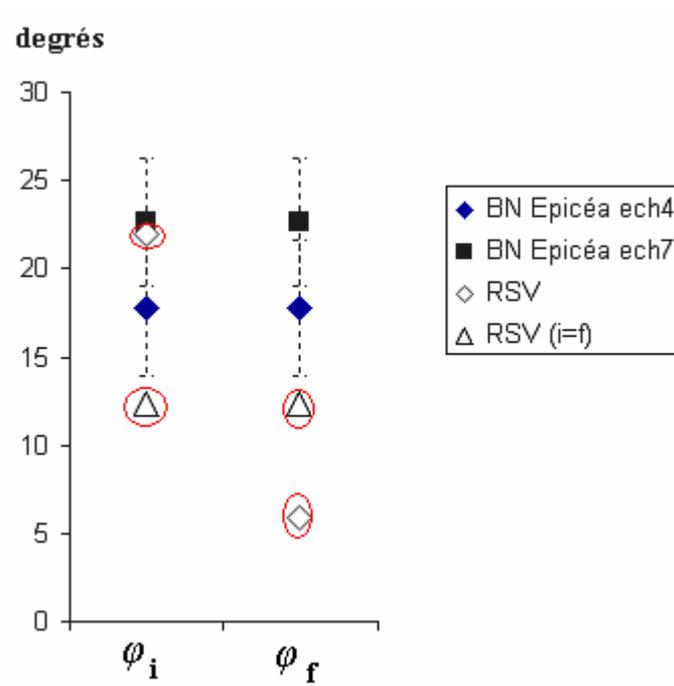


Figure 2.6 Comparaison des AMF relevés sur les bois initial et final de l'Epicéa aux AMF du RSV et RSV (i=f)

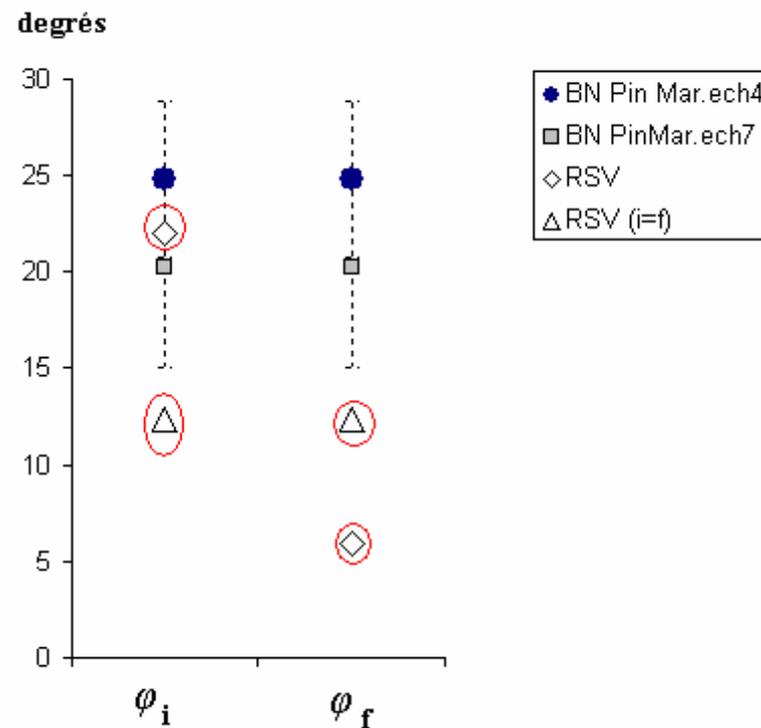


Figure 2.7 Comparaison des AMF relevés sur les bois initial et final du Pin maritime aux AMF du RSV et RSV (i=f)

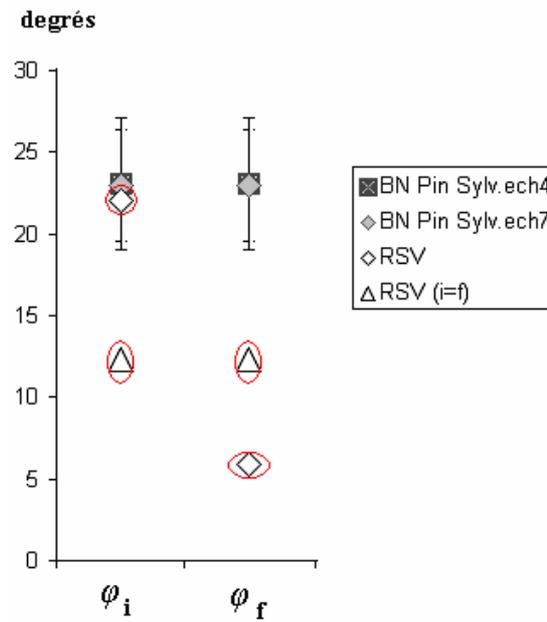


Figure 2.8 Comparaison des AMF relevés sur les bois initial et final de Pin Sylvestre aux AMF du RSV et RSV (i=f)

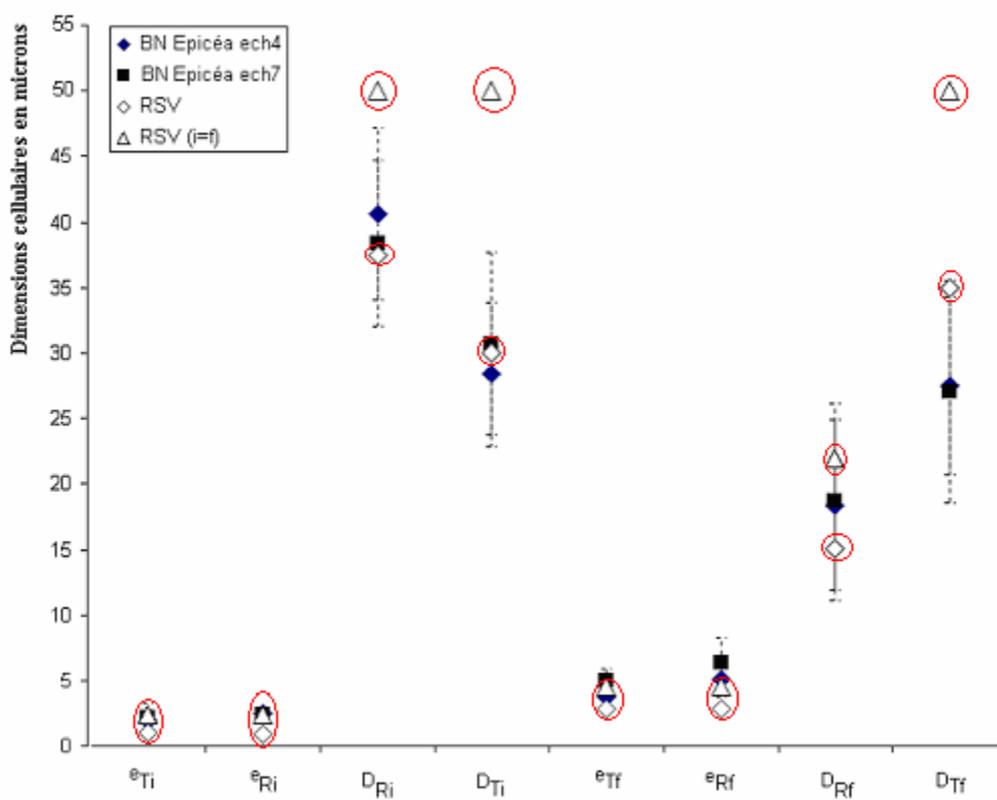


Figure 2.9 Comparaison des paramètres structuraux et ultrastructuraux relevés sur un bois normal d'Epicéa aux paramètres optimisés du RSV et RSV (i=f)

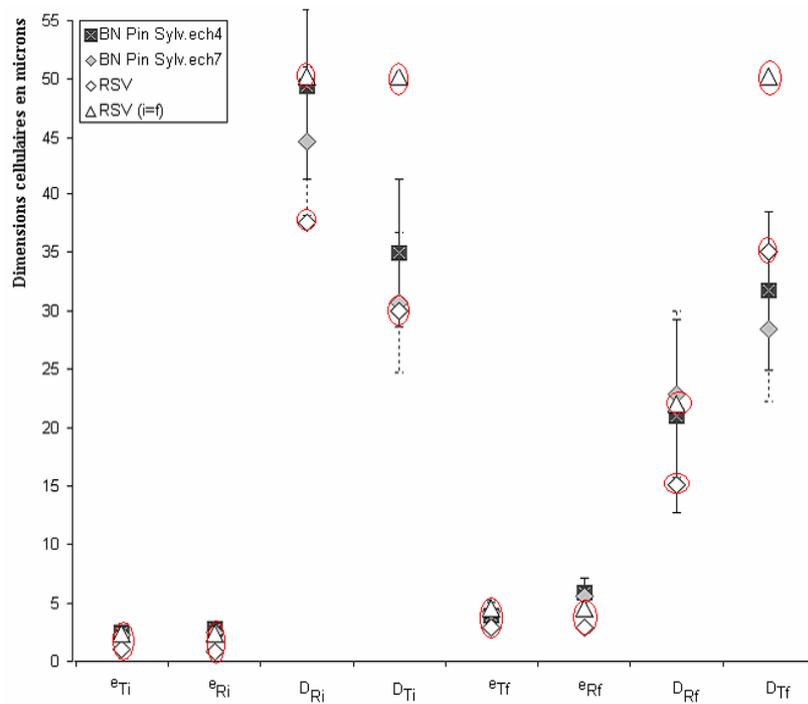


Figure 2.10 Comparaison des paramètres structuraux et ultrastructuraux obtenus sur un bois normal de Pin sylvestre aux paramètres optimisés du RSV et RSV (i=f).

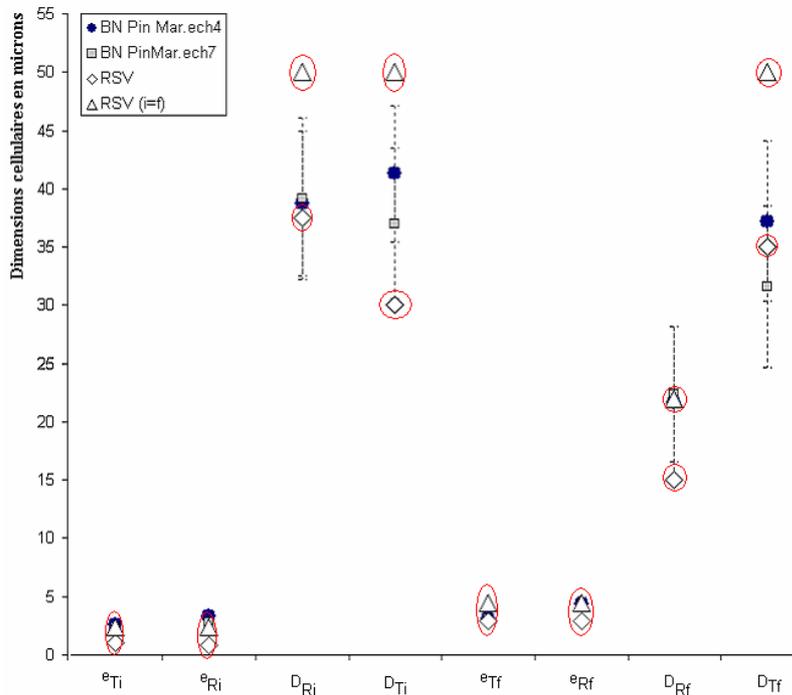


Figure 2.11 Comparaison des paramètres structuraux et ultrastructuraux obtenus sur un bois normal de Pin maritime aux paramètres optimisés du RSV et du RSV (i=f)

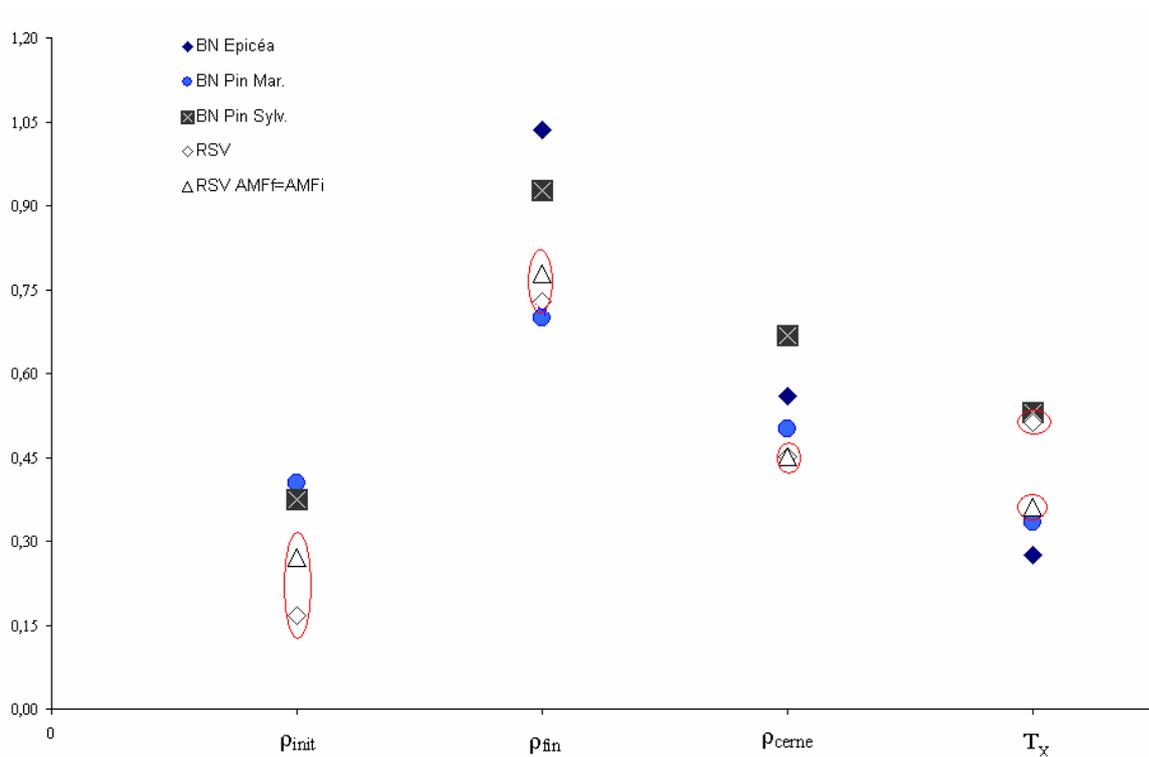


Figure 2.12 Comparaison de paramètres tissulaires et paramètres de cerne déduits sur un bois normal de trois essences résineuses à ceux résultants de l'optimisation (RSV et RSV (i=f))

2.3 Conclusion

A partir d'un ensemble de valeurs probables assignées, via une étude documentaire, aux différents paramètres susceptibles de conditionner l'anisotropie élastique du résineux standard, un bois virtuel de résineux (RSV) a été construit. Aux propriétés élastiques du résineux standard (Guitard, 1987) est maintenant assigné un ensemble de 22 paramètres structuraux descriptifs. La confrontation a posteriori de certaines de valeurs optimisées à des jeux expérimentaux déterminés sur trois essences résineuses confirme le réalisme biologique de cette essence « virtuelle ». Sur cette base de travail, une hiérarchisation des paramètres insérés peut être proposée.

ANNEXE 1

Caractéristiques élastiques du modèle Squelette de microfibrilles (Guitard *et al*, 1999)

Rigidités des microfibrilles de cellulose

La forme générale des complaisances élastiques exprimées selon les axes principaux de chacune des nappes de revêtement des microfibrilles est en premier lieu écrite en fonction des constantes élastiques des fibres cellulosiques et sous l'hypothèse d'une symétrie orthotrope.

$$(A1.1) \quad \left(S_{ijkl}^{f*} \right) = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1^f} & -\frac{\nu_{21}^f}{E_2^f} & -\frac{\nu_{13}^f}{E_3^f} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}^f}{E_1^f} & \frac{1}{E_2^f} & -\frac{\nu_{23}^f}{E_3^f} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}^f}{E_1^f} & -\frac{\nu_{12}^f}{E_2^f} & \frac{1}{E_3^f} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}^f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}^f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}^f} \end{bmatrix}$$

Il est supposé que les efforts longitudinaux selon les fibres et les efforts de cisaillement entre les fibres ne peuvent être transmis que par l'intermédiaire des nappes de microfibrilles.

Les seuls paramètres élastiques considérés comme non nuls ne sont donc que E_3^f , G_{23}^f et G_{31}^f

Les modules d'élasticité au cisaillement sont arbitrairement estimés à partir du module longitudinal des microfibrilles E_3^f ,

$$(A1.2) \quad G_{23}^f = G_{31}^f = \frac{E_3^f}{2}$$

Les effets Poisson ne sont pas pris en compte :

$$(A1.3) \quad \nu_{12}^f = \nu_{21}^f = \nu_{23}^f = \nu_{32}^f = \nu_{31}^f = \nu_{13}^f = 0$$

Le tenseur des rigidités C_{ijkl}^{f*} est obtenu par inversion du tenseur des complaisances S_{ijkl}^{f*} précédemment exprimé.

Sous ces conditions, les composantes non nulles de C_{ijkl}^{f*} sont :

$$(A.1.4) \quad \begin{aligned} C^{f*}_{3333} &= E_3^f \\ C^{f*}_{2323} &= \frac{E_3^f}{2} \\ C^{f*}_{3131} &= \frac{E_3^f}{2} \end{aligned}$$

Les composantes du tenseur des rigidités de l'une des nappes de microfibrilles $C^{f(+\varphi)}_{ijkl}$ sont en premier lieu exprimées dans le système des axes principaux de la cellule et déduites des C^{f*}_{ijkl} par une rotation d'angle (φ) autour du grand axe cellulaire (\vec{I})

Les composantes du tenseur des rigidités C^f_{ijkl} du squelette de microfibrilles, exprimées suivant les axes principaux de la cellule sont calculées par superposition pondérée des caractéristiques de chacune des deux nappes d'orientations symétriques, les termes en puissances impaires de $\sin(\varphi)$ sont ainsi éliminés.

$$(A.1.5) \quad C^f_{ijkl} = \frac{C^{f(+\varphi)}_{ijkl}}{2} + \frac{C^{f(-\varphi)}_{ijkl}}{2}$$

Les axes associés aux coordonnées cylindriques (r, θ, z) définissent ainsi les directions principales du tenseur des rigidités du squelette des microfibrilles.

La forme du tenseur des rigidités du squelette des microfibrilles est:

$$(A.1.6) \quad (C^f_{ijkl}) = \begin{bmatrix} C^f_{rrrr} & C^f_{rr\theta r} & C^f_{rrzz} & 0 & 0 & 0 \\ C^f_{\theta\theta rr} & C^f_{\theta\theta\theta\theta} & C^f_{\theta\theta rr} & 0 & 0 & 0 \\ C^f_{zzrr} & C^f_{zz\theta z} & C^f_{zzzz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C^f_{\theta z\theta z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C^f_{zrzr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C^f_{r\theta\theta r} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 C_{rrrr}^f &= C_{1111}^{f*} \\
 C_{\theta\theta\theta\theta}^f &= C_{2222}^{f*}c^4 + 2(C_{2233}^{f*} + 2C_{3232}^{f*})c^2s^2 + C_{3333}^{f*}s^4 \\
 C_{zzzz}^f &= C_{3333}^{f*}c^4 + 2(C_{2233}^{f*} + 2C_{3232}^{f*})c^2s^2 + C_{2222}^{f*}s^4 \\
 C_{z\theta\theta z}^f &= C_{3232}^{f*}(c^2 - s^2)^2 + (C_{2222}^{f*} + C_{3333}^{f*} - 2C_{2233}^{f*})c^2s^2 \\
 C_{r\theta\theta r}^f &= C_{1212}^{f*}c^2 + C_{3131}^{f*}s^2 \\
 C_{rzrz}^f &= C_{1313}^{f*}c^2 + C_{1212}^{f*}s^2 \\
 C_{r\theta r}^f &= C_{\theta r r}^f = C_{2211}^{f*}c^2 + C_{3311}^{f*}s^2 \\
 C_{zz\theta\theta}^f &= C_{\theta\theta zz}^f = C_{2233}^{f*}(c^4 + s^4) + (C_{2222}^{f*} + C_{3333}^{f*} - 4C_{3232}^{f*})s^2c^2 \\
 C_{zzrr}^f &= C_{rrzz}^f = C_{3311}^{f*}c^2 + C_{2211}^{f*}s^2
 \end{aligned}
 \tag{A.1.7}$$

Les composantes non nulles du tenseur sont donc :

$$\begin{aligned}
 C_{\theta\theta\theta\theta}^f &= E_3^f s^2 (1 + c^2) \\
 C_{zzzz}^f &= E_3^f c^2 (1 + s^2) \\
 C_{z\theta\theta z}^f &= E_3^f (c^2 - s^2)^2 \\
 C_{\theta\theta zz}^f &= C_{zz\theta\theta}^f = -E_3^f c^2 s^2 \\
 C_{rzrz}^f &= \frac{E_3^f}{2} c^2 \\
 C_{r\theta r}^f &= \frac{E_3^f}{2} s^2
 \end{aligned}
 \tag{A.1.8}$$

Les modules élastiques longitudinal et transverses de la double paroi virtuelle notés respectivement E_{Lp} et E_{Tp} sont alors :

$$E_{Lp} \approx C_{zzzz} = (1 - V) \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} E^m + V(1 - s^4) E^f
 \tag{2.27}$$

$$E_{Tp} = E_{Rp} \approx C_{\theta\theta\theta\theta} = (1 - V) \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} E^m + V(1 - c^4) E^f
 \tag{2.28}$$

3 Hiérarchisation des paramètres descriptifs de l'anisotropie élastique du bois normal

Le chapitre 1 a permis de dresser l'inventaire, via une étude documentaire pluridisciplinaire, des paramètres essentiels rendus responsables de la variabilité intra arbre de l'anisotropie élastique du bois normal. Les valeurs numériques assignées à chacun de ces mêmes paramètres, via une technique simple d'optimisation associant calculs et propositions bibliographiques, ont conduit à la définition d'un résineux standard virtuel RSV (chapitre 2). Cette essence fictive a été considérée comme « médiane » en terme de propriétés mécaniques élastiques. L'objectif de ce chapitre est de préciser numériquement, en s'appuyant sur des banques de données structurales ou des tendances générales issues de la bibliographie, l'influence de chacun des paramètres clés, sur les rapports d'anisotropie élastique du bois massif sans défaut.

3.1 La porosité, facteur de l'anisotropie élastique du réseau cellulaire nid d'abeille

Par soucis de simplification, et devant la disparité des valeurs des rigidités de parois cellulaires présentées dans la littérature, les études numériques sont menées dans ce chapitre, sous l'hypothèse d'une isotropie transverse de la double paroi ($E_{Tp} = E_{Rp}$).

Dans la modélisation présentée précédemment (chapitre 2), la masse volumique (stabilisée à l'humidité de référence de 12%) est liée aux paramètres géométriques tissulaires épaisseurs (e_T, e_R) et diamètres (D_R, D_T) comme à la masse volumique de la matière ligneuse par les deux expressions (2.12) et (2.13) données dans le chapitre 2.

A cette première étape de la discussion, les épaisseurs pariétales, radiale et tangentielle (posées égales à e), ainsi que les diamètres radial D_R et tangentiel D_T , ne seront pas distingués ($D_R = D_T = D$). Le facteur de forme des cellules (supposées en premier lieu carrées) est alors exprimé par le rapport adimensionnel e/D .

Les rapports directionnels d'anisotropie élastique L/R et L/T du tissu ligneux élémentaire sont alors liés aux rapports d'anisotropie élastique $\frac{E_{Lp}}{E_{Rp}}$ de la double paroi par les relations (3.1),

(3.2) via les coefficients d'anisotropie définis par les relations (3.3) à (3.5):

$$(3.1) \quad \frac{E_L}{E_R} = 2 \left[1 - \frac{e}{D} \right] \frac{E_{Lp}}{E_{Rp}} = a_{LR} \frac{E_{Lp}}{E_{Rp}}$$

$$(3.2) \quad \frac{E_L}{E_T} = 2 \left[1 - \frac{e}{D} \right] \left[1 + \frac{1}{64} \frac{e}{D} \frac{(D - 2e)^3}{e^3} \right] \frac{E_{Lp}}{E_{Tp}} = a_{LT} \frac{E_{Lp}}{E_{Tp}}$$

$$(3.3) \quad a_F = \frac{1}{64} \frac{e}{D} \frac{(D - 2e)^3}{e^3}$$

$$(3.4) \quad a_{LR} = 2 \left[1 - \frac{e}{D} \right]$$

$$(3.5) \quad a_{LT} = 2 \left[1 - \frac{e}{D} \right] \left[1 + \frac{1}{64} \frac{e}{D} \frac{(D - 2e)^3}{e^3} \right] = a_{LR} (1 + a_F)$$

Le rapport a_F représente ainsi la proportion d'anisotropie élastique L/T résultant de la mise en flexion de la double paroi cellulaire, tandis que le rapport a_{LR} fournit une estimation de la proportion d'anisotropie élastique L/R résultant du renfort radial créé par l'alignement des parois dans le sens R. Le produit a_{LT} exprime enfin la proportion d'anisotropie élastique résultant d'un alignement dans le sens T.

Il convient ici de préciser qu'à cette étape du travail, la discussion fait état de sens R et de sens T et non des directions d'orthotropie radiale et tangentielle du matériau bois, tout ceci afin de caractériser l'influence des différences disposition en alignement (sens T) ou en quinconces (sens T) du tissu ligneux sur les caractéristiques du nid d'abeille.

Considérant un échelonnement des masses volumiques du matériau bois compris entre 0,2 et 1,5 (masse volumique de la matière ligneuse), il est possible, pour différentes porosités, de déduire les valeurs du facteur de forme e/D des cellules, supposées, en premier lieu, carrées (Tableau 3.1).

On calcule les valeurs du coefficient d'anisotropie géométrique a_{LR} correspondant à l'arrangement cellulaire d'alignement sens R, à l'aide de (3.4), ainsi que les valeurs du coefficient d'anisotropie géométrique, a_{LT} correspondant à l'arrangement cellulaire d'alignement sens T (3.5). On accède enfin au coefficient sans dimension a_F à l'aide de (3.3), représentant la proportion d'anisotropie résultant de la mise en flexion de certains éléments de la paroi cellulaire. Les valeurs numériques correspondantes sont reportées dans le Tableau 3.1.

Un premier examen du Tableau 3.1 montre que la porosité P_o varie dans un large intervalle de 86% à 1%, lorsque les masses volumiques ρ de la structure considérée sont comprises dans l'intervalle 0,2 à 1,5 g/cm³. A une porosité quasi nulle correspond bien une masse volumique proche de la valeur admise pour la matière ligneuse ($\rho_m = 1,51$ g/cm³).

Les résultats affichés dans le Tableau 3.1, permettent de conclure que, dans le cadre de l'étude (i.e. cellules carrées), la porosité intervient, via le rapport de forme e/D , dans l'anisotropie élastique apparente du matériau bois assimilé à une structure nid d'abeille.

Dans le cas des arrangements en alignement suivant la direction R, la porosité P_o intervient directement ($P_o = (a_{LR} - 1)^2$) par l'intermédiaire du coefficient multiplicatif a_{LR} dont la valeur numérique reste comprise dans l'intervalle de 1 à 2.

Dans le cas des arrangements en quinconces faisant intervenir un comportement en « flexion » de certains éléments de la paroi cellulaire (portion BCE soumise à une flexion 3 points, Figure 2.3 du chapitre 2), on constate (Tableau 3.1) d'une part que le coefficient a_{LT} varie dans une plus large gamme allant de 23 à 1, et d'autre part que des anisotropies classiques L/T, exprimées par une valeur du facteur a_{LT} de l'ordre de 20, (valeurs courantes

dans le bois initial et final, Bodig *et al*, 1982, comme dans le bois massif, Guitard *et al* 1987), ne peuvent être atteintes que pour des masses volumiques inférieures ρ à $0,25 \text{ g/cm}^3$ (Figure 3.1). Cette dernière valeur de masse volumique apparaît bien restrictive en regard de l'intervalle des variations de cette même grandeur classiquement observable sur la majorité des essences résineuses (Venet *et al*, 1986, Keller, 1999).

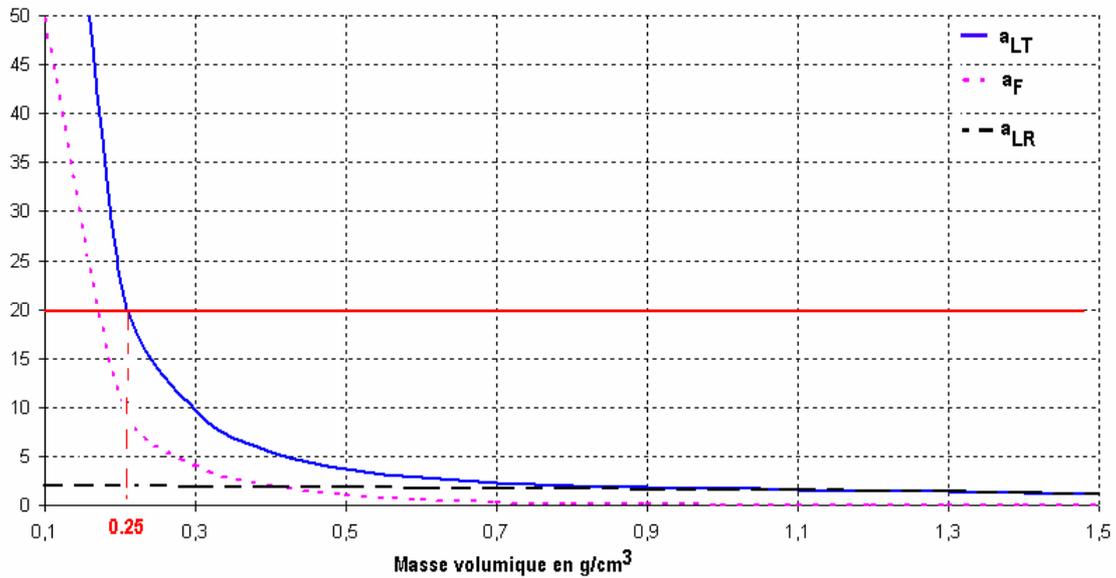


Figure 3.1 Evolutions des rapports géométriques avec la masse volumique ρ

ρ (g/cm^3)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Po (%)	0,86	0,80	0,73	0,66	0,60	0,53	0,47	0,40	0,33	0,27	0,20	0,13	0,07	0,01
e/D	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	0,13	0,16	0,18	0,21	0,24	0,27	0,31	0,37	0,46
a_F	10,73	4,07	1,93	1,03	0,58	0,34	0,20	0,12	0,06	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00
a_{LR}	1,93	1,89	1,85	1,81	1,77	1,73	1,68	1,63	1,58	1,52	1,45	1,37	1,26	1,08
a_{LT}	22,67	9,62	5,45	3,69	2,81	2,32	2,02	1,83	1,69	1,57	1,48	1,38	1,27	1,08

Tableau 3-1 Comparaison de l'évolution des coefficients d'anisotropie avec la porosité Po

L'étendue de l'intervalle de variations du coefficient d'anisotropie a_{LT} pourrait laisser penser que le fonctionnement en flexion des parois cellulaires est une des raisons de la très forte anisotropie L/T observée expérimentalement sur le bois initial comme sur le bois final.

Pourtant, d'après la Figure 3.1, construite à partir des données présentées au Tableau 3.1, la prise en compte de la flexion des parois, traduite par la valeur du facteur a_F , est peu justifiée dès que la masse volumique est supérieure à $0,6 \text{ g/cm}^3$. En effet, pour une telle valeur du paramètre, au facteur de forme des cellules $e/D = 0,58$, correspond un facteur de forme de l'élément sollicité en flexion très faible $L/h = (D-e)/2e = 3,5$. Pour des cellules assimilables à des cellules de bois final (parois épaisses et diamètres cellulaires assez faibles), une partie de l'anisotropie L/T, est donc directement imputable à un effet « quantité de matière ».

Pour évaluer le degré d'anisotropie induit dans le plan transverse du nid d'abeille par la seule différence des arrangements en alignement radial et en quinconces, les variations du rapport a_{RT} d'anisotropie transverse tissulaire E_R / E_T exprimé en (3.6), en fonction de la masse volumique, sont reportées dans le Tableau 3.2 et la Figure 3.2.

$$(3.6) \quad \frac{E_R}{E_T} = \left[1 + \frac{1}{64} \frac{e}{D} \frac{(D - 2e)^3}{e^3} \right] \frac{E_{Rp}}{E_{Tp}} = (1 + a_F) \frac{E_{Rp}}{E_{Tp}} = a_{RT} \frac{E_{Rp}}{E_{Tp}}$$

L'examen simultané de la Figure 3.2 et du Tableau 3.2 permet de constater qu'une anisotropie transverse macroscopique R/T classique (Guitard et al, 1987) supérieure ou égale à 2 ne peut être attribué à la seule différence d'arrangement en quinconce ou en alignement que pour des masses volumiques inférieures à $0,5 \text{ g/cm}^3$.

ρ (g/cm ³)	Po (%)	e/D	a_{RT}
0,20	0,86	0,03	15,42
0,30	0,80	0,05	5,56
0,40	0,73	0,07	3,03
0,50	0,66	0,09	2,06
0,60	0,60	0,11	1,61
0,70	0,53	0,13	1,37
0,80	0,47	0,16	1,19
0,90	0,40	0,18	1,13
1,00	0,33	0,21	1,07
1,10	0,27	0,24	1,04
1,20	0,20	0,27	1,02
1,30	0,13	0,31	1,01
1,40	0,07	0,37	1,00
1,50	0,01	0,46	1,00

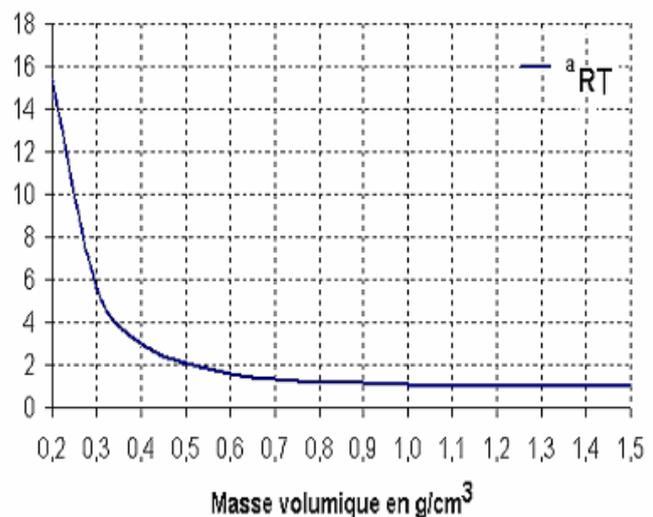


Tableau 3-2 Variations des rapports de forme e/D et du rapport d'anisotropie a_{RT} avec la masse volumique

Figure 3.2 Evolutions du facteur a_{RT} avec la masse volumique

3.1.1 Comparaison au modèle de Gibson *et al* et influence de l'élément de paroi fléchié

Afin d'élucider l'influence de la morphologie cellulaire sur les rapports d'anisotropie élastique du tissu ligneux, la modélisation de Guitard *et al* (2002), retenue ici, est confrontée à celle formulée par Gibson *et al* (1988) (et reprise par Koponen *et al* en 1991), décrivant le matériau bois comme une structure nid d'abeille hexagonale non régulière. Cette confrontation est d'autant plus aisée que les dispositions alignées et en quinconces évoquées dans le modèle de Guitard *et al* (2002) représentent deux cas « limites » de la géométrie tissulaire décrite et admise par Gibson *et al* (1988).

Ainsi, si la configuration des cellules en alignement (sens R) envisagée ici est à rapprocher (en terme de réponse mécanique) de la configuration en carré, proposée par ces derniers auteurs, la disposition en quinconce (sens T, Figure 1.8b du chapitre 1), correspond à la structure nid d'abeille hexagonale (sens 2), rappelée sur la Figure 1.8a du chapitre 1.

Les particularités géométriques du modèle (b), proposé par Guitard *et al*, (Figure 1.8b) sont les suivantes: la valeur du paramètre angulaire θ est prise nulle ($\theta = 0$), tandis que les valeurs numériques assignées aux paramètres géométriques (paramètres de forme) l et h , caractérisant la cellule rectangulaire (b) sont $D_R/2$ et $h = D_T$.

La différence essentielle entre le modèle (a) et le modèle (b), réside ainsi dans le choix de la longueur utile des éléments de paroi sollicités en flexion. Selon Gibson *et al* (1988), la longueur des éléments fléchis, notée l , n'est pas liée à l'épaisseur de la paroi. Dans le cas du modèle (b), la longueur utile de l'élément fléchi, noté $(D_R - 2e_T)$, est, de façon évidente, fonction décroissante de cette même épaisseur de paroi. En conséquence, pour un diamètre D_R de cellule fixé, le modèle (b) sera plus rigide que le modèle (a) au fur et à mesure que l'on considère des parois plus épaisses, c'est à dire des masses volumiques plus élevées. Ceci rejoint la remarque faite au paragraphe précédent (paragraphe 3.1).

L'estimation du module d'Young du tissu ligneux, soumis à une sollicitation dans la direction 2, proposée par Gibson *et al* (1988) est donnée par la relation suivante (3.7):

$$(3.7) \quad \frac{E_2}{E_{2\text{paroi}}} = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{\left(\frac{h}{l} + \sin\theta\right)}{\cos^3\theta}$$

Cette relation appliquée à la configuration géométrique (b), envisagée notamment par Guitard *et al* (2002) et présentée sur la Figure 1.8 b, en utilisant les notations propres à la cellule rectangulaire devient (3.8):

$$(3.8) \quad \frac{E_T}{E_{Rp}} = 128 \left(\frac{D_T}{D_R}\right) \left(\frac{e_R}{D_R}\right)^3$$

Cette dernière expression est à comparer à la relation (3.9), résultant de l'inversion de la relation (2.19) du chapitre 2, qui peut se mettre sous la forme suivante:

$$(3.9) \quad \frac{E_T}{E_{Rp}} = 2 \frac{E_{Tp}}{E_{Rp}} \frac{e_T}{D_R} \frac{1}{\left[1 + \frac{1}{64} \frac{E_{Tp}}{E_{Rp}} \frac{e_T}{D_T} \left(\frac{D_R - 2e_T}{e_R}\right)^3\right]}$$

L'expression (3.9) diffère de (3.8) par l'intermédiaire de deux termes. Le "1", premier terme à l'intérieur du crochet au dénominateur, représente la contribution des éléments de paroi sollicités en traction compression à la rigidité du nid d'abeille. Ce terme est négligé a priori par les auteurs du modèle (a). Le second terme du crochet au dénominateur est lié à la contribution des éléments de paroi sollicités en flexion (Figure 2.3, chapitre 2).

Comme évoqué dans le début de ce paragraphe, la différence entre les deux expressions porte sur la correction en $(2e_T)$ de la longueur des éléments fléchis $(D_R - 2e_T)$. En négligeant chacun de ces deux effets, c'est à dire en annulant chacun des deux termes, (3.9) se réduit strictement à (3.8).

Pour apprécier l'incidence de la correction de la longueur des éléments fléchis sur l'anisotropie tissulaire L/T, il convient de comparer numériquement les valeurs du coefficient a_{LT} défini en (3.5) à son équivalent a_G (3.10) déduit de (3.8).

$$(3.5) \quad a_{LT} = \left[1 + \frac{1}{64} \frac{E_{Tp}}{E_{Rp}} \frac{e_T}{D_T} \frac{(D_R - 2e_T)^3}{e_R^3} \right] \left[1 - 2 \frac{e_R}{D_T} + \frac{D_R e_R}{D_T e_T} \right]$$

$$(3.10) \quad a_G = \left[\frac{1}{64} \frac{E_{Tp}}{E_{Rp}} \frac{e_T}{D_T} \left(\frac{D_R}{e_R} \right)^3 \right] \left[1 - 2 \frac{e_R}{D_T} + \frac{D_R e_R}{D_T e_T} \right]$$

Remarque : les expressions précédentes (3.6) à (3.10), faisant intervenir le rapport d'anisotropie transverse bipariétal $\frac{E_{Rp}}{E_{Tp}}$, ont été laissées en l'état pour « montrer »

l'influence des propriétés mécaniques de la double cloison sur les différents coefficients d'anisotropie tissulaires. Comme précisé en début de ce chapitre, les applications numériques sont néanmoins menées, faute d'information sur le degré d'anisotropie transverse de la paroi, sous l'hypothèse d'une isotropie transverse de la double cloison.

Sous les conditions précisées, une application numérique est présentée dans le Tableau 3.3.

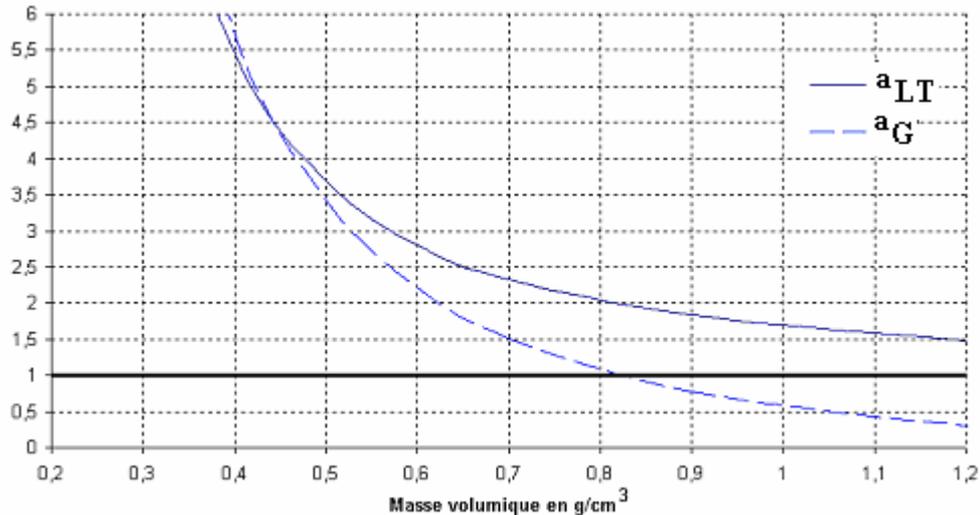


Figure 3.3 Comparaison de l'évolution des coefficients géométriques d'anisotropie (a_{LT}) du modèle de Guitard *et al* et du coefficient équivalent (a_G) du modèle proposé par Gibson *et al*

ρ (g/cm ³)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
a_{LT}	22,67	9,62	5,45	3,69	2,32	1,69	1,57	1,48	1,38	1,27	1,08
a_G	25,67	10,78	5,71	3,42	1,51	0,56	0,41	0,30	0,22	0,15	0,08

Tableau 3-3 Evolution des valeurs numériques des coefficients d'anisotropie (a_{LT}) et (a_G) avec la masse volumique

La Figure 3.3 représente, en fonction de la masse volumique ρ , les valeurs du coefficient géométrique d'anisotropie a_{LT} du modèle (b) de Guitard *et al* et du coefficient équivalent a_G correspondant au modèle (a) de Gibson *et al*. On constate que pour des masses volumiques faibles, inférieures à $0,5 \text{ g/cm}^3$, les deux schématisations sont quasi équivalentes et prévoient des anisotropies L/T d'autant plus élevées que la valeur de la masse volumique est faible. Pour des structures de densité supérieure à $0,5$, le modèle de Guitard *et al* (2002) (sens T) indique une anisotropie géométrique tissulaire L/T supérieure à celle prévue par le modèle proposé par Gibson *et al* (1988). Néanmoins, pour de telles valeurs de densité, le niveau d'anisotropie prévue par le modèle (b) à cellules rectangulaires est peu supérieur à 3 et tout à fait insuffisant pour rendre compte des rapports L/T observés expérimentalement.

3.1.2 Conclusion

L'ordre de grandeur du coefficient d'anisotropie L/T du bois, observé expérimentalement et voisin de 15 à 20, n'est expliqué que partiellement par la géométrie de l'organisation cellulaire, assimilée à une structure nid d'abeille. La porosité (et son corollaire e/D) ne peut donc constituer qu'un facteur explicatif partiel de l'anisotropie élastique du tissu ligneux. Pour des masses volumiques comprises entre $0,4$ et $0,8 \text{ g/cm}^3$, il apparaît que, selon les modèles, le coefficient géométrique d'anisotropie L/T prend des valeurs comprises entre 6 et 1. Une part importante de l'anisotropie L/T observable à l'échelle « mésoscopique » tissulaire est, en conséquence, directement imputable à l'anisotropie élastique microscopique L/T de la double paroi (donc de la paroi) cellulaire, laquelle s'explique essentiellement par le renforcement de la sous-couche S_2 par les renforts filamentaires que constituent les microfibrilles orientées de cellulose. Compte tenu de la démarche d'analyse multi échelle adoptée dans ce travail, il convient maintenant de quantifier la proportion d'anisotropie tissulaire imputable à la différenciation des cellules en cellules dites de bois initial et bois final.

3.2 Hétérogénéité tissulaire et anisotropie élastique du bois normal

Pour rendre compte de l'anisotropie élastique macroscopique du cerne, les homogénéisations prédictives évoquées au chapitre 1 et mises en œuvre au chapitre 2 (Passage 3), assimilent le cerne d'accroissement à un ensemble composite de couches (strates) élaborées à partir de tissus ligneux (bois initial et final) supposés morphologiquement parfaitement différenciés (en terme d'épaisseurs de paroi comme en terme de diamètres cellulaires).

Pourtant, la bibliographie relative aux différences morphologiques expérimentalement observables entre des cellules de bois initial et de bois final, présente un caractère fortement contradictoire. Une des raisons de cette disparité tient en une variabilité inter spécifique et intra spécifique de forme cellulaire fortement dépendante des conditions de croissances (Botosso, 1997) auquel s'ajoute l'effet « âge du cerne ». Il a ainsi été montré sur *Picea abies* (Sarèn *et al*, 2001) que la morphologie cellulaire varie selon la position de l'examen microphotographique par rapport à la moelle ; de cellules quasi circulaires proches du centre, on arrive à des cellules approximativement rectangulaires au fur et à mesure d'une progression centrifuge radiale vers le cambium.

Par conséquent, seront évoquées par la suite, des informations se référant à un cerne de bois adulte d'essence résineuse, et ce, pour des conditions de croissance fixées. Ces éléments, pour la plupart bibliographiques, n'auront alors pour objectif que d'explicitier les tendances générales accompagnant, en terme de modifications morphologiques, la transition d'un bois initial à un bois final dans un ensemble de cernes proches en âge.

Ces informations seront ensuite employées pour étayer, via deux simulations analytiques intracorne, une discussion du rôle de la morphologie cellulaire sur l'anisotropie élastique du cerne dépourvu de rayons ligneux.

3.2.1 Différence de morphologie cellulaire entre le bois initial et le bois final

3.2.1.1 Une distinction visuelle parfois délicate

Des tentatives de définitions des limites entre le bois initial et final en termes géométriques ont été réalisées mais souvent discutées. Parmi elles, le critère de Mork (1928, cité dans Denne, 1988 et illustré sur la Figure 3.4), liant épaisseurs de paroi (e) et largeur des lumens (L_L), a été très souvent employé afin de « formaliser » analytiquement une distinction entre bois initial et final qui n'était jusqu'alors que visuelle (et donc entachée d'une incertitude liée à l'observation humaine). Néanmoins, une récente synthèse (Denne, 1988) a montré la nécessité de rediscuter certains résultats admis par Mork (1928) et repris en l'état par de très nombreux auteurs (représentativité des dimensions de cellules relevées en regard des variations inter cerne, interprétation des formules initialement proposées).

Denne (1988) fait ainsi état de l'existence, dans la littérature, de deux définitions géométriques différentes des trachéides de bois final (Figure 3.4, Formules 1 et 2).

Utilisant tour à tour les deux formulations du critère avancé par Mork (1928), ce dernier auteur montre, sur quelques Pins (Tableau 3.4), d'une part que la proportion calculée de bois final dans un cerne diffère notablement selon l'expression employée, et d'autre part, que les deux formules précitées ne peuvent être appliquées à toutes les espèces (*Pinus contorta* et *Pinus strobus* présentent alors une texture nulle !).

Dans le cas où les deux inéquations (Formules 1 et 2, Tableau 3.4) conduisent à des résultats plausibles, l'écart entre les deux prédictions est d'autant plus sensible que les différences morphologiques relevées entre le bois initial et final sont faibles (Tableau 3.4, *Pinus pinaster*, cas c).

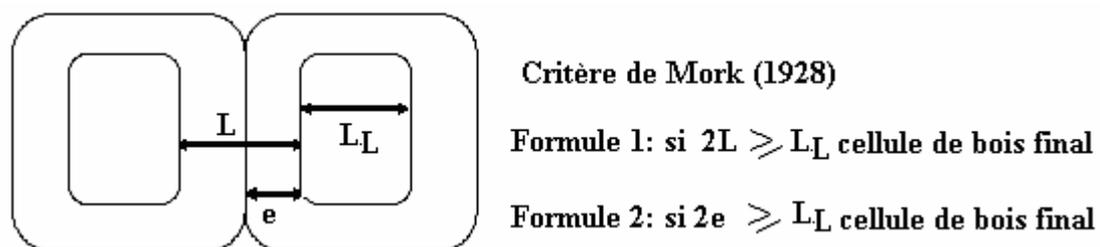


Figure 3.4 : Les deux interprétations du critère de définition du bois final proposé par Mork (1928)
L : double épaisseur cellulaire, L_L : largeur de lumen, e : épaisseur de paroi
Tiré et adapté de Denne (1988)

Pinus	% de bois final calculé par application de	
	Formule 1	Formule 2
a) taeda	30	28
b) pinaster	27	13
c) contorta	29	0
d) strobus	0	0

Tableau 3-4 : Pourcentage de bois final calculé à partir des deux interprétations du critère de Mork sur 4 essences résineuses, tiré et adapté de Denne (1988).

3.2.1.2 Tendances générales

D'après Ferrand (1982), dans le bois normal des conifères, c'est l'épaisseur de paroi qui augmente le plus fortement lors de la transition physiologique bois initial bois final ; le diamètre (essentiellement radial) des cellules varie également, mais sans changer d'ordre de grandeur. Decoux *et al* (non publié) relie, quant à eux, l'augmentation de densité observée par micro densitométrie, essentiellement à des augmentations d'épaisseurs pariétales.

Des études microphotographiques ont montré sur quelques résineux, que les changements de dimensions cellulaires (diamètres comme épaisseurs) sont plus prononcés dans la direction radiale que dans la direction tangentielle du cerne (*Picea abies*, Erickson *et al*, 1974, *Latix laricina*, *Picea glauca*, *Picea mariana*, Marguerie *et al*, 2000, *Picea abies*, Douglas Fir, *Pinus sylvestris*, Decoux *et al*, non publié).

Les recherches menées par Marion (2001), sur *Picea abies*, établissent, par construction analytique de cellules moyennes de bois initial et final (à partir d'un ensemble de photographies de plan ligneux et analyse d'images), que le diamètre tangentiel évolue peu lors du passage d'un bois de printemps à un bois d'été. Pour cet auteur, l'expansion cellulaire (ovalisation) du bois normal se fait principalement dans la direction radiale.

Admettant la conservation du diamètre tangentiel à l'intérieur du cerne de croissance, et assimilant à un carré la morphologie de la cellule de bois initial, Fengel *et al* (1973), Boyd (1974b), considèrent pour leur part, que l'essentiel des modifications géométriques accompagnant la transition morphologique bois initial bois final peut être résumée à un doublement de l'épaisseur de la paroi radiale.

Pour Bergander (2001), le passage bois initial bois final sur *Picea abies*, s'accompagne d'une modification majeure et plus complexe de la géométrie cellulaire ; d'un bois initial présentant des cellules de forme hexagonale on arrive, dans le bois final, à des cellules de forme rectangulaire. Les variations de l'épaisseur et des diamètres ne sont pas explicitées dans ses travaux.

L'examen de ces tendances générales, présentées dans la littérature, et leur comparaison aux valeurs caractéristiques des cellules virtuelles dites de bois initial et final, élaborées au chapitre 2, suggère quelques commentaires.

Les paramètres géométriques des cellules dites de bois initial et de bois final, (Tableau 2.4 du chapitre 2) obtenus via la démarche d'optimisation précédemment explicitée (construction du RSV), répondent assez bien aux propositions bibliographiques avancées par l'ensemble des auteurs précités.

Le passage d'une cellule de bois initial à une cellule de bois final est ainsi caractérisé par :

- une relative constance du diamètre tangentiel cellulaire (de $D_{Ti} = 30 \mu\text{m}$ à $D_{Tf} = 35 \mu\text{m}$, valeurs optimisées),
- une augmentation au moins double de l'épaisseur radiale ($e_{Ri} = 0.85 \mu\text{m}$, $e_{Ti} = 1.06 \mu\text{m}$; $e_{Rf} = e_{Tf} = 2.8 \mu\text{m}$),
- une diminution importante (plus de 50%) du diamètre radial (de $D_{Ri} = 37.5 \mu\text{m}$ à $D_{Rf} = 15 \mu\text{m}$).

S'il est ainsi possible, pour chacun des types de cellules rencontrées dans le cerne de bois normal, de disposer d'un jeu de paramètres géométriques (D_R , D_T , e_R , e_T) spécifiques, la simulation analytique du passage d'une catégorie de cellule (bois initial, bois final) à l'autre est délicate. En effet, devant l'actuelle absence d'étude faisant état des liens biologiques reliant les variations d'un paramètre géométrique à celles d'un autre, il apparaît délicat d'adopter un pas de variation relative pour un paramètre géométrique, dont seules sont connues les valeurs bornes.

Pour ces raisons, et avec objectif unique de rendre compte de l'effet d'une ovalisation sur les caractéristiques élastiques tissulaires, nous serons conduits à simuler le passage d'une cellule de bois initial à une cellule de bois final par un ensemble de modifications géométriques simples (deux types de simulation).

- La cellule de bois initial sera en premier lieu assimilée à une cellule carrée, d'épaisseur constante, ne subissant de modifications géométriques qu'en terme de diamètre radial (conformément aux propositions de Fengel *et al*, 1973 et de Boyd, 1974b, 1977).
- Dans un second temps, la transition d'une cellule de bois initial à celle d'un bois final sera simulée par des variations simultanées simples de diamètre radial et d'épaisseurs.

3.2.2 Distinction densitométrique entre le bois initial et le bois final

Les profils de densité intra cerne ne laissent généralement pas apparaître de transition abrupte lors du passage bois initial bois final (Holmberg *et al*, 1999, Leban, 1999a, 1999b). La pertinence d'une démarche de discrétisation du cerne (bois initial/bois final) en terme de densité demande donc à être évaluée en regard de quelques résultats proposés dans la littérature.

Des modélisations prédictives des variations intra cerne de la masse volumique du bois ont été présentées pour différentes espèces de gymnospermes (Leban, 1999a, 1999b). Si ces descriptions analytiques sont belles et bien spécifiques à chaque genre de résineux, elles présentent néanmoins l'avantage d'être assez proches les unes des autres au niveau de leur formulation.

Ces modèles segmentés, considèrent ainsi que l'évolution de la densité dans le cerne, peut être traduite par un raccordement de 3 fonctions affines « densité, position dans le cerne » (correspondant aux zones dites de bois initial, zone de transition, bois final).

Les meilleures estimations (corrélations statistiques) de l'évolution de la densité intra cerne sont obtenues (Leban 1999a, 1999b) en associant des paramètres caractéristiques de chacune des zones précédentes à l'âge et à la largeur de cerne, comparativement à celles associant une variation de masse volumique moyenne à la largeur des cernes et à leur âge. La discrétisation du cerne, en terme de densité (bois initial, final, zone de transition) est donc envisageable.

Pour établir « numériquement » une limite entre le bois initial et final, la méthode la plus couramment utilisée, et employée dans la suite de ce chapitre (utilisation de profils microdensitométriques), consiste à définir la frontière entre les deux types de bois, par la moitié de la différence entre le maximum et le minimum de densité de chaque cerne, ce qui permet alors, de s'affranchir des variations de densité inter cerne (Mäkinen *et al*, 2002, Leban, 1999b).

En conclusion, s'il apparaît difficile d'établir un critère géométrique reproductible permettant de distinguer, pour toutes les essences résineuses, les deux types de cellules dites initiales et finales, la discrétisation possible du cerne d'accroissement en terme de densité ainsi que l'examen microphotographique confirment l'existence d'une réelle hétérogénéité tissulaire. Les paragraphes précédents ayant montré l'importance de la porosité et de la morphologie cellulaire respectivement sur les rapports d'anisotropie élastique à l'échelle du cerne et à l'échelle tissulaire, il apparaît nécessaire d'évaluer l'influence, sur ces mêmes rapports, de la présence des deux catégories de cellules (bois initial et final) et de caractériser « mécaniquement » la transition de l'une à l'autre.

3.2.3 La texture, facteur d'anisotropie élastique dans le plan transverse

Comme cela a été indiqué précédemment (chapitre 1), le bois présente une hétérogénéité selon la direction radiale à l'intérieur d'un même cerne de croissance ; ceci s'explique par le passage progressif d'un tissu ligneux, de porosité élevée, adapté à la conduction de la sève, vers un tissu plus dense à parois cellulaires plus épaisses, mieux adapté à la fonction mécanique de support.

Les modèles mécaniques tissulaires présentés dans le deuxième chapitre (Passage 3) permettent de préciser les effets de l'ovalisation des cellules et de la modification de l'épaisseur de paroi, sur l'anisotropie élastique transverse. L'ovalisation des cellules est schématisée sur la Figure 3.5a, par la diminution du diamètre radial D_R par rapport au diamètre tangentiel D_T , lorsque l'on progresse vers le bois final. Ceci correspond assez bien, d'après la bibliographie présentée au paragraphe précédent, à ce qui est observable, en première approximation, sur la majorité des plans ligneux de résineux (la Figure 3.5 b en est un exemple sur *Picea abies*).

Pour apprécier l'influence de l'ovalisation cellulaire, l'analyse est menée en premier lieu en se plaçant dans les conditions particulières suivantes.

3.2.3.1 Ovalisation radiale

La cellule de départ est choisie carrée et représentative (via la masse volumique fixée à $0,35\text{g/cm}^3$ d'un tissu de bois initial. Le passage du bois initial au bois final, est alors, à cette étape de la discussion, simulé par une unique variation continue du diamètre radial. Cette transition aboutit donc à une morphologie cellulaire rectangulaire dont les caractéristiques sont précisées par la relation 3.11

$$(3.11) \quad E_{Tp} = E_{Rp} \quad , \quad e_T = e_R = e$$

$$D_T = D \quad \quad D_R = \lambda D \text{ avec } \lambda \leq 1$$

Les paramètres géométriques épaisseur de paroi et diamètre tangentiel sont fixés, d'une part, avec le souci d'être réalistes en regard de la bibliographie (Tableaux 2.3 et 2.6 du chapitre 2) et d'autre part de manière à obtenir une masse volumique cohérente en regard de divers profils microdensitométriques.

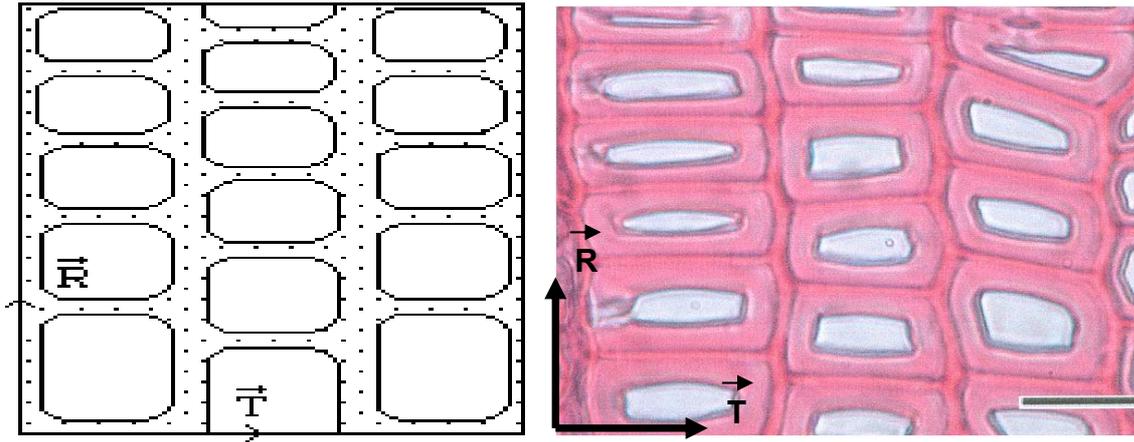


Figure 3.5 (a) Ovalisation selon la direction radiale, (b) coupe transversale de *P. abies* colorée à la safranine et au bleu alcyan, Ruelle (2003), montrant un quasi alignement des parois radiales (grossissement x 500, barre d'échelle 25 μ m)

Sous ces restrictions, les relations (2.15 du chapitre 2), (3.1) et (3.2) deviennent respectivement (3.12), (3.13) et (3.14):

$$(3.12) \quad \rho = \rho_m (1 - P_0) = 2 \rho_m \frac{e}{D} \left[\frac{1}{\lambda} + 1 - 2 \frac{e}{\lambda D} \right]$$

$$(3.13) \quad \frac{E_L}{E_R} = \left[1 - \frac{2e}{\lambda D} + \frac{1}{\lambda} \right] \frac{E_{Lp}}{E_{Tp}} = a_{LR} \frac{E_{Lp}}{E_{Rp}}$$

$$(3.14) \quad \frac{E_L}{E_T} = \left[1 + \frac{1}{64} \frac{e}{D} \left(\frac{\lambda D}{e} - 2 \right)^3 \right] \left[1 - 2 \frac{e}{D} + \lambda \right] \frac{E_{Lp}}{E_{Tp}} = a_{LT} \frac{E_{Lp}}{E_{Tp}}$$

Le rapport d'anisotropie transverse tissulaire (mésoscopique) s'écrit enfin (3.15)

$$(3.15) \quad \frac{E_R}{E_T} = \left[1 + \frac{1}{64} \frac{e}{D} \left(\frac{\lambda D}{e} - 2 \right)^3 \right] \frac{E_{Rp}}{E_{Tp}}$$

Les trois coefficients a_{LR} , a_{LT} et a_{RT} ainsi définis, caractérisent l'influence de l'ovalisation λ des cellules sur l'anisotropie élastique du tissu ligneux.

Les Figures 3.6 et 3.7 illustrent les modifications des coefficients géométriques d'anisotropie associées à une diminution du diamètre radial D_R par rapport au diamètre tangentiel D_T . Les applications numériques sont conduites à partir d'un facteur de forme $e/D = 0,06$, qui correspond pour des cellules carrées à une masse volumique de $0,35 \text{ g/cm}^3$ (bois initial).

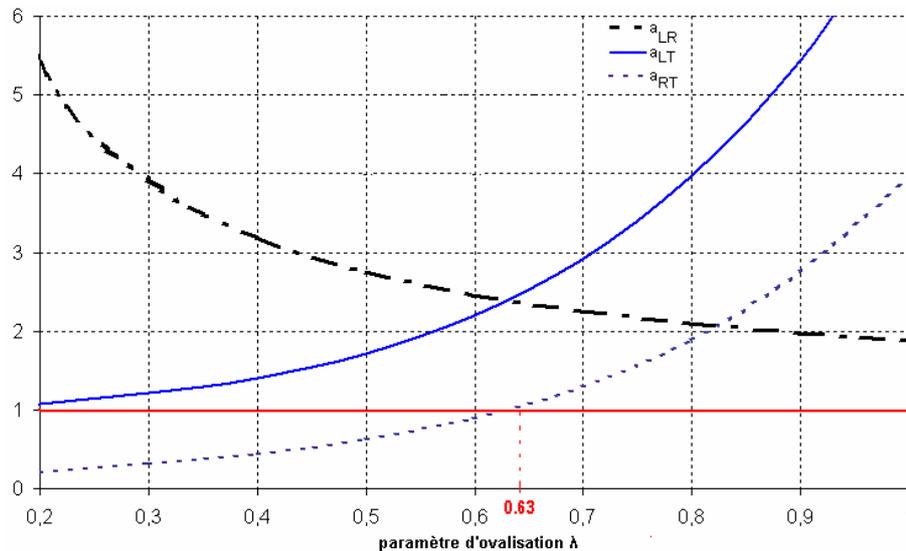


Figure 3.6 : Variations des coefficients d'anisotropie tissulaires en fonction du paramètre d'ovalisation λ

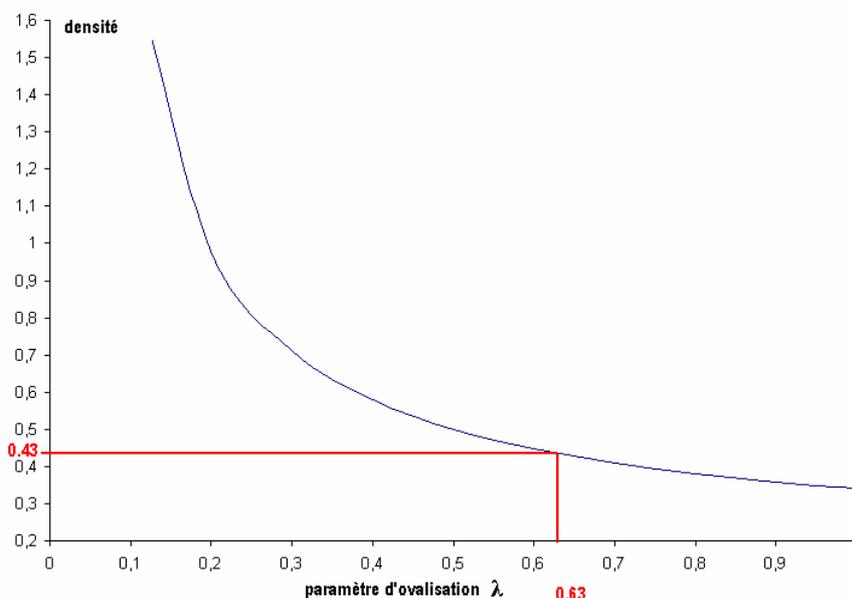


Figure 3.7 : Evolution du paramètre d'ovalisation λ en fonction de la densité

Dans ces conditions, on constate que, pour des valeurs de D_R décroissantes, la masse volumique augmente, d'où une diminution de la porosité et d'autre part, que les facteurs a_{LT} et a_{LR} évoluent en sens opposés. Ceci se traduit (Figure 3.6) par un coefficient géométrique

d'anisotropie dans le plan transverse a_{RT} qui devient inférieur à 1, pour $\lambda = 0,63$, c'est à dire une masse volumique de $0,43 \text{ g/cm}^3$ (Figure 3.7), avec pour conséquence directe une inversion de l'anisotropie dans le plan transverse.

Sous l'effet de ce seul paramètre géométrique λ (on rappelle ici l'absence des rayons ligneux, éléments essentiels de renfort radial), le module d'élasticité tangentiel E_T d'un tissu, assimilable par la forme de ses cellules à un tissu de bois final, deviendrait supérieur au module E_R , contrairement à des propositions bibliographiques statistiques (modèles prévisionnels l'anisotropie élastique, Guitard, 1987).

En outre, des rapports d'anisotropie élastique L/T (facteur a_{LT}) de l'ordre de 20 ne peuvent être obtenus par seul effet de l'ovalisation résultant d'une transition d'une cellule de bois initial vers une cellule de bois final.

3.2.3.2 Etablissement d'un lien entre variations d'épaisseurs pariétales et diamètre radial

Associant microphotographies et études microdensitométriques sur *Picea abies*, Holmberg *et al* (1999), suggèrent une croissance lente de la densité dans le bois initial liée à une augmentation modérée de l'épaisseur, à diamètre radial constant. Pour ces derniers auteurs, dans la zone de transition, l'épaisseur pariétale augmente rapidement (avec pour conséquence directe une croissance rapide de la densité), tandis que le diamètre radial décroît. Dans le bois final, si la densité croît lentement, le diamètre radial demeure constant alors que l'épaisseur de paroi augmente.

Pour compléter l'étude précédente, en tenant compte des liens probables (non explicités dans la littérature) entre les variations d'épaisseurs pariétale et celles du diamètre radial, une simulation analytique des modifications des rapports d'anisotropie tissulaire est réalisée à partir de profils microdensitométriques sur du bois adulte de *Picea abies* fournis par P. Rozenberg (INRA Orléans, Unité d'Amélioration, Génétique et Physiologie Forestière).

Le choix de l'accroissement annuel utilisé (zone B) s'est fait :

- d'une part avec la volonté de ne pas avoir un profil de densité trop irrégulier (reprise de croissance, zone A sur la Figure 3.8)
- afin de disposer de la plus large gamme de relevés densitométrique (la zone B est préférée à la zone C).

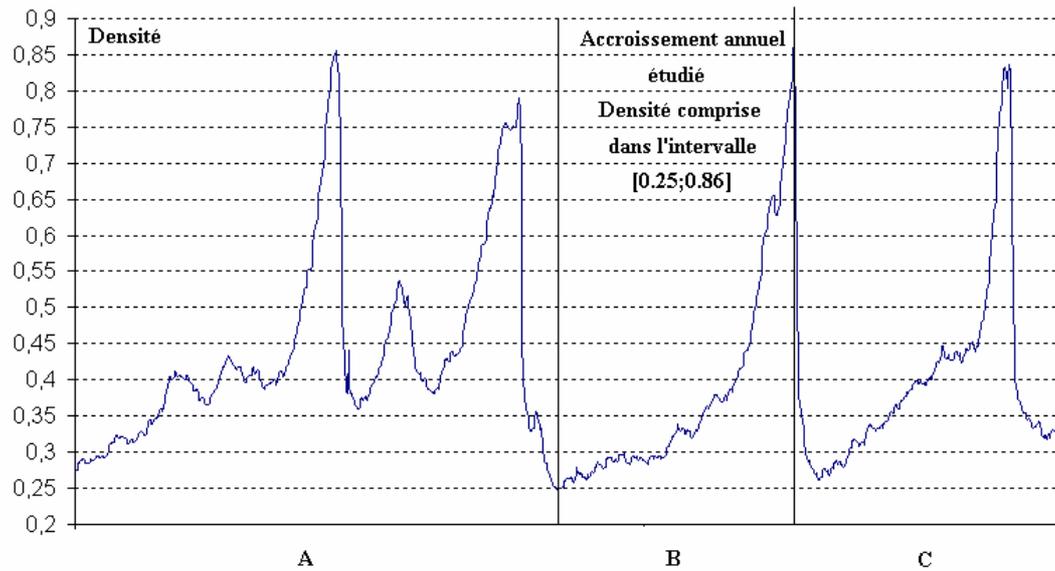


Figure 3.8 Exemple de profil microdensitométrique d'étude sur *P.abies* (données numériques fournies par Rozenberg). Densité mesurée par absorption d'un rayonnement X

3.2.3.2.1 Lien entre l'épaisseur et le diamètre radial via la masse volumique

La morphologie de la cellule initiale est choisie comme carrée. Une fois cette conformation adoptée, les paramètres géométriques cellulaires, épaisseur pariétale (e) et diamètre tangentiel (D), sont fixés sous les trois contraintes suivantes (Figure 3.8).

- La masse volumique initiale ρ , liée au facteur de forme cellulaire e_0/D (3.12) est choisie via un ensemble de profils microdensitométriques pour être représentative du bois initial (méthode de la moyenne décrite par Leban, 1999b). La valeur retenue est 0.25 g/cm^3 .
- L'épaisseur pariétale initiale ($e_T = e_R = e_0$) doit répondre à des propositions bibliographiques déjà présentées (valeur comprise au centre d'un intervalle apte à rendre compte d'une variabilité intra arbre, Guitard *et al*, 2002).
- Le diamètre cellulaire tangentiel D est calculé, puis sa valeur déduite est confrontée à des références bibliographiques (Boyd, 1974).

Les caractéristiques de chaque type de cellule sont donc :

Pour la cellule dite de bois initial : épaisseurs radiale et tangentielle non distinctes et fixées à $e_0 = 1 \mu\text{m}$, diamètre tangentiel fixé à $D = 23 \mu\text{m}$, facteur de forme $e_0/D = 0.04$, diamètre radial $D_R = D$.

Pour la cellule dite de bois final : épaisseurs radiale et tangentielle variables e , diamètre tangentiel fixe D , diamètre radial D_R variable.

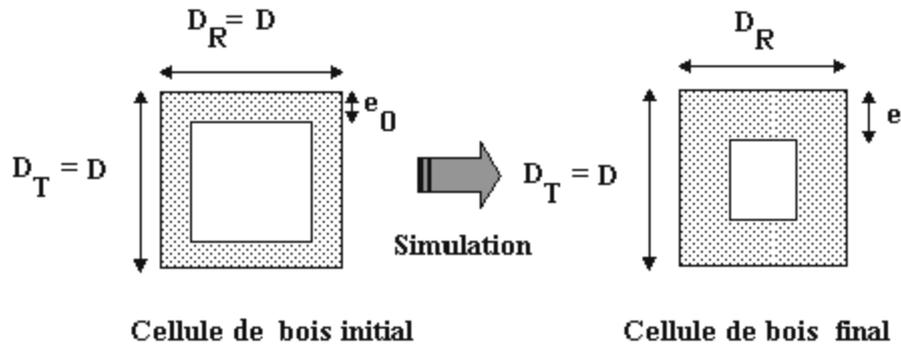


Figure 3.9 : Modifications de la géométrie tissulaire envisagées lors de la transition d'une cellule de bois initial à une cellule de bois final

Dans cette simulation, le diamètre radial D_R est soumis à une décroissance linéaire : les bornes ($D_R \text{ min} = 15 \mu\text{m}$ et $D_R \text{ max} = 23 \mu\text{m}$) de l'intervalle de variations sont conformes aux valeurs rencontrées dans la littérature (dont quelques exemples ont été donnés dans le Tableau 2.3 du chapitre 2), le pas de variations est déterminé en fonction des bornes précédemment définies et du nombre de relevés microdensitométriques disponibles (245 valeurs relevées tous les $24\mu\text{m}$). La valeur du pas de variations de D_R est donc directement obtenue en divisant l'écart entre les extrema (valeurs bornes) par le nombre de relevés microdensitométriques. Une telle procédure permet d'éviter une transition abrupte d'un bois initial à un bois final conformément à des constatations anatomiques (passage progressif du bois initial au bois final sur ce résineux, Venet *et al*, 1986).

Moyennant les hypothèses précédentes, la relation (2.13) du chapitre 2 devient (3.16) :

$$(3.16) \quad \frac{\rho}{2\rho_m} = \left[\frac{e}{D_R} + \frac{e}{D} - \frac{2e^2}{D \cdot D_R} \right]$$

Posant $A = \frac{\rho}{2\rho_m}$, cette dernière expression devient :

$$A \cdot D_R \cdot D = e \cdot D + e \cdot D_R - 2e^2$$

En posant de plus B tel que : $A \cdot D = B$, l'unique solution (biologiquement acceptable) de l'équation du second degré (3.16) est alors exprimée selon (3.17) :

$$(3.17) \quad e_1 = \frac{(D + D_R) + \sqrt{(D + D_R)^2 - 8 \cdot B \cdot D_R}}{4}$$

Le Tableau 3.5 résume ainsi pour quelques valeurs remarquables de densité relevées expérimentalement (microdensitométrie), les diamètres radial D_R et épaisseurs de paroi (e_1) calculés, ainsi que les différents coefficients d'anisotropie géométriques a_{LR} , a_{LT} et a_{RT} précédemment définis (relations 3.4, 3.4 et 3.6).

La Figure 3.9 représente, de manière plus exhaustive et ce pour chaque relevé microdensitométrique, les variations des valeurs attribuées aux paramètres diamètre radial et épaisseur de paroi en fonction de la densité relevée.

Densité	D_R calculé (en μm)	e_1 calculée (en μm)	Paramètre d'ovalisation λ	a_{LR}	a_{LT}	a_{RT}
0,25	22,92	1	1	1,91	13,85	7,24
0,3	20,75	1,13	0,91	2	7,92	4,38
0,35	17,81	1,23	0,78	2,15	4,42	2,65
0,4	16,59	1,35	0,72	2,22	3,2	1,99
0,45	16,1	1,52	0,7	2,23	2,61	1,66
0,5	15,9	1,7	0,69	2,23	2,26	1,46
0,54	15,69	1,84	0,68	2,23	2,06	1,35
0,6	15,53	2,06	0,68	2,21	1,86	1,24
0,65	15,32	2,21	0,67	2,21	1,74	1,18
0,7	14,92	2,33	0,65	2,22	1,64	1,13
0,75	14,79	2,51	0,65	2,21	1,57	1,1
0,81	14,63	2,73	0,64	2,19	1,5	1,07
0,86	14,51	3	0,63	2,17	1,44	1,05

Tableau 3-5 : Simulation intra cerne de l'évolution du diamètre radial et de l'épaisseur en fonction de la densité sur l'Epicéa ; conséquences sur les rapports d'anisotropie tissulaire

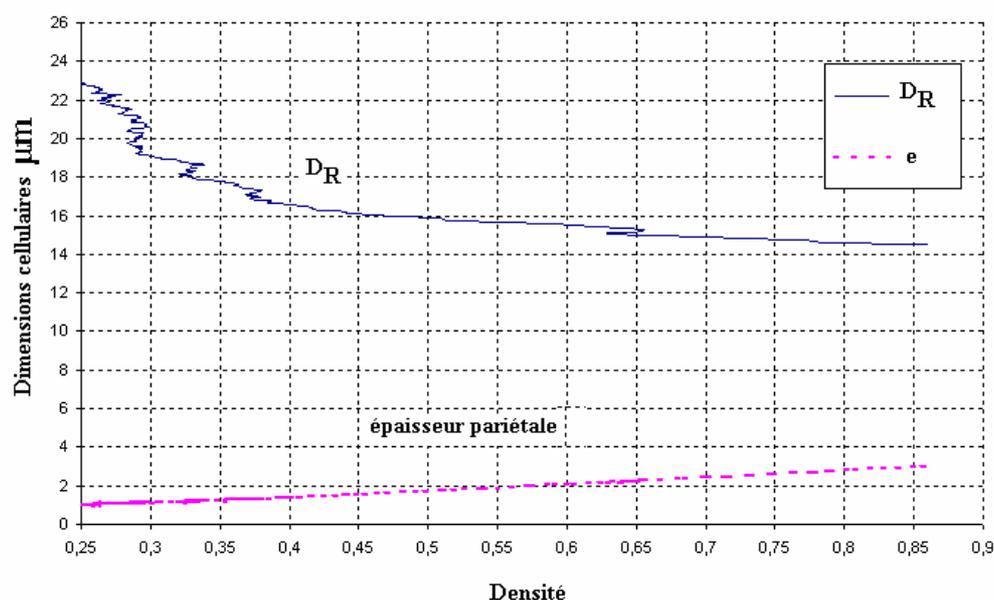


Figure 3.10 Variations simultanées des paramètres diamètre radial et épaisseur de paroi dans le cadre d'une simulation basée sur un relevé microdensitométrique réalisé sur du bois adulte d' Epicéa (*Picea abies*)

Une première remarque est que le rapport d'anisotropie élastique L/T traduit par la valeur du coefficient a_{LT} n'est toujours pas de l'ordre de la valeur suggérée ($L/T = 20$) par Guitard (1987). L'allure générale des évolutions (Tableau 3.5) des coefficients d'anisotropie géométriques a_{LR} , a_{LT} et a_{RT} avec la densité est semblable à celle établie en ne faisant pas varier l'épaisseur de paroi (paragraphe précédent). A une augmentation de la densité sont simultanément associées une augmentation de l'anisotropie L/R (facteur a_{LR}) et une diminution de l'anisotropie L/T (a_{LT}).

Une différence notable par rapport à la précédente simulation (Figure 3.7) réside en l'impossibilité d'une inversion de l'anisotropie transverse (facteur a_{RT} du Tableau 3.5) pour la gamme de densité explorée (de 0,25 à 0,86). Cette dernière remarque montre le réalisme du modèle ici décrit et alimenté par un jeu, en partie expérimental, de données structurales.

En second lieu, et ce conformément à des propositions bibliographiques tirées d'examen microphotographiques (Panshin *et al*, 1980), la Figure 3.9, comme le Tableau 3.5 font apparaître des variations relatives intra cerne d'épaisseurs pariétales (e) plus importantes que celles du diamètre radial D_R . Dans la simulation analytique, si D_R décroît de 23 μm à 14 μm , l'épaisseur pariétale varie du simple au triple (de 1 à 3 μm). Les sens de variations avec la densité intra cerne des paramètres géométriques cellulaires diamètres et épaisseurs, observables sur la Figure (3.9), sont comparables aux résultats obtenus à partir des données numériques fournis par J.M. Leban (INRA, Nancy, LERFORB, ERQB) sur du bois adulte de 5 essences résineuses (Figures 3.11 3.12, 3.13, mesures des paramètres D_R , D_T , par planimétrie et relevés microdensitométriques par absorption des rayons X). Si, conformément à la littérature évoquée précédemment, la diminution du diamètre radial D_R accompagnant la transition d'une cellule de bois initial à une cellule de bois final est relativement bien admise, l'épaisseur de paroi ne peut être considérée comme un paramètre constant.

Ces deux variations simultanées de diamètre radial et d'épaisseur doivent donc être hiérarchisées afin d'évaluer les modifications des coefficients d'anisotropie géométriques (rapportées dans le Tableau 3.5) accompagnant le passage d'un bois initial à un bois final. Une simulation est tentée (Tableau 3.6) avec, dans le cas 1, pour une cellule de bois initial, une variation du diamètre D_R à épaisseur de paroi e fixée, tandis que dans le cas 2, seule l'épaisseur e varie de 1 μm à 3 μm . Dans les deux cas les valeurs bornes de chaque paramètre sont issues du Tableau 3.5.

La première partie du Tableau 3.6 (cas 1) montre les évolutions des différents rapports avec une diminution de D_R (valeurs bornes tirées de la simulation) à épaisseur de paroi constante. Ces résultats sont conformes aux évolutions des différents facteurs d'anisotropie a_{LR} , a_{LT} et a_{RT} , rapportées sur la Figure 3.7.

La seconde partie (cas 2, Tableau 3.6) montre les variations des mêmes rapports d'anisotropie a_{LR} , a_{LT} et a_{RT} avec une augmentation de l'épaisseur à diamètre radial D_R constant.

On remarque que les rapports d'anisotropies a_{LT} et a_{RT} évoluent dans le même sens pour les deux modifications géométriques cellulaires envisagées, ceci conformément aux résultats plus généraux de la simulation intra cerne (diminution des rapports a_{LT} et a_{RT}).

Pour le rapport a_{LR} , les évolutions sont différentes suivant la modification géométrique envisagée (à épaisseur constante, une diminution du paramètre D_R conduit à une augmentation de a_{LR} tandis qu'une augmentation d'épaisseur de paroi, à diamètre constant, entraîne une diminution de ce même facteur). Une comparaison avec l'évolution intra cerne du rapport d'anisotropie a_{LR} (augmentation lors du passage d'un bois initial à un bois final) rapporté dans le Tableau 3.5 confirme que la diminution de diamètre radial constitue, dans notre modélisation, la première modification géométrique explicative de l'augmentation de l'anisotropie L/R.

	Densité	D (μm)	D _R (μm)	e (μm)	a _{LR}	a _{LT}	a _{RT}
Cas 1							
	0,25	22,92	22,92	1	1,91	13,85	7,24
	0,28	22,92	18	1	2,16	6,44	3,79
	0,35	22,92	15	1	2,39	3,92	2,5
Cas 2							
	0,25	22,92	22,92	1	1.91	13.85	7.24
	0,48	22,92	22,92	2	1.83	3.93	2.15
	0,69	22,92	22,92	3	1.74	2.38	1.37

Tableau 3-6 : Simulation de l'impact des modifications univoques de l'épaisseur pariétale et du diamètre radial sur l'anisotropie élastique tissulaire

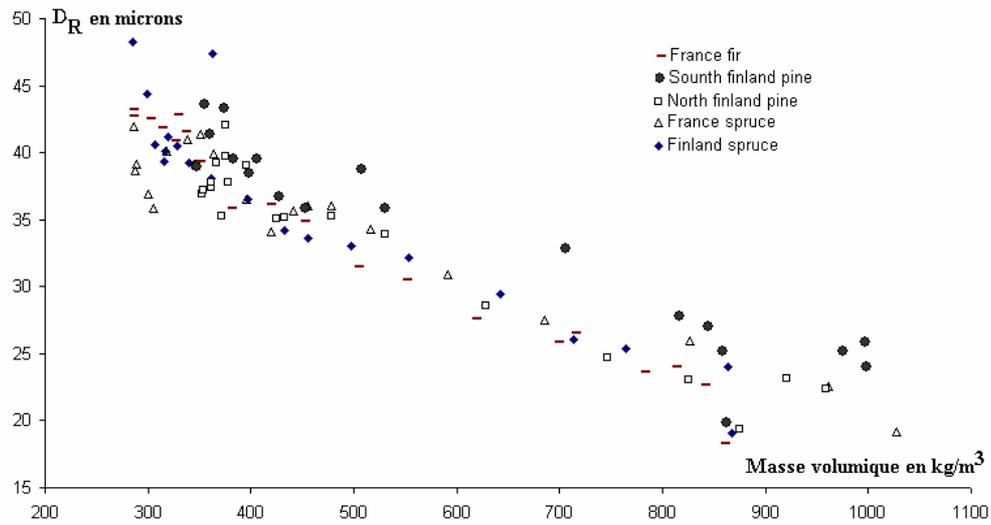


Figure 3.11 Evolutions intra cerne du diamètre radial pour différentes essences résineuses

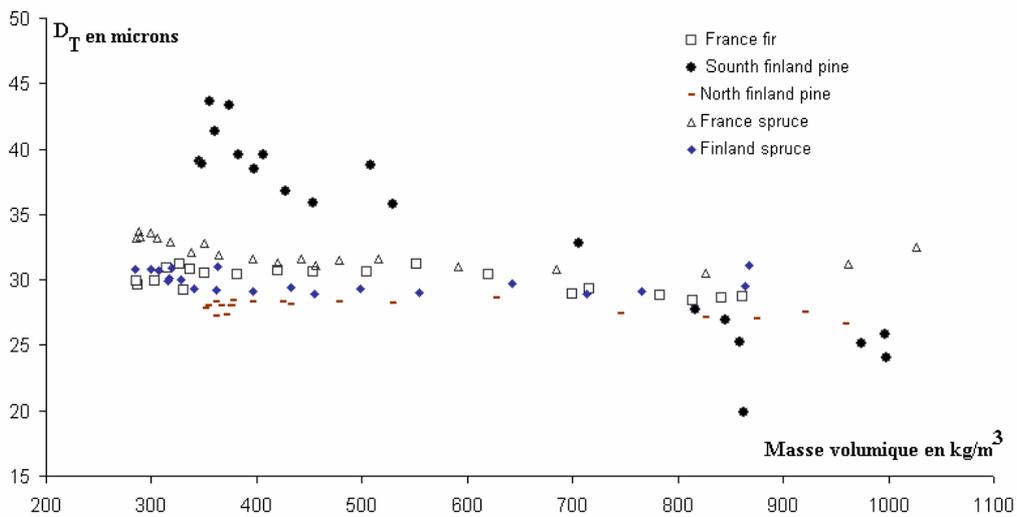


Figure 3.12 Evolutions intra cerne du diamètre tangentiel pour différentes essences résineuses

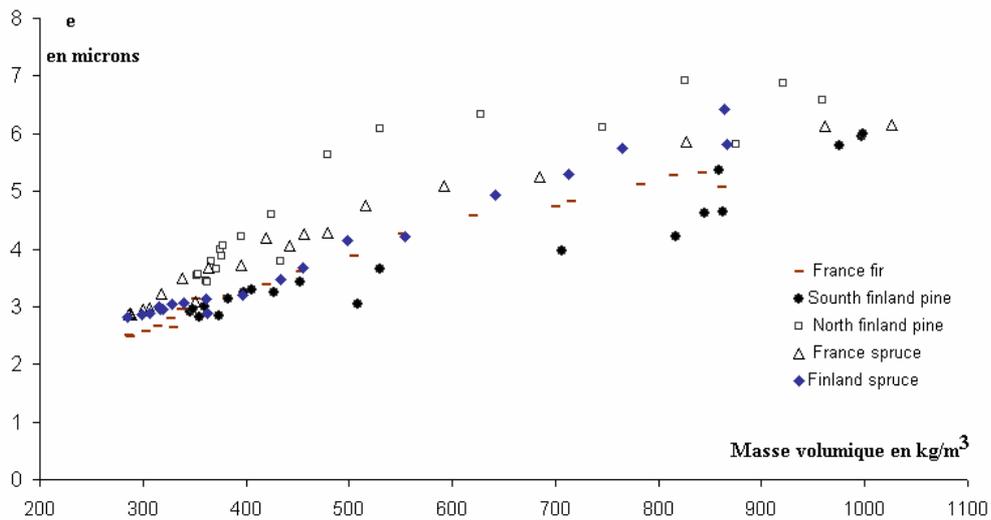


Figure 3.13 Evolutions intra cerne de l'épaisseur pariétale pour différentes essences résineuses

3.3 Rôle des rayons ligneux dans l'anisotropie élastique du cerne

L'association bois « infé » et rayons ligneux du chapitre 2 a notamment été établie en se basant sur l'hypothèse selon laquelle une fraction volumique en rayons ligneux (n) importante induit un renfort radial au détriment de la rigidité longitudinale (Barkas, 1941).

On notera que la qualité des régressions linéaires entre les modules d'Young macroscopiques E_L et E_R de plusieurs essences et leurs masses volumiques (ρ) a été améliorée (Guitard *et al*, 1987) par la prise en compte du paramètre (n).

Comme le montrent la Figure 3.14 et le Tableau 3.7, le paramètre (n) est donc un facteur qui intervient essentiellement sur l'anisotropie L/R (facteur a_{LR}) et L/T (a_{LT}). Une valeur élevée de (n) conduit à une réduction de l'anisotropie L/R (par une augmentation de E_R et une diminution de E_L) et à une augmentation de l'anisotropie L/T (diminution de E_T plus « rapide » que celle de E_L).

n (%)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E_L (GPa)	13,30	13,18	13,10	12,92	12,80	12,67	12,55	12,42	12,30	12,17	12,04
E_R (GPa)	0,88	0,95	1,00	1,08	1,15	1,22	1,29	1,35	1,42	1,49	1,56
E_T (GPa)	0,73	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53	0,51	0,48	0,46	0,44	0,42
a_{LR}	15,12	13,91	13,10	11,94	11,13	10,41	9,76	9,18	8,66	8,18	7,74
a_{LT}	18,34	19,46	20,60	21,63	22,67	23,70	24,70	25,67	26,62	27,54	28,44
a_{RT}	1,21	1,40	1,57	1,81	2,04	2,28	2,53	2,80	3,07	3,37	3,67

Tableau 3-7 Variations des coefficients d'anisotropie avec le paramètre (n). Le bois étudié est le RSV.

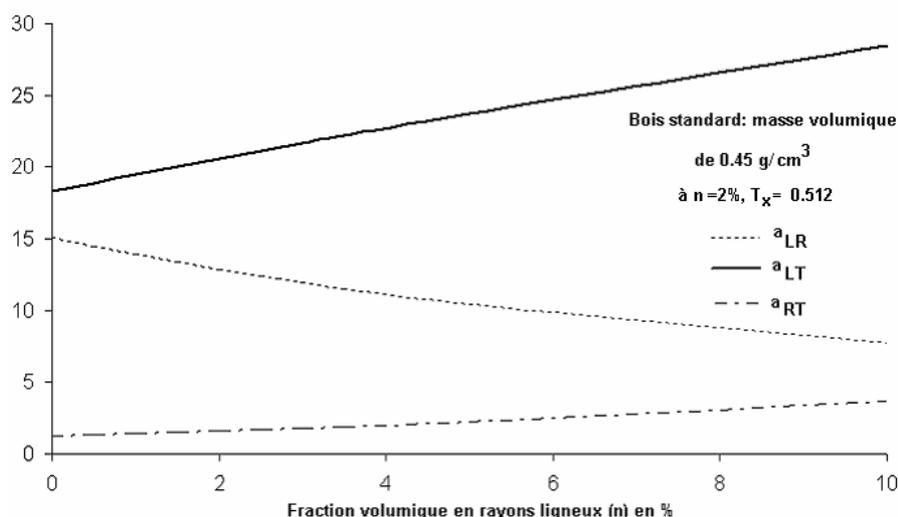


Figure 3.14 : Evolutions avec la fraction volumique en rayons ligneux des différents facteurs d'anisotropie

3.4 Influence des paramètres ultrastructuraux sur l'anisotropie élastique tissulaire

Les paragraphes précédents ont montré que des coefficients d'anisotropie tissulaire L/T classiquement rencontrés dans le bois normal, ne peuvent être expliqués que partiellement par l'influence de la géométrie cellulaire et de ses modifications (évolutions du rapport e/D via des variations de porosité ou par une ovalisation radiale).

La masse volumique contribue à une rigidification du matériau par effet « quantité de matière ». L'hétérogénéité tissulaire densitométrique du cerne est un paramètre de second ordre qui joue un rôle contradictoire à l'anisotropie élastique R/T observée sur les résineux. La fraction volumique en rayons ligneux est un paramètre sensible tel qu'à une valeur élevée de ce paramètre correspond une réduction du rapport d'anisotropie L/R

L'objet de ce paragraphe est donc d'une part, de préciser, numériquement, l'influence de quelques caractéristiques ultrastructurales de la matière ligneuse (module d'élasticité de la matrice, des fibres, inclinaison (φ) des microfibrilles dans la sous couche S_2) sur l'anisotropie élastique bipariétale (modélisation de type Squelette) et d'autre part, de déterminer leur influence directe sur les caractéristiques élastiques tissulaires mésoscopiques.

3.4.1 Sensibilité de l'anisotropie tissulaire L/T à l'angle des microfibrilles

Afin d'évaluer le rôle de l'inclinaison des microfibrille (φ) sur l'anisotropie des caractéristiques élastiques tissulaires, une estimation de l'influence d'un accroissement autour de valeurs particulières d'AMF (φ_0) sur les modules élastiques mésoscopiques de tissus est menée. L'influence de l'ovalisation ayant déjà été montrée (par l'intermédiaire du facteur a_{LT} lui-même dépendant du paramètre d'ovalisation λ), il convient de rechercher les facteurs complémentaires de variabilité de l'anisotropie élastique du tissu à une échelle d'observation inférieure.

Posant $c = \cos(\varphi)$, $s = \sin(\varphi)$ et $E = VE^f$, le rapport d'anisotropie bipariétale L/T, défini à partir des relations (2.27) et (2.28) présentées au chapitre 2, s'écrit (3.17)

$$(3.17) \quad \frac{E_{Lp}}{E_{Tp}} = \frac{D - Es^4}{D - Ec^4} = F(\varphi)$$

En ayant posé, pour alléger l'écriture ;

$$D = (1 - V) \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} E^m + VE^f$$

			Variation relative de l'anisotropie tissulaire L/T, pour des variations d'angle (φ) exprimées en °			
(φ_0) exprimé en °	Coefficient S (φ_0)	Valeurs de F (φ_0)	$\Delta_{LT}^{[+1]}$	$\Delta_{LT}^{[+2]}$	$\Delta_{LT}^{[-1]}$	$\Delta_{LT}^{[-2]}$
5	-104,912	17,817	-0,115	-0,259	0,093	0,170
10	-65,618	10,139	-0,127	-0,292	0,101	0,184
15	-32,809	6,008	-0,105	-0,235	0,087	0,160
20	-17,381	3,905	-0,084	-0,184	0,072	0,134
25	-10,104	2,743	-0,069	-0,148	0,060	0,114
30	-6,410	2,040	-0,058	-0,123	0,052	0,099
35	-4,394	1,577	-0,051	-0,108	0,046	0,089
40	-3,228	1,248	-0,047	-0,099	0,043	0,083
45	-2,521	1,000	-0,046	-0,096	0,042	0,081

Tableau 3-8 : Variations relatives de l'anisotropie tissulaire L/T autour de quelques valeurs d'AMF φ_0 choisies

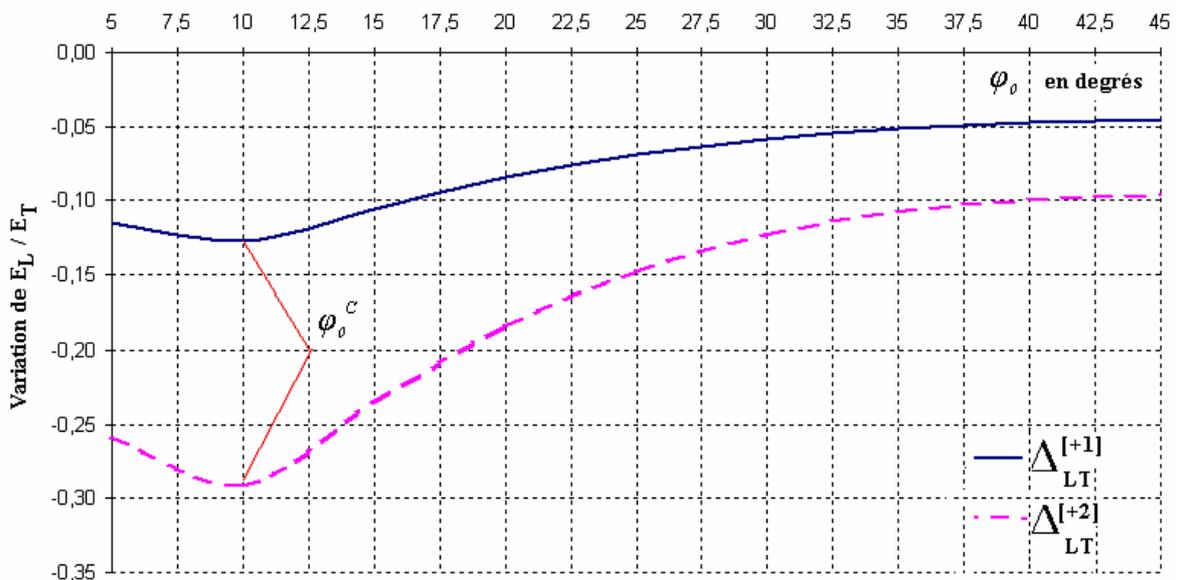


Figure 3.15 Incidence sur l'anisotropie tissulaire L/T d'un ajout de 1° et 2° autour de quelques valeurs d'AMF φ_0 choisies

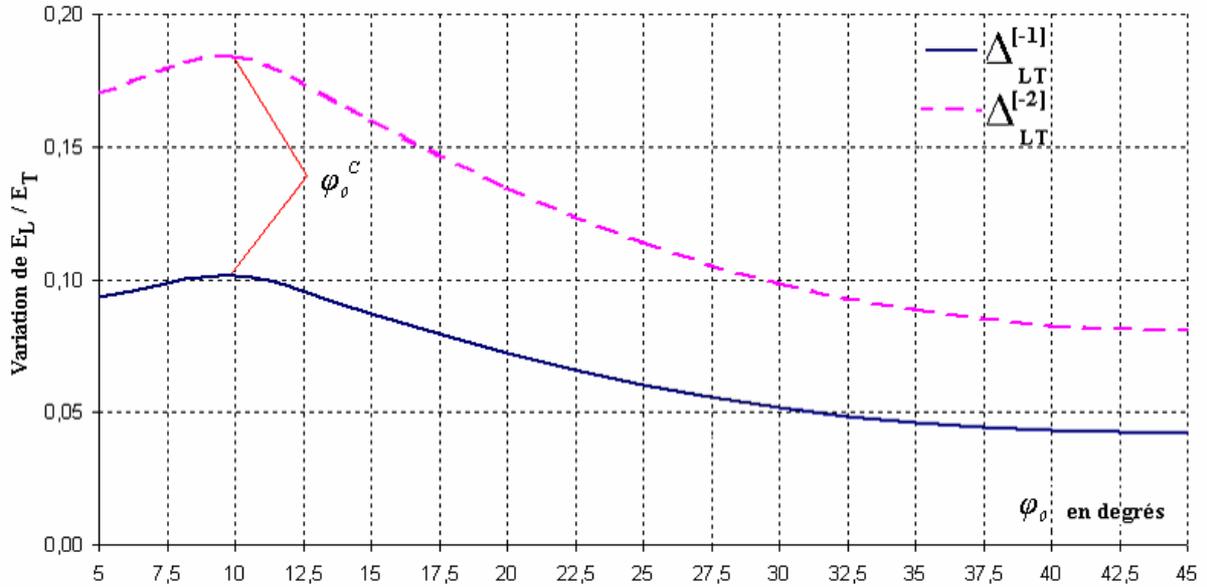


Figure 3.16 Incidence sur l'anisotropie tissulaire L/T d'une soustraction de 1° et 2° autour de quelques valeurs d'AMF φ_0

Au voisinage d'un angle (φ_0), le rapport d'anisotropie L/T de la double paroi s'écrit (développement limité de Taylor au premier ordre) :

$$(3.18) \quad \frac{E_{Lp}}{E_{Tp}} = \frac{D - E s^4(\varphi_0)}{D - E c^4(\varphi_0)} + (\varphi - \varphi_0) \left[\frac{4 E c(\varphi_0) s(\varphi_0) [E c^4(\varphi_0) s^2(\varphi_0) + E c^2(\varphi_0) s^4(\varphi_0) - D]}{(D - E c^4(\varphi_0))^2} \right] + \theta(\varphi^2)$$

La sensibilité de ce rapport à l'angle des microfibrilles (φ) dans S_2 , autour d'un angle (φ_0) est donc exprimée (3.19) par le second terme du deuxième membre de l'équation (3.18), noté $S(\varphi_0)$

$$(3.19) \quad S(\varphi_0) = \left[\frac{4 E c(\varphi_0) s(\varphi_0) [E c^4(\varphi_0) s^2(\varphi_0) + E c^2(\varphi_0) s^4(\varphi_0) - D]}{(D - E c^4(\varphi_0))^2} \right]$$

Le rapport d'anisotropie tissulaire mésoscopique L/T peut donc s'écrire sous la forme (3.20)

$$(3.20) \quad \frac{E_L}{E_T} = a_{LT} \left[\frac{D - E s^4(\varphi_0)}{D - E c^4(\varphi_0)} + (\varphi - \varphi_0) S(\varphi_0) \right]$$

Il est alors possible de définir la variation relative, $\Delta_{LT}^{[\varphi - \varphi_0]}$ du même rapport d'anisotropie tissulaire L/T pour des variations positives ou négatives $[\varphi - \varphi_0]$ autour de chaque valeur d'angle (φ_0) (Tableau 3. 7, où les divers angles sont exprimées en degrés)

$$(3.21) \quad \Delta_{LT}^{[\varphi-\varphi_0]} = \frac{(\varphi - \varphi_0) \cdot S(\varphi_0)}{(\varphi - \varphi_0) \cdot S(\varphi_0) + F(\varphi_0)}$$

Les valeurs numériques attribuées aux « coefficients de sensibilité » $S(\varphi_0)$ permettent de montrer (Tableau 3.8) l'existence d'une zone de sensibilité maximale de l'anisotropie L/T du tissu, située aux alentours de 10 degrés (angle correspondant à un bois final).

L'examen du Tableau 3.8 et des Figures 3.15 et 3.16, définit comme valeur critique (φ_0^c) du paramètre (φ), la valeur de 10 degrés, autour de laquelle les variations de l'anisotropie L/T sont les plus importantes. Ainsi une augmentation de 1 degré autour de 10 degrés conduit à une diminution de plus de 12% de l'anisotropie L/T, une augmentation de 2 degrés conduit à une chute de plus de 29% du rapport L/T.

On remarque également (Figures 3.15 et 3.16) que plus l'angle des microfibrilles dans S_2 (φ) est élevé, moins l'anisotropie tissulaire mésoscopique L/T en est dépendante. Dans notre modélisation, un bois caractérisé par une valeur élevée d'angle des microfibrilles (φ) dans S_2 (bois initial, bois juvénile, éventuellement bois de compression) verra donc son rapport d'anisotropie tissulaire L/T moins sensible à ce même paramètre qu'un bois possédant une plus faible inclinaison microfibrillaire (bois final) dans la même sous couche. L'angle (φ) des microfibrilles dans la sous couche S_2 constitue cependant une composante essentielle de l'anisotropie élastique tissulaire.

3.4.2 Incidence du module d'élasticité des microfibrilles

A l'échelle de la sous couche élémentaire, les différentes modélisations du comportement élastique bipariétal (Multicouches ou Squelette) considèrent, une association en série « matrice - fibres » dans la direction longitudinale de la cellule et une association parallèle dans les directions transverses. Compte tenu de la relation d'ordre entre les modules longitudinaux de microfibrille employés (supérieurs à la centaine de GPa) et les modules de matrice généralement admis (de l'ordre de 2 GPa), le module d'élasticité longitudinal des microfibrilles constitue, quelque soit la modélisation, un paramètre déterminant de l'élasticité (longitudinale ou transverse) de la double paroi.

Une étude de l'influence du module d'élasticité des microfibrilles sur les caractéristiques élastiques de la double paroi sera menée plus loin.

3.4.3 Influence du module élastique de la matrice

Divers auteurs (Salmèn *et al*, 1985, Bergander, 2001), ont montré que les propriétés mécaniques des hémicelluloses et lignines, influencent, de manière significative, les modules transverses de double paroi fournis par des modélisations multicouches à fibres parallèles anisotropes et très peu le module bipariétal longitudinal.

Pour hiérarchiser les paramètres ultrastructuraux responsables a priori de l'anisotropie des deux doubles cloisons envisagées (M2 et M3), une comparaison de l'influence du module d'élasticité de la matrice sur les modules de double cloison est menée. Ces deux modélisations font toutes les deux appel à la valeur optimisée du module de microfibrille (62 GPa, présentée au chapitre 2) et attribuent un comportement isotrope aux fibres.

L'étude est menée à partir d'un composite stratifié à 9 couches dont les caractéristiques micromécaniques ultrastructurales sont rappelées au Tableau 3.9.

Pour chaque modèle (M2 et M3), et pour différents modules de matrice, les variations des modules élastiques homogénéisés E_{Lp} et E_{Tp} avec l'AMF (φ) sont traduites dans le Tableau 3.10 et sur les Figures 3.17 et 3.18.

Sous couche	S_1	S_2	S_3	LM
E^m (GPa)	variable	variable	variable	variable
E^f	62	62	62	62
V	0,3	0,5	0,5	0,1
v^m	0,3	0,3	0,3	0,3
v^f	0,1	0,1	0,1	0,1
AMF φ (en °)	+/- 60°	variable	60	90

Tableau 3-9 Paramètres ultrastructuraux du modèle multicouche M2

AMF (φ) dans S_2 (en °)	$E^m = 1\text{GPa}$				$E^m = 2\text{GPa}$				$E^m = 3\text{GPa}$			
	Multicouche M2		Squelette M3		Multicouche M2		Squelette M3		Multicouche M2		Squelette M3	
	E_{Lp}	E_{Tp}	E_{Lp}	E_{Tp}	E_{Lp}	E_{Tp}	E_{Lp}	E_{Tp}	E_{Lp}	E_{Tp}	E_{Lp}	E_{Tp}
5	22,56	5,11	31,67	1,14	24,32	8,39	32,34	1,82	24,32	8,39	33,02	2,49
10	21,65	5,12	31,64	2,51	23,49	8,41	32,32	3,19	23,49	8,41	32,99	3,86
15	20,19	5,20	31,53	4,69	22,17	8,49	32,21	5,36	22,17	8,49	32,88	6,03
20	18,31	5,39	31,25	7,50	20,45	8,67	31,92	8,17	20,45	8,67	32,60	8,85
25	16,13	5,77	30,68	10,76	18,47	9,02	31,36	11,43	18,47	9,02	32,03	12,10
30	13,81	6,41	29,74	14,24	16,35	9,61	30,41	14,91	16,35	9,61	31,08	15,58
35	11,48	7,36	28,32	17,72	14,22	10,48	28,99	18,39	14,22	10,48	29,66	19,06
40	9,28	8,66	26,38	21,00	12,22	11,67	27,05	21,67	12,22	11,67	27,73	22,34
45	7,33	10,31	23,92	23,92	10,43	13,17	24,60	24,60	10,43	13,17	25,27	25,27
50	5,68	12,26	21,00	26,38	8,93	14,96	21,67	27,05	8,93	14,96	22,34	27,73

Tableau 3-10 : Comparaisons des variations des modules élastiques du multicouche M2 avec l'AMF(φ)

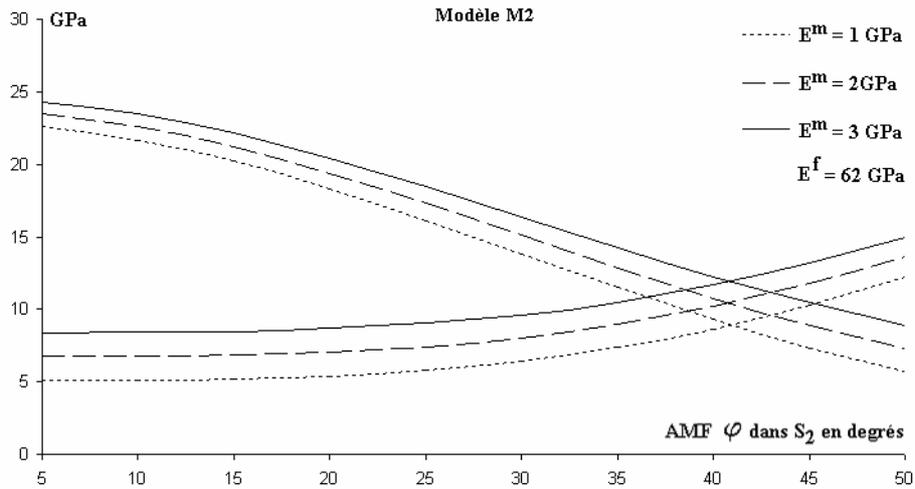


Figure 3.17 Evolutions des modules élastiques de double paroi prévus par le modèle M2 avec l'angle des microfibrilles (φ) et influence du module de la matrice ligno cellulosique

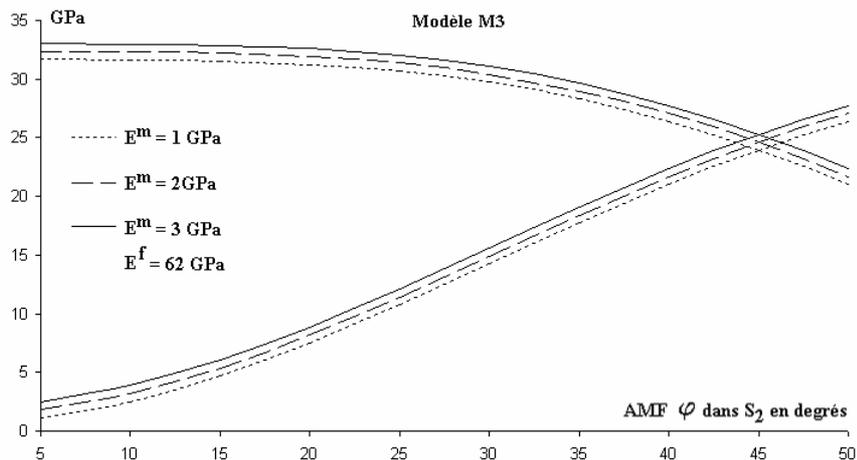


Figure 3.18 Evolutions des modules élastiques prédits par le modèle M3 avec l'angle des microfibrilles (φ). Influence du module élastique de la matrice ligno cellulosique.

L'examen du Tableau 3.10 et de la Figure 3.17 permet de noter l'importante sensibilité des E_{Lp} et E_{Tp} du modèle M2 au module élastique E^m de la matrice. Cette tendance est particulièrement marquée sur le module transverse E_{Tp} . Elle s'explique essentiellement par l'association en série de la matrice et des microfibrilles dans les directions transverses des différentes plaques composites (relation 2.3 du chapitre 2). L'association en parallèle des mêmes éléments conduit à une moindre sensibilité du module longitudinal E_{Lp} du modèle M2.

Le paramètre E^m est donc un paramètre sensible pour une modélisation multicouche de la double paroi.

Les modules homogénéisés E_{Lp} et E_{Tp} du Squelette M3 sont quant à eux, bien moins dépendants des valeurs de E^m employées (Tableau 3.9 et Figure 3.18). L'expression des E_{Lp} et E_{Tp} (fonction affine de E^m , à φ fixé, relations 2.27 et 2.28 du chapitre 2) constitue

l'explication de cette quasi insensibilité. Le modèle M3 accorde en effet un rôle majeur au renfort filamentaire et donc à un de ses paramètres descriptifs essentiel l'angle des microfibrilles dans S_2 (φ). Puisque les transferts d'efforts ne sont pris en charge, dans M3, que par le squelette de fibres cellulosique, il n'apparaît pas nécessaire de faire appel à un paramètre descriptif de l'état mécanique de la matrice.

3.4.4 Anisotropie tissulaire L/T d'un bois normal imputable à l'AMF dans S_2

La Figure 3.19 résume, pour 8 inclinaisons microfibrillaires (φ) et pour différentes densités, les valeurs du rapports de l'anisotropie L/T de la double paroi (E_{Lp} / E_{Tp} noté ici a_{LTP} pour alléger l'écriture) sur l'anisotropie élastique tissulaire L/T (facteur a_{LT}). A l'échelle de la double paroi le modèle considéré est M3 (Squelette).

Le produit de a_{LTP} par a_{LT} conduit à l'expression de l'anisotropie élastique tissulaire définie par la relation (3.2). La cellule initiale est supposée au départ carrée (son diamètre cellulaire initial est fixé à $30\mu\text{m}$, son épaisseur de paroi est $2\mu\text{m}$, soit $e/D = 0,06$) puis elle subit une ovalisation radiale durant laquelle seul le diamètre D_R varie. L'ovalisation radiale entraîne donc une modification de la densité du tissu. La Figure 3.20 rappelle l'évolution du facteur de flexion des parois avec la densité.

Pour des valeurs de (φ) usuelles, situés entre 5 et 10 degrés, et quelque soit la densité de la structure nid d'abeille, la part d'anisotropie L/T imputable au paramètre (φ) prédomine sur l'anisotropie tissulaire attribuable à la « géométrie du réseau » au sens large (a_{LT}).

L'anisotropie tissulaire L/T d'un bois que nous avons défini comme final sera donc due uniquement au paramètre (φ). Pour un bois de densité 0,75 (bois final) la part d'anisotropie due à la flexion des parois est en effet quasi nulle (Figure 3.20).

Pour un (φ) supérieur ou égal à 10 degrés, l'anisotropie élastique tissulaire liée à la morphologie et à l'arrangement cellulaire entre en « compétition » avec l'anisotropie attribuée au paramètre (φ). Cette tendance est d'autant plus marquée que la densité est faible ou que l'angle (φ) est élevé. Un bois initial, présentant à la fois une faible densité et un angle (φ) important aura donc une anisotropie L/T plus sensible à la flexion des parois qu'un bois final.

Plus généralement sur un bois RSV (densité 0,45), la Figure 3.19 montre que l'essentiel de l'anisotropie élastique L/T est imputable à l'angle des microfibrilles (φ).

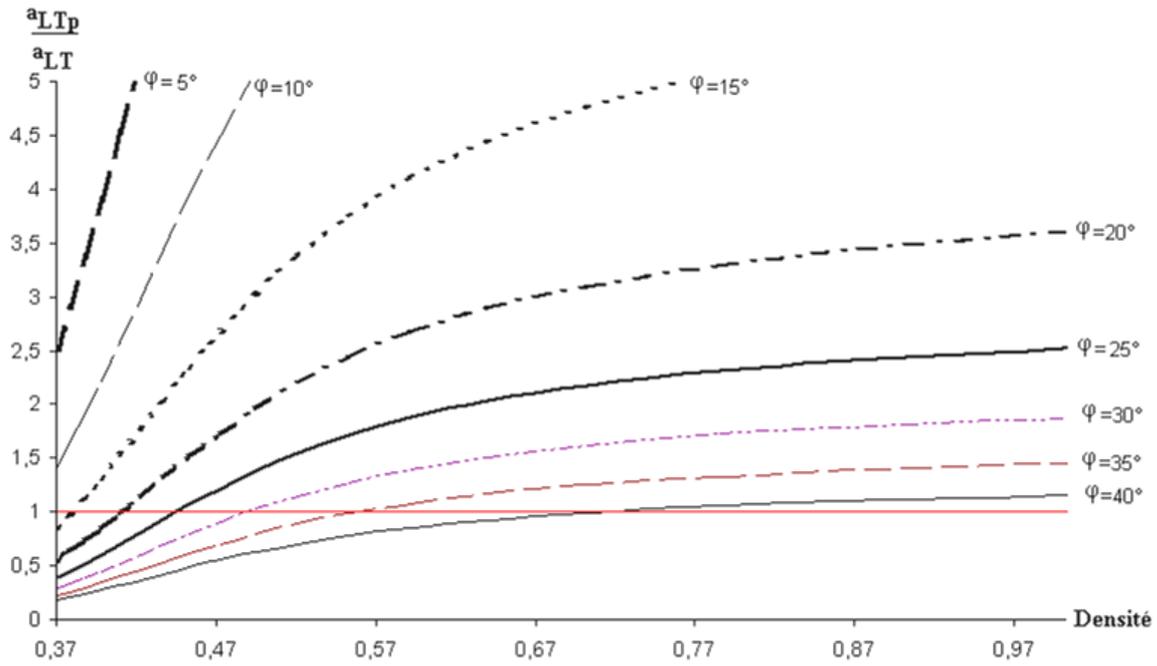


Figure 3.19 Comparaison de l'influence sur l'anisotropie élastique macroscopique de l'anisotropie « géométrique » et de l'anisotropie imputée à l'AMF dans S_2

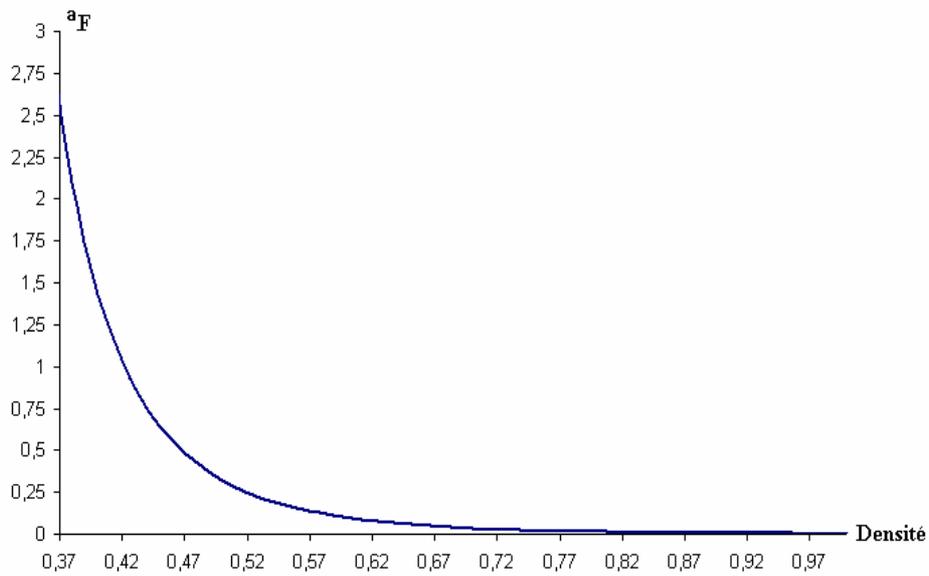


Figure 3.20 Evolutions avec la densité du terme de flexion des parois

3.4.5 Conclusion

Une étude de la sensibilité de l'anisotropie élastique tissulaire du bois normal a permis de montrer, avec le modèle adopté (modèle squelette M3), l'existence d'une zone de sensibilité maximale (autour de 10 degrés) de cette même anisotropie L/T à l'inclinaison des microfibrilles (φ) dans la sous couche S_2 .

La comparaison, pour différentes densités, de la part d'anisotropie tissulaire L/T imputable au paramètre (φ) montre :

- qu'un bois RSV devra l'essentiel de son anisotropie L/T l'angle (φ),
- qu'un bois assimilable, par sa masse volumique et son AMF (φ), à un bois final à une anisotropie L/T due uniquement à l'angle des microfibrilles (φ),
- que l'anisotropie tissulaire L/T d'un bois présentant un angle (φ) et une densité proche d'un bois initial est l'anisotropie la plus sensible à la flexion des parois.

L'AMF dans S_2 ne constitue donc certainement pas le seul paramètre à prendre en compte dans l'explication de l'anisotropie élastique du bois initial.

Cette dernière tendance va dans le sens de ce que suggèrent divers auteurs mécaniciens (Mark, 1972, Cave, 1975, Salmèn *et al*, 1985, Bergander *et al*, 2000a, 2000b) à l'échelle de la double paroi. Pour ces derniers, le paramètre (φ) n'est en effet pas à lui seul suffisant pour expliquer le comportement mécanique de la double paroi de bois initial. L'intervention du comportement mécanique de la sous couche S_1 est donc souvent évoquée.

Des observations microscopiques montrent par ailleurs, que le passage d'une cellule de bois final à une cellule de bois initial s'accompagne d'une augmentation assez singulière de l'épaisseur de la sous couche S_1 (triplement de l'épaisseur pour Schniewind, 1972, Panshin *et al*, 1980, Kollmann *et al*, 1984, Koponen *et al*, 1989, Keller, 1999).

3.5 Différences et complémentarités entre les modélisations Multicouches et Squelette

Il ne s'agit pas ici de tester (et d'affirmer) la pertinence d'une modélisation Multicouche (M1 et M2) du comportement élastique de la double paroi par rapport à celle du Squelette (M3) puisque les deux types de modélisation n'ont pas la même vocation (chapitre 1). L'objet de ce paragraphe est plutôt de préciser, en regard de quelques éléments bibliographiques, la situation des modules élastiques de double paroi évalués par les deux types de modélisations

3.5.1 Paramètres d'entrées des modélisations confrontées

Les valeurs numériques (Tableau 3.11) assignées aux paramètres micromécaniques retenus ont été considérées comme caractéristiques d'une paroi cellulaire de bois normal de résineux, elles sont issues dans leur grande majorité d'une large banque de données bibliographiques déjà présentée (Tableau 2.3 du chapitre 2, Guitard *et al*, 2002).

L'utilisation simultanée, au sein des deux types de modèles, de la valeur optimisée (62 GPa) du module élastique longitudinal des microfibrille, ainsi que l'attribution d'un comportement

élastique isotrope à ces mêmes fibres de renfort permettent une analyse comparative des différents modules pariétaux équivalents obtenus au travers de ces modélisations parentes.

Modèles M1 et M2	Sous couche S ₁	Sous couche S ₂	Sous couche S ₃	Lamelle Mitoyenne composée	Modèle M3	Références
E ^f (GPa)	62	62	62	62	62	Guitard <i>et al</i> (2002)
v ^f	0,1	0,1	0,1	0,1	-	Mark (1967)
V (%)	30	50	50	10	50	Bergander <i>et al</i> (2000)
E ^m (GPa)	2	2	2	2	2	Barrett, (1973), Bodig <i>et al</i> (1982)
v ^m	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	Gillis, (1972), Koponen <i>et al</i> (1991)
AMF φ (en degrés)	+/- 60	10	60	90	10	Keller (1999)
Epaisseur relative (%)	10	70	10	10	*	Keller (1999)

Tableau 3-11 Paramètres micromécaniques employées dans les multicouches M1, M2 et dans le modèle squelette M3

*les modules élastiques obtenues via M3, sont intrinsèques à la matière ligneuse de la sous couche S₂ et indépendants des caractéristiques géométriques cellulaires (épaisseurs)

Modèles	Bois initial			Bois final		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Nombres de sous couches	2	9	1 sous couche virtuelle	2	9	1
AMF φ (en degrés)	35	35	35	10	10	10
E _{LD} (en GPa)	16,7	14,2	29	30,6	23,5	32
E _{TD} (en GPa)	7	10,48	18	4	8,4	3,19
Degré d'anisotropie E _{LD} / E _{TD}	2,4	1,4	1,6	7,8	2,8	10

Tableau 3-12 Degrés d'anisotropie de la double paroi pour le bois initial et final, prédits par les modèles M1, M2 et M3 employant un module de microfibrilles de 62 GPa

Les expressions des modules élastiques de membrane (2.10 et 2.11) et de flexion torsion (2.12 et 2.13) des multicouches, comme les modules élastiques du modèle Squelette (2.27 et 2.28) ont été présentées dans le chapitre 2.

Pour évaluer les situations des modules élastiques de double paroi définis par les deux types de modélisations aux résultats de la littérature, il convient de disposer de valeurs dites « cibles ».

3.6 Valeurs de modules élastiques de double paroi présentés dans la littérature

A cette échelle, les investigations sur le comportement mécanique de la paroi sont délicates. La littérature fait donc état de nombreuses valeurs de modules élastiques de double paroi, obtenues par méthode inverse et donc fortement conditionnées par le modèle envisagé.

Les valeurs maximales de E_{Lp} , obtenues via l'expérimentation (fibres isolées) sont bien souvent inférieures à celle déterminées par méthode inverse (i.e. ; passage macro-micro longitudinal intégrant la restriction de cisaillement).

Dans le premier cas elles sont proches de 30 GPa, (24 GPa sur le bois initial de Sugi, Bodig *et al*, 1982 ; 30 GPa pour Norimoto *et al*, 1986 ; 25 GPa sur le bois initial de Picea rubens, Wimmer *et al*, 1997) alors que dans le deuxième, elles se rapprochent de 50 GPa (Cave, 1968, Khale *et al*, 1994 sur Picea abies).

Sur des fibres aplaties de Picea mariana, Salmèn *et al* (1985) obtiennent un module longitudinal de double paroi de l'ordre de 70 GPa. Cette valeur leur semble représentative de la rigidité d'une double cloison dont les mouvements de torsion sont bloqués (restriction de cisaillement).

L'écart entre les évaluations de E_{Tp} par méthode inverse et les quelques mesures expérimentales est tout aussi important.

Obtenus par méthode inverse, les modules élastiques transverses de double paroi E_{Tp} sont généralement de l'ordre de la dizaine de GPa (10 GPa pour Cave, 1968, 9 GPa pour Khale *et al*, 1994, 15 GPa sur le bois initial de Picea abies, Farruggia 1998).

Une récente expérimentation sur Picea abies (microscopie électronique utilisée pour déterminer le déplacement sous charge), attribue à la double paroi isolée un E_{Tp} transverse de 1,5 à 3 GPa (Bergander *et al*, 2000).

3.6.1 Choix des valeurs cibles

L'examen de la littérature conduit, pour la discussion qui va suivre, à l'adoption de deux valeurs cibles médianes E_{Lp}^C et E_{Tp}^C . Ces deux valeurs seront utilisées pour évaluer la « position » des modules élastiques prédits par les modèles M1, M2 et M3 (chapitre 2), en fonction de l'AMF (φ) et du module de fibres E^f . Cette comparaison sera envisagée pour une inclinaison des fibres allant de 5 à 40 degrés (valeur minimale dans Keller 1999, 7 degrés).

$$E_{Lp}^C = 30\text{GPa}$$

$$E_{Tp}^C = 10\text{GPa}$$

3.7 Propriétés élastiques prévues par les différentes modélisations

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Modèles	M1	M1	M2	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M3
E^f (GPa)	62	120	62	90	62	62	120	120	120	62
φ (en °)	10	10	10	10	5	5	5	5	35	10
E_{Lp} (GPa)	30,6	57,9	22,6	31,9	31,8	23,4	60,4	43,7	29,8	32
E_{Tp} (GPa)	3,9	4	6,8	8,4	3,9	6,8	3,9	10	10,2	2

Tableau 3-13 Modules élastiques de double paroi prévus par les trois types de modélisations

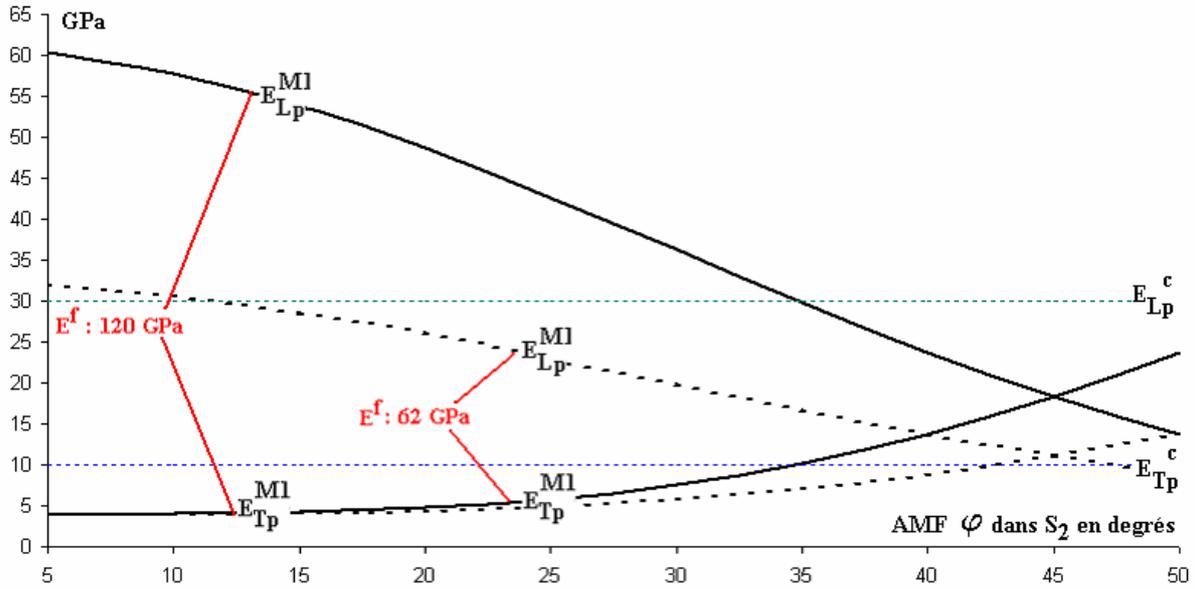


Figure 3.21 Evolutions des modules élastiques de double paroi en fonction de (φ) pour le modèle M1. Influence du module de microfibrilles

3.7.1 Le bicouche M1

Pour une valeur de E^f de 62 GPa et un AMF (φ) de 10 degrés (valeur en référence à un bois de résineux dit normal) le modèle M1 fournit des estimations des rigidités bipariétales longitudinales et transverses (Figure 3.21 et Tableau 3.13, colonne A) :

$$E_{Lp}^{MI}(10^\circ) = 30,5 \text{ GPa}$$

$$E_{Tp}^{MI}(10^\circ) = 3,9 \text{ GPa}$$

Si pour un tel AMF (φ), le module d'élasticité pariétale longitudinal $E_{Lp}^{MI}(10^\circ)$ correspond bien à la valeur cible E_{Lp}^c , le module pariétal transverse $E_{Tp}^{MI}(10^\circ)$ demeure bien inférieur à la valeur cible E_{Tp}^c qui n'est atteinte que des AMF (φ) supérieurs à 45 degrés (Figure 3.21). Ce faisant, la valeur $E_{Lp}^{MI}(45^\circ)$ correspondante reste néanmoins trop faible puisque proche de la dizaine de GPa (Figure 3.21).

Pour une valeur double de E^f (i.e. :120 GPa) et pour un AMF(φ) de 10 degrés, $E_{Lp}^{MI}(10^\circ)$ est sensiblement le double de E_{Lp}^c tandis que $E_{Tp}^{MI}(10^\circ)$ est plus de deux fois inférieure à la valeur cible E_{Tp}^c (Tableau 3.13, colonne B):

$$E_{Lp}^{MI}(10^\circ) = 57,8 \text{ GPa}$$

$$E_{Tp}^{MI}(10^\circ) = 4 \text{ GPa}$$

Avec ce même module, les valeurs cibles E_{Lp}^c et E_{Tp}^c sont simultanément atteintes pour un AMF (φ) de 35 degrés (Figure 3.21).

$$E_{Lp}^{M1}(35^\circ) = 29,8 \text{ GPa}$$

$$E_{Tp}^{M1}(35^\circ) = 10,2 \text{ GPa}$$

Pour rendre compte simultanément des valeurs cibles choisies, le modèle M1 doit donc faire appel à un module E^f de 120 GPa et un AMF (φ) supérieur à 35 degrés (angle pouvant correspondre à un bois initial, en admettant que la sous couche S_2 assure encore l'essentiel du comportement mécanique dans ce type de bois, colonne I du Tableau 3.13).

Pour assurer une rigidité pariétale transverse supérieure, de nombreux auteurs sont donc amenés à considérer pour ce type de modélisation multicouches, l'intervention des autres sous couches dans le comportement élastique de la paroi cellulaire (Mark, 1972, Barrett 1973, Cave, 1975, Yamamoto 1998,1999, Yamamoto *et al*, 2001).

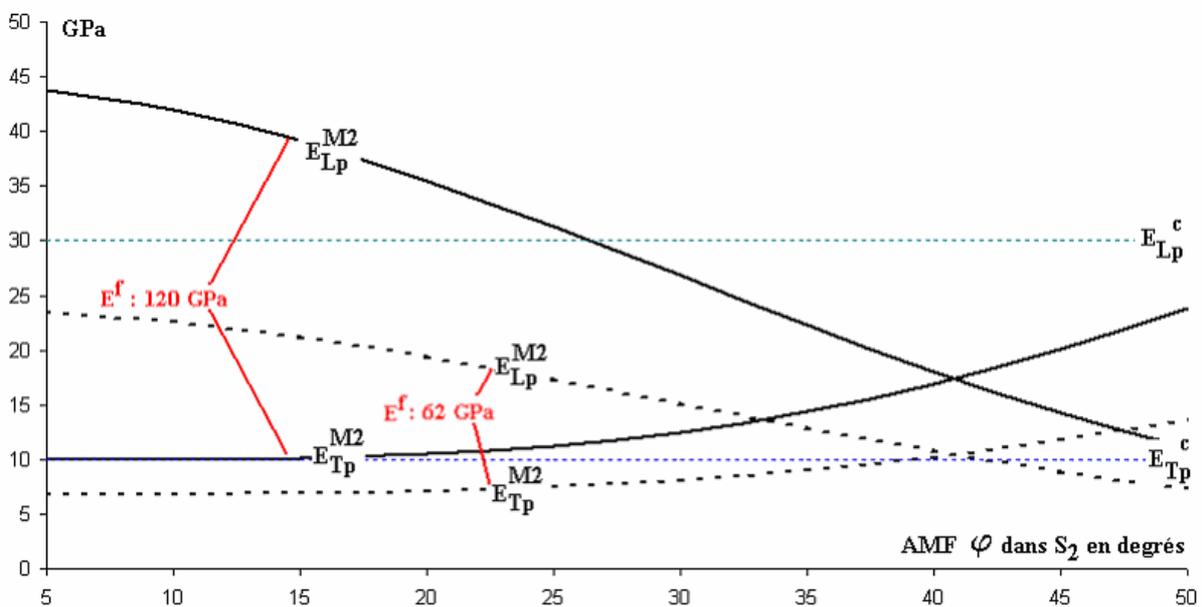


Figure 3.22 Evolutions des modules élastiques de double paroi en fonction de (φ) pour le modèle M2. Influence du module de microfibrilles

3.7.2 Le multicouche M2

Avec un module de microfibrille E^f de 62 GPa et pour un AMF de 10 degrés, le modèle M2 prévoit (Figure 3.22, colonne C du Tableau 3.13)

$$E_{Lp}^{M2}(10^\circ) = 22,6 \text{ GPa}$$

$$E_{Tp}^{M2}(10^\circ) = 6,8 \text{ GPa}$$

E_{Lp}^c n'est jamais atteinte tandis que E_{Tp}^c n'est obtenue que pour des angles (φ) supérieurs à 40 degrés (Figure 3.22).

Atteindre, dans la gamme d'AMF (φ) choisie, avec M2 la valeur cible E_{Lp}^c nécessite donc l'emploi d'un module d'élasticité des microfibrilles supérieur à la valeur de $E^f = 62$ GPa.

Ainsi (Figure 3.22) un module d'élasticité de microfibrille sensiblement double (120 GPa), permet d'atteindre, dès 5 degrés E_{Tp}^C , mais confère une valeur trop importante à E_{Lp}^{M2} (27 degrés devient l'angle minimal à partir duquel il est possible d'atteindre E_{Lp}^C) en regard de notre valeur cible. Une solution intermédiaire, réside alors dans l'adoption d'un E^f situé aux alentours de 90 GPa (colonne D du Tableau 3.13).

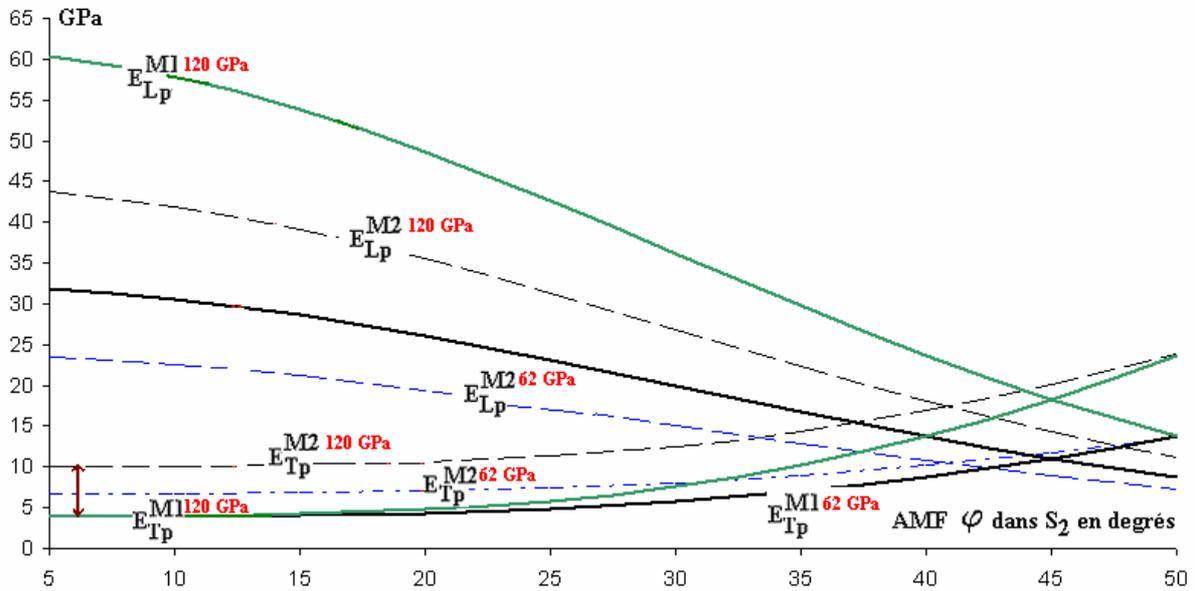


Figure 3.23 Comparaison des modules élastiques bipariétaux obtenus via les modélisations M1 et M2

L'examen de la Figure 3.23, permettant la comparaison des différents modules de double paroi prévus par M1 et M2 amène une remarque supplémentaire.

Pour une inclinaison des microfibrilles (φ) de 5 degrés et $E^f = 62$ GPa,

$$E_{Tp}^{M1}(5^\circ) = 4 \text{ GPa et } E_{Tp}^{M2}(5^\circ) = 7 \text{ GPa}$$

Tandis qu'avec un E^f fixé à 120 GPa,

$$E_{Tp}^{M1}(5^\circ) = 4 \text{ GPa et } E_{Tp}^{M2}(5^\circ) = 10 \text{ GPa.}$$

Ajouter des sous couches, au sein d'un modèle multicouches à fibres parallèles (M2) permet donc d'assurer un renfort transverse supérieur à celui permis par le modèle bicouche M1 (colonnes E et F, Tableau 3.13, marque sur la Figure 3.23).

3.7.3 Modules élastiques de double paroi virtuelle obtenus via le modèle M3

Pour un E^f de 62 GPa, et pour 10 degrés (Figure 3.23, colonne J du Tableau 3.12);

$$E_{Lp}^{M3}(10^\circ) = 32 \text{ GPa}$$

$$E_{Tp}^{M3}(10^\circ) = 2 \text{ GPa}$$

La valeur cible E_{Tp}^C ne peut être atteinte qu'à partir d'un angle de 24 degrés (Figure 3.23).

$$E_{Tp}^{M3}(24^\circ) = E_{Tp}^C$$

L'emploi d'un module de microfibrille E^f double (120 GPa) ne permet d'atteindre E_{Tp}^C qu'à partir d'un AMF (φ) de 17 degrés.

L'examen de la Figure 3.23 permet de noter d'une part la faible sensibilité de E_{Lp}^{M3} à l'AMF (φ) par rapport à son homologue E_{Lp}^{M1} , mais aussi le caractère rigidifiant, dans la direction longitudinale de la modélisation M3 par rapport à la modélisation M1. Ainsi, si pour 5 degrés les $E_{Lp}^{M1}(5^\circ)$ et $E_{Lp}^{M3}(5^\circ)$, sont sensiblement égaux à 32 GPa, un angle (φ) de 20 degrés fait chuter $E_{Lp}^{M1}(20^\circ)$ à 26 GPa tandis que $E_{Lp}^{M3}(20^\circ)$ demeure très proche de 32 GPa.

Certains modules expérimentaux E_{Tp} , singulièrement inférieurs à la dizaine de GPa (1,5- 3 GPa bois initial de *Picea abies*, Bergander *et al*, 2000b), demeurent accessibles par les modélisation de type squelette (M3) ou bicouche (M1), mais pas par une approche multicouche (M2) (Figure 3.23) attribuant à la double paroi isolée une rigidité transverse minimale (pour un $\varphi = 5^\circ$) proche de la dizaine de GPa (colonne H du Tableau 3.13).

L'obtention de modules élastiques pariétaux longitudinaux de résineux, aussi bien théoriques (Cave, 1968, Khale *et al*, 1994, Farruggia, 1998, Bergander *et al*, 2000b), qu'expérimentaux (Suzuki, 1969 dans Bodig *et al*, 1982, Bergander *et al*, 2000a) par une approche multicouche, nécessite alors l'emploi d'un module longitudinal des microfibrille de cellulose E^f supérieur (120 GPa) à celui rendu nécessaire dans une modélisation de type squelette (62 GPa). Pour rendre compte de la restriction de cisaillement, les modèles multicouches doivent faire appel à une rigidité microfibrillaire importante et proche de celle de la cellulose I purement cristalline.

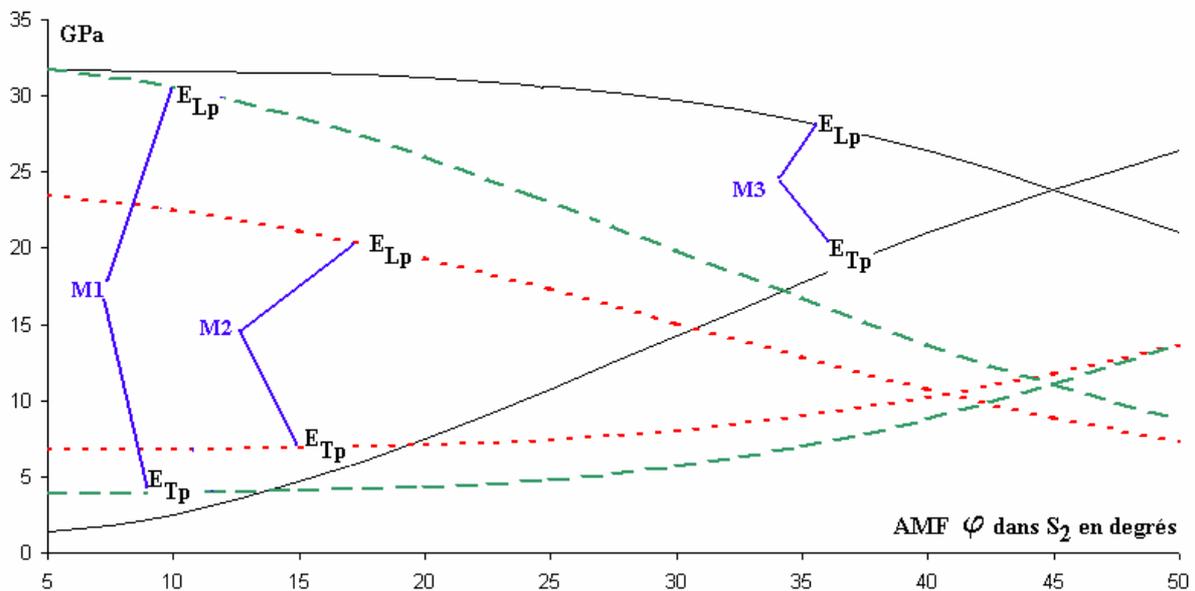


Figure 3.24 : Evolutions comparées des modules de double paroi prédits par les 3 modèles M1, M2 et M3 en fonction de l'AMF dans la sous couche S_2

3.7.4 Degrés d'anisotropie pariétale

Le Tableau 3.12 fournit les valeurs E_{Lp} et E_{Tp} obtenues par les modèles M1, M2 et M3 et ce pour des cellules dites de bois final et bois initial (définis respectivement par un AMF (φ) de 10 degrés, et un AMF (φ) de 35 degrés). L'anisotropie de la paroi cellulaire est alors caractérisée par le rapport E_{Lp} / E_{Tp} appelé « degré d'anisotropie de la paroi cellulaire ».

Dans le cas du bois final, le degré d'anisotropie donné par le modèle squelette M3 est particulièrement élevé, avec une valeur de $E_{Lp} / E_{Tp} = 10$, près de 1,5 fois supérieure à la valeur prédite par M1 ($E_{Lp} / E_{Tp} = 7,8$) et plus de 3 fois plus importante que le résultat obtenu via le modèle M2 ($E_{Lp} / E_{Tp} = 2,8$).

L'explication de la différence entre les deux modèles multicouches à fibres disjointes M1 et M2 résulte de l'augmentation de la quantité de sous couche S_1 présentant un large angle ($\varphi = 60^\circ$), ce faisant E_{Lp} décroît de 30 à 23 GPa, tandis que E_{Tp} augmente de 4 à 7 GPa.

Pour le bois initial, et en comparaison au bois final (passage d'un AMF de 10° à 35°), l'anisotropie pariétale diminue drastiquement, en particulier pour le modèle M3 (division par 7 du degré d'anisotropie). Cette diminution du degré d'anisotropie résulte plus d'une forte augmentation de E_{Tp} (de 2 à 18 GPa) que d'une diminution, somme toute peu importante de E_{Lp} (de 32 à 29 GPa).

Le coefficient d'anisotropie devient naturellement égal à 1 pour une inclinaison de 45 degrés, dans le cadre des modèles M1 et M3. On remarque que pour le modèle M2 cette valeur est obtenue pour un angle (φ) légèrement inférieur (41°) en raison de la présence d'une plus grande proportion de sous couche S_1 à fibres particulièrement inclinées.

On rappelle enfin que quelque soit le modèle envisagé, les modules élastiques longitudinaux d'une double paroi de bois initial sont toujours inférieurs à ceux d'une double paroi de bois final. Les modules transverses de double paroi d'un bois initial sont eux supérieurs à ceux d'un bois final. Ces résultats sont conformes à diverses observations (Wimmer *et al*, 1997, Farruggia, 1998) expliquées respectivement par une teneur en cellulose plus important dans la paroi de bois final (Panshin *et al*, 1980) et un AMF (φ) plus important dans le bois initial.

3.8 Comportement en flexion torsion du stratifié pariétal

La détermination des rigidités de flexion torsion d'un stratifié, par l'application de la théorie des plaques minces, n'est valable que sous l'hypothèse d'une épaisseur totale faible en regard du rayon de courbure que présente le multicouche sollicité.

Appliquée à la paroi de la cellule ligneuse, cette théorie prédictive doit donc être manipulée avec précaution dans le cadre de cellule à parois épaisses (bois à forte densité ou bois final) ou de section particulièrement circulaire (bois de compression par exemple).

Utilisant la théorie des plaques minces, nous nous sommes intéressés dans la première partie de ce chapitre au comportement de membrane du stratifié, conduisant à l'évaluation de modules élastiques équivalents de double paroi indépendants du rayon de courbure.

L'objet de ce paragraphe est de comparer l'influence, sur les modules équivalents de flexion torsion du stratifié M2, définis en (2.12) et (2.13), de quelques modifications microstructurales majeures, pouvant être assimilées au passage d'une double paroi de bois final à une double paroi de bois initial (augmentation de l'épaisseur de S_1 dans la cellule de bois initial, angle (φ) des microfibrilles notablement plus élevé dans le bois initial que dans le bois final).

3.8.1 Influence d'une modification de l'épaisseur de S_1

Pour évaluer, l'influence d'une augmentation de la proportion de S_1 dans la paroi sur le comportement en flexion torsion de la double paroi, les épaisseurs de la sous couche S_3 et de la lamelle moyenne composée sont fixées à 10%, conformément au Tableau 3.11. L'évaluation porte ainsi sur les modules équivalents en flexion torsion (notés E_{11} et E_{22}), d'un multicouche de type M2 à fibres isotropes, dans lequel l'épaisseur totale est constante. Les évolutions des E_{11} et E_{22} en fonction de la proportion de sous couche S_1 sont reportées dans le Tableau 3.14. On rappelle que la direction 1 correspondant à l'axe normal au multicouche tandis que la direction 2 est une direction transverse (dans le plan de la plaque).

Proportion de sous couche S_1 dans la double cloison (%)	E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)
10	23,61	8,31
20	23,10	8,47
30	22,11	8,78
40	20,48	9,30
50	18,04	10,07

Tableau 3-14 : Valeurs numériques attribuées aux modules équivalents de flexion torsion de M2 en fonction de la proportion de sous couche S_1

L'examen du Tableau 3.14 amène quelques commentaires.

Les sens de variation des rigidités E_{11} et E_{22} avec la proportion relative de sous couche S_1 sont opposés. Le passage de 10% à 50% de S_1 se traduit respectivement pour E_{11} par une diminution de 33% (de 23,61 à 18,04 GPa) et pour E_{22} par une augmentation de 21% (de 8,31 à 10,07 GPa). Augmenter le pourcentage de sous couche S_1 tend donc renforcer la double paroi dans les directions transverses et à l'affaiblir dans la direction longitudinale. Le poids relatif de sous couche S_1 dans la double paroi semble donc à priori un paramètre important du comportement mécanique en flexion torsion de la cellule. Il convient alors de comparer l'influence de ce paramètre « épaisseur de S_1 » à celle du paramètre (φ) rendu responsable jusqu'alors de l'essentiel du comportement mécanique de la double paroi.

3.8.2 Influence de l'angle des microfibrilles

Pour rendre compte de la variabilité intra arbre de l'angle (φ), l'intervalle de variations choisi est $[10^\circ, 40^\circ]$.

AMF φ dans S_2 en degrés	E_{11}	E_{22}
10	23,6	8,3
20	20,3	8,6
30	15,9	9,6
40	11,5	11,8

Tableau 3-15 Valeurs numériques des modules équivalents en flexion torsion en fonction de l'AMF dans S_2

La simulation d'une transition d'un bois final à un bois initial par le passage d'un angle de 10 à 40° dans la sous couche S_2 se traduit par une diminution drastique de plus de 100% de E_{11} (de 23,6 GPa à 11,5 GPa) et une augmentation de 42 % de E_{22} (de 8,3 GPa à 11,8 GPa) (Tableau 3.15).

Le comportement en flexion torsion de la double cloison modélisée par un multicouche à fibres parallèles est plus sensible à une modification de l'angle des microfibrilles dans la sous couche S_2 qu'à une augmentation de l'épaisseur relative de la sous couche S_1 .

Il a été montré dans les paragraphes précédents qu'une modélisation de type Squelette attribuant un rôle majeur à l'angle des microfibrille de la sous couches S_2 était apte à la prédiction des modules d'élasticité de double paroi. Les derniers résultats présentés ici confirment, par les évaluations du comportement de membrane et de flexion torsion, que l'essentiel du comportement mécanique de la paroi cellulaire peut être imputé à la sous couche S_2 et à son paramètre descriptif essentiel ; l'angle des microfibrilles (φ).

3.9 Conclusion

L'anisotropie élastique des résineux est souvent attribuée à l'influence d'une ou de plusieurs séries de paramètres structuraux. Par une hiérarchisation de leur influence, il a été montré dans ce chapitre, sur un bois RSV, qu'elle est au premier chef la conséquence de l'angle d'orientation des microfibrilles de cellulose dans la sous couche S_2 . Les différentes variations du rapport de forme cellulaire e/D ne sont, en effet, pas en elles mêmes suffisantes pour expliquer les valeurs d'anisotropie L/T observées dans le bois normal.

Le chapitre 2 a en outre souligné l'importance du passage de l'échelle de la sous couche à l'échelle de la double paroi en ce qui concerne le nombre de paramètres rendus nécessaires à une description de l'anisotropie élastique macroscopique.

A ce même niveau de description, au moins deux options de modélisation, fortement complémentaires peuvent être envisagées.

Les modèles Multicouches prenant en compte le caractère stratifié de la paroi reflètent assez fidèlement la structure pariétale des résineux. Ils doivent employer, pour rendre compte de la restriction de cisaillement, des modules d'élasticité de microfibrille élevés (proches de celui de la cellulose I) bien souvent obtenus par méthode inverse.

Le modèle Squelette assimile le renfort filamentaire cellulosique à un réseau de microfibrilles entrecroisées parfaitement interconnectées. Cette première étape de modélisation se démarque des précédentes par la prise en compte d'une unique sous couche, assimilable à la sous couche S_2 .

Autorisant, pour rendre compte de la restriction de cisaillement, l'emploi d'un module d'élasticité des microfibrilles bien inférieur à celui nécessaire aux Multicouches, le Squelette de microfibrilles présente l'avantage majeur de ne faire appel qu'à un nombre très restreint de paramètres descriptifs.

4 Vers une description de l'anisotropie élastique du bois de réaction

Dans les chapitres précédents, la possibilité d'une prédiction de l'anisotropie élastique du bois normal à partir d'un nombre, somme toute assez limité de paramètres a été montrée. Un des champs d'application de la démarche envisagée dans ce travail consiste en sa mise en œuvre sur le bois de réaction des résineux appelé bois de compression. L'objectif premier de ce chapitre est d'évaluer expérimentalement certaines propriétés mécano physiques du bois de compression. Les caractéristiques élastiques obtenues via l'expérimentation seront ensuite confrontées à celle prévues par la modélisation adoptée.

4.1 Existence de plusieurs bois de compression

Il est possible, en s'appuyant, sur un ensemble de caractères anatomiques de distinguer plusieurs classes de bois de compression (Singh *et al*, 1999, Fioravanti et al, 2003).

- Le premier type de bois de compression est désigné par les auteurs précédents comme « sévèrement » comprimé ; il est notamment caractérisé par des épaisseurs de parois importantes, la quasi absence de sous couche S_3 et des teneurs élevées en lignine dans les sous couches S_2 et S_1 . Des coupes anatomiques transversales montrent de nombreux espaces inter cellulaires entre les trachéides. La majorité des études cytologiques rencontrées dans la littérature se réfère au bois sévèrement comprimé.
- La seconde catégorie, de bois de compression, beaucoup moins étudiée, est appelée par les mêmes auteurs, bois de compression « moyennement » comprimé. Les espaces intercellulaires (Singh *et al*, 1999) n'y sont pas systématiques. Pour ces derniers auteurs, ce type de bois de compression est un bois dont les caractéristiques ultrastructurales sont intermédiaires entre celles d'un bois de compression sévèrement comprimé et un bois normal.
- Le troisième type, qualifié de bois de compression peu comprimé, se distingue des précédents par l'absence quasi-totale d'espaces intercellulaires et de sous couche S_3 . Ses caractéristiques structurales et ultrastructurales ne sont que rarement explicitées.

Certains auteurs relient directement l'inclinaison des microfibrilles dans la sous couche S_2 au « degré » de compression du bois ; plus le bois est comprimé, plus l'angle des microfibrilles (φ) est important (Singh *et al*, 1999).

4.1.1 Description sommaire des caractères anatomiques généraux du bois de compression

Compte tenu du peu d'information disponible sur les caractéristiques anatomiques des bois de compression dits « moyennement et sévèrement » comprimés, les tendances générales évoquées par la suite devront être considérées comme celles définissant un bois de compression « fortement » comprimé au sens de Singh et al (1999) et Fioravanti et al (2003).

4.1.1.1 Des teneurs en macromolécules différentes de celles du bois normal

Comparativement à la paroi de bois normal, la teneur en cellulose de la paroi du bois de compression est fortement diminuée (taux de cellulose de la paroi entre 20 et 30%). La teneur en lignines est quant à elle généralement supérieure (aux alentours de 40% d'après Kolmann

et al, 1984, Keller, 1999). En associant microscopie électronique et auto fluorescence de la lignine, sur du bois de compression de *Pinus radiata*, une variabilité significative de lignification dans la lamelle mitoyenne et la sous couche S_2 (Singh *et al*, 1999) a été montrée.

4.1.1.2 Une paroi cellulaire spécifique

Les sous couches pariétales sont réduites à S_1 et S_2 , la sous couche S_3 est généralement très mince (Singh *et al*, 1999 sur *Pinus radiata*) voire inexistante (Timell, 1986).

La distinction tissulaire entre le bois initial et le bois final du bois de compression est généralement délicate en terme d'inclinaison des microfibrilles dans la sous couche S_2 . Un AMF (φ) maximum de l'ordre de 45 degrés, commun au bois initial et final, est généralement admis (Panschin *et al*, 1980, Cloutier, communication personnelle, Bodig *et al*, 1984, Keller, 1994, Sahlberg *et al*, 1997).

4.1.1.3 Modifications des paramètres géométriques cellulaires

Timell (1986) a établi des tendances générales en compilant un grand nombre de données anatomiques issues de la littérature :

Les diamètres cellulaires :

- dans le bois initial de compression, les diamètres radial et tangentiel ne sont pas significativement différents de ceux observés sur le bois initial normal.
- dans le bois final de compression, le diamètre radial est égal ou faiblement inférieur à celui du bois final normal. Le diamètre tangentiel est inférieur à celui de bois final normal.

Les épaisseurs de paroi :

Les trachéides de bois initial de compression présentent des épaisseurs de parois identiques à celles de bois initial de bois normal (Kramer *et al*, 1979, Panshin *et al*, 1980, synthèse des résultats présentés dans Timell, 1986, Ruelle, 2003), mais sont de 10 à 40% plus courtes (Keller, 1999). Dans la cellule de bois final de compression il est vraisemblable d'admettre une épaisseur de paroi cellulaire double de celle constatée sur une cellule de bois final normal (Keller, 1999). Les épaisseurs pariétales ne sont en revanche pas distinguées selon la direction radiale ou transverse de l'observation.

Les différences de géométrie cellulaire entre le bois de compression et le bois normal se situent essentiellement au niveau des trachéides de bois final ; celles-ci ont une forme plutôt arrondie dans le bois de compression alors qu'elles présentent une géométrie nettement plus rectangulaire dans le bois normal.

Dans le plan transverse, des espaces intercellulaires apparaissent. Ils sont particulièrement marqué dans le bois final de compression (Panshin *et al*, 1980, Keller, 1999).

Certains auteurs rapportent une masse volumique du bois final de compression deux fois plus élevée que celle de bois final « normal » (Keller, 1999, Necesany *et al*, 1967, rapportés dans Timell, 1986). Timell (1986) attribue cette forte valeur à une épaisseur de paroi dans le bois final de compression double de celle du bois final normal

L'anatomie des rayons ligneux du bois de compression ne se démarque généralement pas de celle observée sur le même type de cellule du bois normal (Kramer *et al*, 1979, Keller, 1994). Certains pins présentent néanmoins des rayons plus gros et en plus grand nombre dans le bois de compression (Venet *et al*, 1986, Keller, 1994).

4.1.1.4 A l'échelle du cerne ; une organisation assez semblable à celle du bois normal

La texture (T_X) du bois de compression est, pour certains auteurs, supérieure à celle du bois normal (Cloutier communication personnelle, Panshin *et al*, 1980, Ruelle, 2003). Si le bois normal présente un bois final distinct et marqué, dans le bois de compression, il est généralement difficile d'identifier une transition nette entre les deux tissus bois initial et final (Keller, 1994 cite l'exemple de *Pinus strobus*).

La fraction volumique en rayons ligneux (n) dans le bois de compression est pour certains auteurs légèrement supérieure (Timell, 1986) à celle du bois normal. D'autres travaux rapportent une tendance inverse (Onaka, 1949 dans Ruelle, 2003).

4.1.1.5 Propriétés mécano physiques du bois de compression

Contrairement au bois normal dont les caractéristiques mécano physiques ont été largement étudiées et modélisées, les propriétés du bois de réaction des résineux restent assez mal identifiées. Seules des tendances générales directement liées à l'anatomie (épaisseurs de paroi importante, angle des microfibrilles particulièrement ouvert) peuvent être évoquées.

a) La masse volumique

La masse volumique du bois de compression est généralement plus importante que celle du bois normal (de 10 à 20% supérieure à celle du bois normal pour Panshin *et al*, 1980, Cloutier, non publié).

b) Des modules élastiques cibles ?

Très peu de références sont disponibles dans la bibliographie. Le bois de compression est considéré un bois de qualité mécanique assez médiocre. Il constitue d'ailleurs du point de vue industriel un défaut.

Son module d'élasticité longitudinal est inférieur à celui du bois normal, les modules transverses sont peu ou pas identifiés.

4.2 Etude expérimentale

4.2.1 Mise en œuvre de l'étude

4.2.1.1 Matériel végétal et préparation des échantillons

3 Résineux ont été prélevés dans la région de Bordeaux. Il s'agit de 3 arbres jeunes (21 ans pour l'Epicéa, 18 ans pour le Pin sylvestre, 13 ans pour le Pin maritime) très fortement inclinés par une tempête (1999) et ayant basculé droit par déficience du système racinaire. Sur les trois essences, la partie haute du tronc avait retrouvé sa verticalité.

Le pin sylvestre présentait deux axes (axe réitéré) n'appartenant pas au même plan.

4.2.1.2 Mesures in situ

Mesures des Indicateurs de Contrainte de Croissance (A. et B. Thibaut)

Après écorçage jusqu'au cambium, une couronne de 8 points de mesures (espacés chacun de 45 degrés) d'indicateurs de contrainte de croissance (ICC) a été réalisée à une hauteur de 1,30m sur chaque essence. La méthode de mesure des ICC, dite du trou unique, consiste en la mesure des déplacements par un capteur électronique autour d'un trou foré à la surface écorcée. Les déplacements mesurés résultent d'une modification du champ de contraintes induite par le perçage (Bailleres, 1994).

Un disque a été tronçonné au niveau des mesures des ICC et les distances de chacun des points de mesure d'ICC relevées. Simultanément des billons ont été découpés juste en dessous de ces disques afin d'en extraire des jeux d'éprouvettes utiles à des essais mécaniques ou des mesures de retrait.



Figure 4.1 Billon d'Epicéa E3

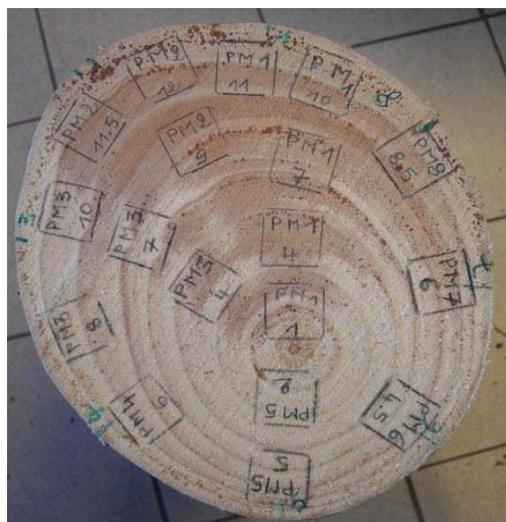


Figure 4.2 Billon de Pin maritime (PM)

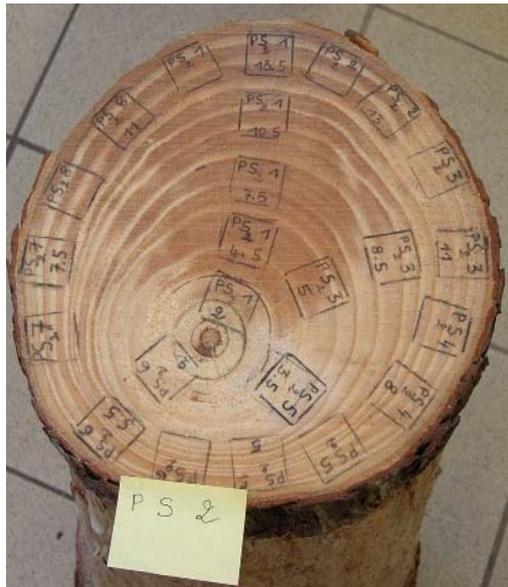


Figure 4.3 Billon de Pin sylvestre (PS2)

4.2.1.3 Mesures en laboratoire

Mesures des retraits longitudinal et tangentiel (A.Thibaut)

Les mesures de retrait radial (R_R), tangentiel (R_T) et longitudinal (R_L) ont été réalisées sur des éprouvettes (extraites des rondelles précédente) de dimensions 20x20x50mm (+/-1%). Les dimensions et masse des éprouvettes ont été relevées à l'état vert puis pour différentes stabilisation en ambiance régulée en température et humidité relative HR (30° et 80% HR, 20° et 30%HR, 0% HR). Par différence entre la masse humide et la masse anhydre, pour chaque ambiance, le taux d'humidité des éprouvettes a été déterminé. Les retraits totaux sont ensuite calculés, pour les directions radiale, tangentielle et longitudinale par différence de dimensions entre l'état vert et l'état anhydre. Nous ne présenterons ici que les retraits totaux calculés par le CIRAD entre l'état vert et l'état anhydre. Certains retraits n'ont pas été calculés en raison de la présence de nœud. D'autres, réalisés uniquement sur des éprouvettes plus petites ne sont pas figurés pas soucis d'homogénéité dans la présentation.

Etudes anatomiques (J. Ruelle)

a) Préparation des échantillons

Des couples d'échantillons correspondant aux fortes valeurs d'ICC et de retrait longitudinal et aux faibles valeurs d'ICC et de retrait longitudinal ont été prélevés. Sur ces mêmes échantillons, des coupes d'épaisseurs 15 μm , ont été réalisées au microtome, puis une double coloration safranine (colorant des parois lignifiées) / bleu alcian (colorant de la cellulose) a été appliquée.

b) Observations microphotographiques (dimensions cellulaires et AMF ϕ)

Les coupes microtomées ont ensuite été montées en lame mince pour pouvoir être observées par microscopie (grossissements 100X et 500X) puis photographiées numériquement. Les critères géométriques mesurés et fournis par l'auteur sont :

- diamètre radial (FLDR) et tangentiel (FLDT) des lumens des fibres (exprimés en μm)

- épaisseur de la double paroi radiale (FepPR), tangentielle (FepPT) calculées par l'auteur, sur chaque cellule, par la différence entre le diamètre externe de la fibre (non fourni) et le diamètre du lumen dans la direction donnée.

L'ensemble des mesures de ces critères anatomiques a été réalisé par un traitement d'images (routines écrites en Analytical Language for Images et logiciel de traitement Optimas).

L'inclinaison des microfibrilles dans la sous couche S₂ des cellules de bois initial et final de chaque échantillon a également été mesurée. La méthode de mise en évidence et de mesures des microfissures est celle mise au point et décrite dans Senft *et al* (1985). Pour chaque coupe mince sont déterminés les angles dans S₂ d'environ 80 microfibrilles.

Mesures des modules élastiques longitudinaux par méthode vibratoire (A.Thibaut)

Des éprouvettes sèches à l'air de 25x25x500mm (+/-1%), en appui sur des supports élastiques ont été percutees radialement (PR) et tangentiellement (PT) (méthode mise au point par Bordonné en 1989). Les vibrations libres du signal résultant ont été, une fois acquises par un microphone, numérisées puis traitées par le logiciel Bing 2000 du CIRAD Forêt (transformées de Fourier puis analyse spectrale). Par calcul, est déduite une appréciation du module élastique.

Essais de compression longitudinale jusqu'à rupture (A. Thibaut)

Des éprouvettes (20x20x60mm) ont été taillées selon la direction longitudinale dans chacune des zones définies dans la rondelle (Figures 4.2 et 4.3).

Les données numériques (fichiers txt) relatives aux essais de compression longitudinale jusqu'à rupture ainsi que les dimensions des éprouvettes testées ont été fournies par l'équipe Bois du CIRAD Montpellier.

a) Dispositif expérimental

La machine de traction compression (à plateau inférieur rotulé) est une machine hydraulique Adhamel Lomargy DY 36 équipée du logiciel d'acquisition et de pilotage Testworks (société MTS). Des précharges de 10 N ont été appliquées avant essai sur des éprouvettes de 20x20x60cm. La vitesse de sollicitation est de 0,01 mm/s et le capteur de force est de 100 kN (+/-10 N), la position de traverse est estimée avec une incertitude de 1/100 mm.

b) Procédure d'exploitation des résultats

A partir des courbes expérimentales, et après identification du domaine de comportement linéaire, des rigidités longitudinales équivalentes (pente) sont calculées par régression linéaire. A partir des dimensions de l'éprouvette, les modules d'élasticité longitudinaux de chaque échantillon ont été déduits. La sélection des points de mesure pris en compte s'est faite avec le souci d'un coefficient de régression linéaire le plus proche de l'unité. La longueur de chaque éprouvette est de 60mm, l'ordre de grandeur de la section carrée est de 4 cm² (mesurée au 1/100 de mm).

Essais préliminaires de compression sur des échantillons cubiques centimétriques

a) De l'arbre sur pied aux cubes

Sur chacune des rondelles issues des billons prélevés in situ (Figures 4.1, 4.2 et 4.3), des zones d'études (zones 1, 2, 3, 4) espacées chacune de 90 degrés ont été définies. Les zones 1 et 2 correspondent à des échantillons situés dans la zone la plus colorée de chaque rondelle les zones 3 et 4 sont diamétralement opposées respectivement aux zones 2 et 1. De chacune de ces zones (quartiers) ont été extraits des barreaux qui ont été amené à l'état sec à l'air après séchage à l'étuve (80°C progressivement durant 6 jours jusqu'à ce que la masse soit stabilisée). Ce premier séchage a été réalisé afin de faciliter la découpe.

Une barrette verticale a ensuite été taillée dans la profondeur disponible de chacun des barreaux. A partir de cette barrette, des échantillons de forme cubique ont été découpés. Suivant les conditions techniques de la découpe (épaisseur disponible dans la rondelle), 2 ou 3 éprouvettes grossièrement cubiques ont été extraites. Ces éprouvettes ont ensuite été fraisées pour leur donner des arrêtes de 2cm. Avant les essais, les échantillons ont été soumis à un nouveau séchage à l'étuve (80°C durant 6 jours). La pesée des échantillons ($\pm 0,01g$) a été réalisée avant chaque série d'essais. La mesure de chacune des faces ($\pm 1\%$ répétées deux fois) a été faite en sortie de l'étuve.

Les essais mécaniques, réalisés sur les cubes, ne peuvent en toute rigueur être qualifiés d'essais de compression. Ils n'obéissent en effet pas aux règles de normalisation classiques (entre autre la longueur de l'éprouvette sur le coté de sa section carrée doit être compris entre 3 et 4 (Martin, 1984)). L'ambition initiale était moins de déterminer des modules d'élasticité normalisés que d'évaluer des rapports d'anisotropie élastique du bois de compression.

b) Dispositif expérimental utilisé

Les essais mécaniques ont été conduits, à l'ENSAM Talence, sur une machine hydraulique de traction compression Adhamel Lomargy DY 36 pilotée en force et à plateaux non rotulés. Les compressions réalisées selon les directions radiale et tangentielle ont été menées en utilisant la partie haute de la machine (capteur de force $1kN \pm 10^{-1}N$), les essais de compression longitudinaux font appel à une utilisation de la partie basse (capteur $10kN \pm 10N$).

La vitesse de sollicitation, commune aux deux types d'essais, est de $0,1mm/min$. L'incertitude sur le déplacement de traverse (acquis par le logiciel Autotrack) est de $10^{-2}mm$ (cette incertitude correspond à chaque « palier » horizontal sur les Figures 4.4 et 4.5). Des prés charges de 1N pour les essais transverses et de 10N pour la compression longitudinale sont appliquées.

c) Déroulement des essais

Les cubes ont ensuite été soumis chacun à une sollicitation dans des directions correspondant approximativement aux directions d'orthotropie du bois. Chaque essai a été mené avec le souci de ne conduire qu'à une déformation maximale de 2% tout en étant dans le domaine de comportement linéaire du matériau.

Compte tenu du fait que le déplacement est un déplacement de traverse et non un déplacement mesuré sur les faces, nous parlerons plus de déformation apparente ou de déplacement de

traverse que de déformation ou déplacement d'échantillons. La même remarque est valable pour les caractéristiques élastiques calculées.

d) Procédure d'exploitation des résultats

Après acquisition des fichiers numériques et identification d'une partie du domaine de comportement linéaire de chaque échantillon, un traitement manuel des courbes conduit, pour chaque direction de compression, à la sélection d'une gamme de points de mesures :

- pour les directions transverses de compression ; les déplacements considérés seront ceux correspondant à une valeur de force appliquée comprise dans l'intervalle [300N, 500N] soit une contrainte appliquée comprise dans l'intervalle [0.75MPa, 1.25MPa] (Figure 4.4, Epicéa A4, compression radiale).
- dans la direction longitudinale les déplacements sélectionnés correspondront à une valeur de force appliquée comprise dans l'intervalle [1000N, 2500N] soit une contrainte appliquée située dans l'intervalle [2.5MPa, 7.5MPa] (Figure 4.4, Epicéa A4, compression longitudinale).

Une régression linéaire permet, de déterminer une estimation des raideurs (ou rigidités) apparentes $K_{app.ech}$ de chaque échantillon.

Le coefficient de régression linéaire minimal obtenu sur l'ensemble des échantillons correspond à l'exploitation de l'essai longitudinal de E1A1, sa valeur est de 0,93.

Nb : Pour chaque essence et chaque « type de bois », des compressions d'un cube jusqu'à rupture ont été menées afin de vérifier que l'essai correspondait bien au domaine de comportement linéaire.

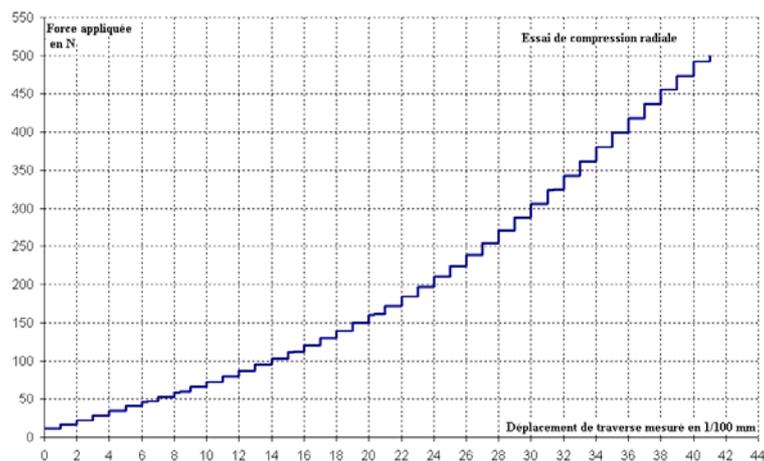


Figure 4. 4 Essai de compression radiale sur l'Epicéa

Les courbes force déplacements obtenues montrent toutes un important pied de courbe, imputable au rattrapage de jeu de la machine (contact échantillon plateau).

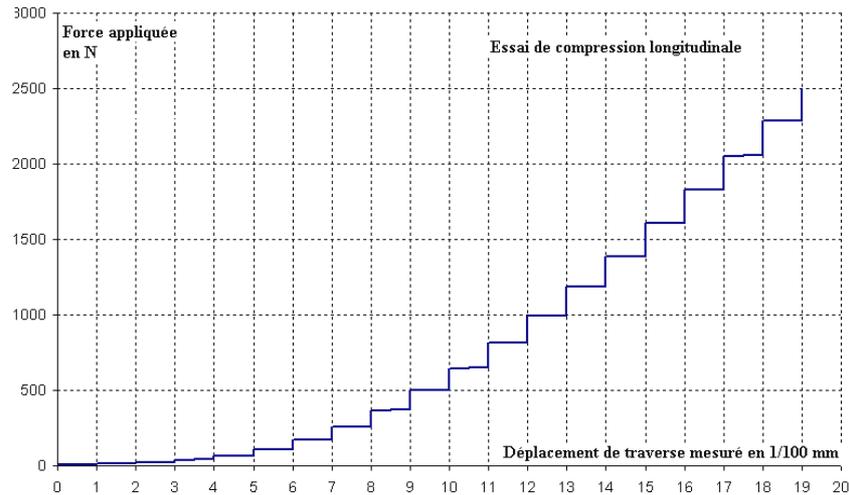


Figure 4.5 Essai de compression longitudinale sur l'Épicéa

Estimation de la rigidité apparente du dispositif expérimental

Pour chaque configuration du montage (partie haute pour les compressions transverses, partie basse pour une compression longitudinale) et avant chaque série d'essais (plusieurs utilisateurs de la machine), une estimation de la rigidité apparente $K_{app.Dispo.}$ du dispositif expérimental, a été fournie par une compression à « blanc » des deux plateaux.

Pour les essais de compression longitudinale la rigidité apparente du dispositif est évaluée à $3,09 \cdot 10^7$ N/m. Pour les essais de compression transverses, réalisés en deux temps, elle est estimée à $4,06 \cdot 10^6$ N/m ou $4,20 \cdot 10^6$ N/m (plusieurs utilisateurs de la machine).

Nb : ces estimations ont été réalisées dans la gamme de forces utilisée pour les essais sur les cubes.

A titre de comparaison, les rigidités apparentes expérimentales des cubes dans la direction longitudinale sont de l'ordre de $2,00 \cdot 10^7$ N/m et de l'ordre de $3,00 \cdot 10^6$ N/m pour les directions transverses.

Une fois ces valeurs estimées, des corrections sur les raideurs apparentes des échantillons ont été apportées en modélisant le système (dispositif - échantillon) par l'association en série de deux ressorts de raideur $K_{app.Dispo.}$ et $K_{app.ech.}$. La raideur apparente corrigée $K_{ech.corr}$ de chaque échantillon testé est donc donnée par la relation (4.1):

$$(4.1) \quad K_{ech.corr} = \frac{K_{app.ech} K_{app.Dispo}}{K_{app.Dispo} - K_{app.ech}}$$

Incertitudes sur la détermination des différentes caractéristiques élastiques

Pour un essai de compression selon une direction z , notant F , la valeur de la force appliquée, d le déplacement de traverse relevé, L_x , L_y , L_z les dimensions de l'échantillon testé, le module d'Young apparent s'écrit (4.2)

$$(4.2) \quad E_z = \frac{F}{L_x L_y} \frac{L_z}{d}$$

L'incertitude sur le module d'élasticité dans la direction z , E_z est alors (4.3)

$$(4.3) \quad \frac{\Delta E_z}{E_z} \leq \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta L_x}{L_x} + \frac{\Delta L_y}{L_y} + \frac{\Delta L_z}{L_z} + \frac{\Delta d}{d}$$

nb : pour les éprouvettes du Cirad Forêt, l'incertitude ΔL_z sur la dimension L_z de l'échantillon est distincte des deux autres déterminées au pieds à coulisse.

Essai de compression jusqu'à rupture (Montpellier)

Dans les conditions expérimentales des essais réalisés à Montpellier, l'ensemble des relations définies en (4.4) fournit une estimation par excès de l'incertitude sur les modules d'élasticité apparents des échantillons (4.5) :

$$(4.4) \quad \begin{aligned} \frac{\Delta F}{F} &= 4 \times 10^{-3} \\ \frac{\Delta L_x}{L_x} &= \frac{\Delta L_y}{L_y} = 3 \times 10^{-3} \\ \frac{\Delta d}{d} &= 4 \times 10^{-2} \\ \frac{\Delta L_z}{L_z} &= 4 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

$$(4.5) \quad \frac{\Delta E_z}{E_z} \leq 0,09$$

De manière analogue, l'ensemble des relations définies en (4.6) et (4.7) fournit des estimations des différentes incertitudes (dans la gamme de points de mesure choisie) pour les essais de compression radiale et tangentielle sur les éprouvettes cubiques :

$$(4.6) \quad \begin{aligned} \frac{\Delta F}{F} &= 3 \times 10^{-3} \\ \frac{\Delta L_x}{L_x} &= \frac{\Delta L_y}{L_y} = \frac{\Delta L_z}{L_z} = 10^{-2} \\ \frac{\Delta d}{d} &= 3 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

$$(4.7) \quad \frac{\Delta E_{x,y}}{E_{x,y}} \leq 0,09$$

Pour l'essai de compression longitudinale, l'incertitude est

$$\begin{aligned} \frac{\Delta F}{F} &= 10^{-2} \\ (4.8) \quad \frac{\Delta L_x}{L_x} &= \frac{\Delta L_y}{L_y} = \frac{\Delta L_z}{L_z} = 10^{-2} \\ \frac{\Delta d}{d} &= 8 \times 10^{-2}. \end{aligned}$$

$$(4.9) \quad \frac{\Delta E_z}{E_z} \leq 0,15$$

4.2.2 Synthèses des différents résultats

Les différentes mesures évoquées précédemment sont présentées dans les Tableaux 4.1, 4.2, 4.3. Les qualificatifs « bois normal », (BN), « bois opposé » (BO) et « bois de compression » (BC) sont attribuées en premier lieu sur des critères uniquement visuels (excentrement et coloration plus foncée).

Indicateurs de contrainte de croissance

Les mesures d'ICC (colonne A) réalisées in vivo permettent de confirmer la classification visuelle bois de compression / bois normal. Les secteurs les plus comprimés de chaque essence présentent systématiquement des valeurs fortement négatives d'ICC. Les zones correspondantes à la limite entre le bois de compression et le bois normal présentent des valeurs d'ICC positives dans le cas du Pin maritime (PM 3.10 et PM 7.6) et négatives pour l'Épicéa (E3.12, 5).

Mesures anatomiques

Pour les trois essences résineuses (Tableau 4.4) les valeurs d'angle moyen des microfibrilles pour les coupes relatives au bois de compression (BC) sont systématiquement supérieures à celle du bois dit « normal » (BN), l'écart le plus important (de l'ordre de 24 degrés) entre l'AMF (φ) de bois normal et AMF (φ) de bois de compression est observé sur le Pin maritime (*Pinus pinaster*).

L'examen des écarts types faibles associés aux mesures des AMF sur l'ensemble du cerne suggère que l'AMF dans le bois initial de compression est peu différent de celui dans le bois normal. Ce résultat est conforme aux mesures par diffraction rayons X menée sur *Larix decidua* (Fioravanti *et al*, 2003).

E3			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Secteur	Distance à la moelle (cm)	Nature	ICC (μ def)	AMF φ en degrés	d (12%)	R _R en %	R _T en %	R _L en %	E _{L(CPR)} en MPa	E _{L(PT)} en MPa	F _n en N	D en mm	W en kJ
1	16	BC	-110	32,4	0,69	2,18	4,83	1,55	3942	8172	17784	1,557	19198
2	9	nœud			0,61				3877	7260	14642	1,172	11471
2	12,5	fin du BC	-18	30,5	0,6	2,16	5,99	1,04	4068	7582	15028	1,119	11106
3	8	BN	65		0,54	3,76	9,74	0,11	4291	11744	15450	1,219	11366
4	5	BO	17	17,7	0,49	4,61	9,90	0,07	3737	8220	13057	1,206	7846
5		BO	10		0,52	3,37	8,48	0,14	3293	6388	11643	0,806	5751
6	4	moelle			0,46	4,08	8,68	0,19					
6	7,5	BN	21		0,55	4,63	9,50	0,19	3473	8666	10737	0,781	4469
7	13	BN	21	22,6	0,56	4,43	10,03	0,14	4074	11496			
8	13	BC			0,82				2844	7221	21219	2,626	38547
8	17	cambium	35		0,79	3,30	7,47	0,51	3665	7424	21235	2,298	34860

Tableau 4. 1 Synthèse des différents résultats expérimentaux sur l'Épicéa

PM			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Secteur	Distance à la moelle (cm)	Nature	ICC (μ def)	AMF φ en degrés	d (12%)	R _R en %	R _T en %	R _L en %	E _{L(CPR)} en MPa	E _{L(PT)} en MPa	F _n en N	D en mm	W en kJ
1	7	BC			0,56	1,87	3,17	3,43	1695	2800	11743	3,051	27417
1	4	BC			0,49	2,10	3,80	2,70	1423	2562	9595	2,633	18673
1	10	BC			0,67	1,88	2,80	3,85	1295	3420	12542	2,455	19059
1	11	BC	-127	44,6	0,66	2,08	3,03	4,13	1655	3247	12970	2,092	16277
2	9	BC			0,57	2,14	4,06	2,85	1784	2473	13025	3,201	29475
2	11,5	BC	-177	44,8	0,64	2,21	2,58	3,99	1776	2933	12032	2,196	8877
3	4	BN+BC			0,42	1,78	4,31	2,78	1586	2820	8395	2,017	12780
3	7	BN+BC			0,41	3,25	6,33	0,47	2577	4914	9644	1,341	9443
3	8	BN			0,43	3,74	6,23	0,31	2778	5442	9460	0,776	3854
3	10	fin BC	70		0,43	2,81	6,21	0,65	1949	4944	9353	1,344	7691
4	6	BN	20	24,8	0,41	4,04	6,84	0,21	2363	5629	9824	1,093	6472
5	2	BN			0,36	3,66	6,57	0,36	1651	3955	7340	1,321	6158
5	5	BO	-15		0,39	4,11	6,51	0,31	2104	5504	6439	0,717	3233

Vers une description de l'anisotropie élastique du bois de réaction

PM			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Secteur	Distance à la moelle (cm)	Nature	ICC (μdef)	AMFφ en degrés	d (12%)	R _R en %	R _T en %	R _L en %	E _{L(CPR)} en MPa	E _{L(PT)} en MPa	F _n en N	D en mm	W en kJ
6	4,5	BO		20,2	0,39	4,12	6,12	0,19	2050	5678	7701	0,927	4864
7	6	fin BC			0,45	2,60	4,31	1,37	2315	4356	10720	1,407	10303
8	8,5	BC			0,63	2,16	2,92	3,13	1972	3626	13463	2,624	26197

Tableau 4 -2 Synthèse des différents résultats expérimentaux sur le Pin maritime

PS2			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Secteur	Distance à la moelle (cm)	Nature	ICC (μdef)	AMF en degrés	d (12%)	R _R en %	R _T en %	R _L en %	E _{L(CPR)} en MPa	E _{L(PT)} en MPa	F _n en N	D en mm	W en kJ
1	4,5	BC			0,65				1822	4201	12896	1,963	15884
1	7,5	BC			0,65				2305	4222	14363	2,299	22562
1	10,5	BC			0,65				2203	4807	13929	1,751	16613
1	13,5	milieu du BC	-100	35,7	0,65	1,57	4,16	1,97	2445	5082	14728	1,605	16063
2	13	fin du BC	-90	32,7	0,52	1,41	4,77	1,33	3017	6436	13415	1,597	14846
3	5	BN+BC			0,48				3806	9026	13001	0,753	5936
3	8,5	BN+BC			0,45				2635	6925	11730	0,964	6954
3	11	BN	31		0,49	4,31	8,98	0,27	3998	9870	14705	0,797	6142
4	8	BN	33	23,0	0,48	3,63	9,07	0,07	3806	9026	13001	0,753	5936
5	3,5	BN	2		0,51		8,61	0,14	2753	6743	10314	0,825	4711
6	5,5	BO	24		0,52		8,49	0,26	2674	7661	9753	0,968	5572
7	7,5	BN +BC	44	23,0	0,49	4,71	9,33	0,14	3678	9030	10035	0,895	5665
8	11	BC	-76		0,64	2,59	6,84	0,42	2507	5612	14481	2,063	20221

Tableau 4 -3 Synthèse des résultats expérimentaux sur le Pin sylvestre

Angles des microfibrilles (φ)

Espèces	Echantillon	Nature	AMF φ en degrés	Ecart type en degrés
Epicéa (E3)	1.16	BC	32,40	3,87
	2.12,5	BC	30,46	3,46
	4.5	BN	17,74	3,83
	7.13	BN	22,62	3,62
Pin sylvestre (PS2)	1.13,5	BC	35,67	3,74
	2.13	BC	32,73	4,21
	4.8	BN	23,02	4,04
	7.7,5	BN	22,96	3,37
Pin maritime (PM)	1.11	BC	44,59	4,88
	2.11,5	BC	44,80	3,29
	4.6	BN	24,77	4,05
	6.4,5	BN	20,19	5,18

Tableau 4-4 Comparaison pour trois essences résineuses des mesures de l'angle des microfibrilles φ du bois normal et du bois de compression (J.Ruelle)

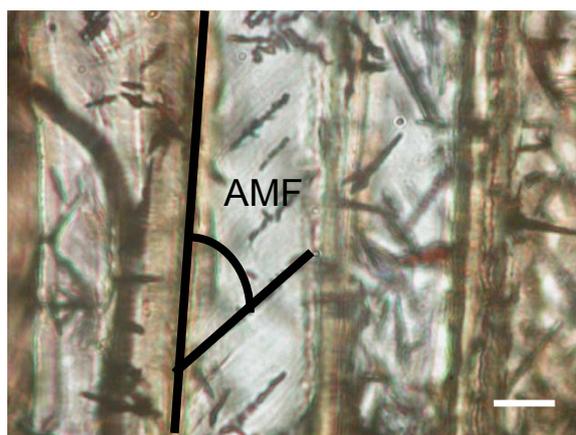


Figure 4.6 Détail d'une coupe radiale dans la sous couche S₂ de Pin maritime, traitement par l'iodure de potassium et l'acide nitrique (Senft et al ,1985). Barre d'échelle : 25 μ m. Grossissement 500X. Ruelle (2003).

L'examen des différentes colonnes (C à K) des Tableaux 4.1 à 4.3 permet de dégager très nettement les particularités mécano physiques des éprouvettes de bois de compression.

La densité à 12%

Pour une même essence, la densité (colonne C) à 12% des éprouvettes BC est toujours supérieure à celles des éprouvettes BN. Les valeurs les plus fortes de densité des éprouvettes BN et BC sont obtenues sur l'Epicéa commun. Elles sont respectivement de 0,56 et 0,82 pour les éprouvettes E3 7.13 et E3.8.13.

Les retraits

La relation d'ordre classique entre les différents retraits des éprouvettes de bois normal (retrait transverses très supérieurs au retrait longitudinal) est vérifiée à travers les résultats consignés dans les Tableaux 4.1, 4.2 et 4.3. Cette relation est fortement modifiée sur les éprouvettes de bois de compression. En effet, le retrait longitudinal est, sur ce type d'échantillon, toujours supérieur aux deux retraits transverses

Ce résultat est d'ailleurs bien connu dans la littérature ; de forts retraits longitudinaux sont attribués (notamment) à un angle des microfibrilles particulièrement ouvert (Yamamoto *et al*, 2001). Des éprouvettes taillées dans une zone proche de la limite bois de compression/ bois normal (PM 3.4, PM 3.7, PS 2.13, E3.12.5) présentent encore des retraits longitudinaux supérieurs à ceux du bois normal.

Propriétés mécaniques des éprouvettes de bois de compression

a) Modules élastiques longitudinaux

Nous avons choisi de ne faire figurer dans les Tableaux 4.1 à 4.3 que les modules d'élasticité longitudinaux $E_{L(PT)}$ tirées d'une percussion tangentielle (colonne H). Comparativement à une percussion radiale, une sollicitation tangentielle permet en effet de s'affranchir d'une surestimation de la rigidité dans un milieu particulièrement rigide (bois final par exemple).

Quelque soit la méthode utilisée, les modules d'élasticité longitudinaux (colonnes G et H des Tableaux 4.1 à 4.3) des éprouvettes de bois de compression sont toujours plus faibles que ceux obtenus sur le bois normal (BN).

Ces résultats marquent la différence nette des propriétés élastiques entre le bois de compression et le bois normal ; le bois de compression bien que nettement plus dense que le bois normal présente un module élastique longitudinal plus faible.

Les écarts les plus importants entre les modules élastiques longitudinaux du bois de compression et ceux du bois normal sont obtenus par la méthode vibratoire (Tableau, colonnes H des Tableaux 4.1 à 4.3).

b) Comparaisons des modules d'élasticité longitudinaux obtenus par méthode vibratoire et par compression jusqu'à rupture

Les écarts les plus importants entre les modules élastiques longitudinaux du bois de compression et ceux du bois normal sont obtenus par la méthode vibratoire (Tableaux 4.1 à 4.3, colonnes G et H).

Les mesures des modules élastiques, obtenues sur des éprouvettes de même origine (BC ou BN) sont significativement différentes selon la méthode utilisée (méthode vibratoire ou essai de compression, Tableaux 4.1 à 4.3, colonnes G et H, Figures 4.7, 4.8 et 4.9). Un rapport de l'ordre de deux entre la mesure par méthode vibratoire $E_{L(PT)}$ et la mesure tirée de l'essai de compression $E_{L(CPR)}$ est observé. Ce rapport n'est pas spécifique à la nature (BN ou BC) de l'éprouvette testée.

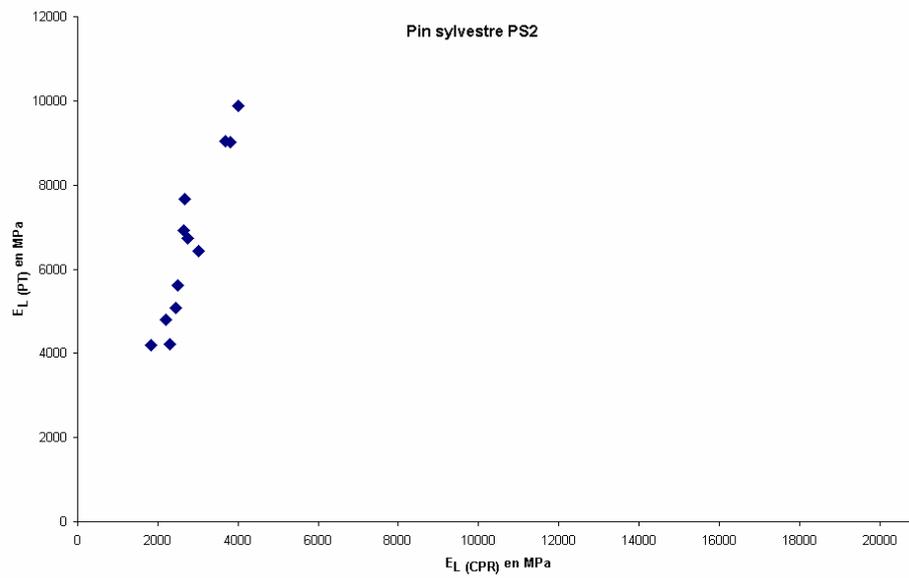


Figure 4.7 Comparaison sur le Pin sylvestre du module élastique longitudinal obtenu par méthode vibratoire au module tiré de l'essai de compression

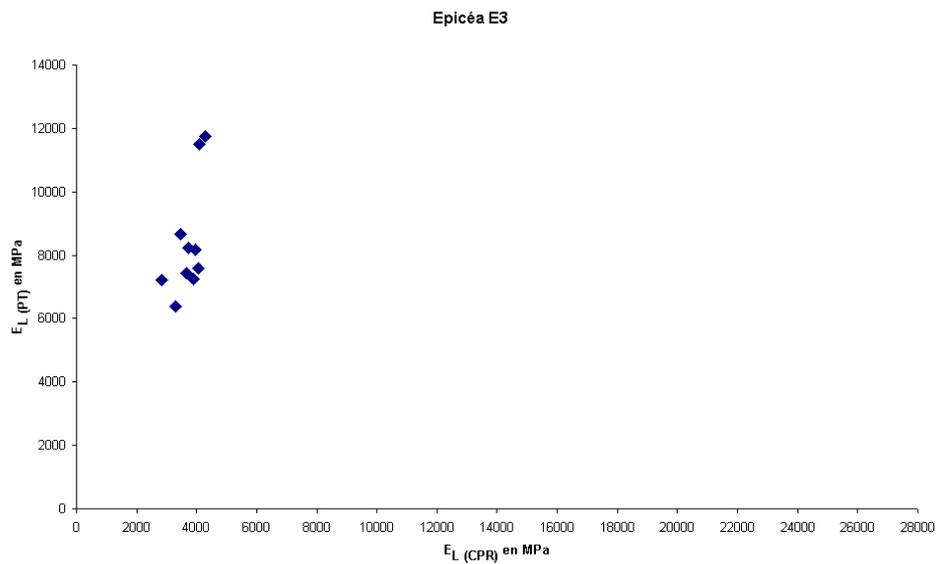


Figure 4.8 Comparaison sur l'Epicéa du module élastique longitudinal obtenu par méthode vibratoire au module tiré de l'essai de compression

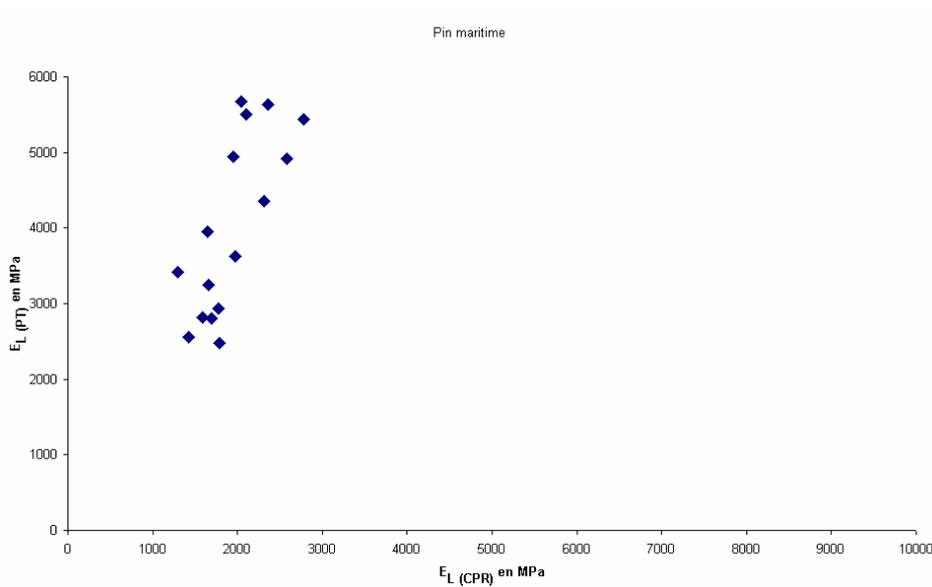


Figure 4.9 Comparaison sur le Pin maritime du module élastique longitudinal obtenu par méthode vibratoire au module tiré de l'essai de compression

c) Travail jusqu'à la force maximale appliquée durant l'essai

Lors des essais mécaniques, la force maximale F_n relevée sur les éprouvettes BC est systématiquement supérieure à celle relevée sur les éprouvettes BN (Figures 4.10). Le module élastique longitudinal calculé sur les éprouvettes BC est quand à lui toujours inférieur à celui des éprouvettes BN.

Pour rendre compte de ces deux tendances constatées sur les trois essences, le travail W nécessaire à une déformation maximale de chaque type d'éprouvette été évalué en calculant l'aire de chaque courbe située entre l'origine et la force maximale F_n . En notant d_i chaque déplacement élémentaire et F_i chaque force relevée le travail W est donc

$$(4.10) \quad w = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{2} (d_{i+1} - d_i) (F_{i+1} + F_i)$$

Les résultats présentés en colonne K des Tableaux 4.1 à 4.3 confirment que le travail W est plus important pour des éprouvettes de bois de compression que pour des éprouvettes de bois normal.

Compte tenu du rôle bio mécanique du bois de compression dans l'arbre (gravitropisme), ce résultat apparaît cohérent. Le bois de compression est moins rigide que le bois normal et se déforme plus avant de rompre.

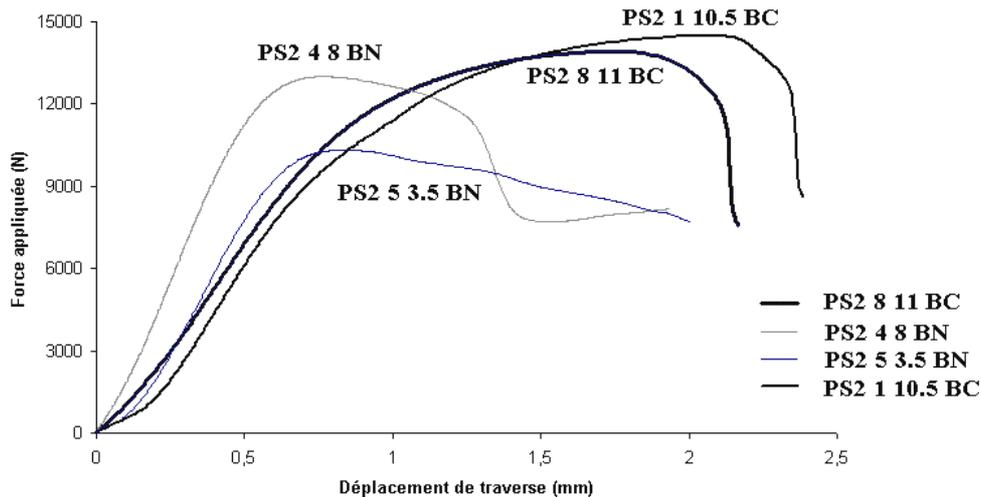


Figure 4.10 Comparaison des courbes expérimentales (essai de compression) obtenues sur le bois de compression et le bois normal

c) Modules d'élasticité des échantillons cubiques

Les résultats obtenus sur les échantillons cubiques sont reportés dans le Tableau 4.5.

Les modules élastiques longitudinaux déterminés sur les cubes sont tous inférieures aux modules élastiques évalués par méthode vibratoire ou à ceux tirés des essais de compression jusqu'à rupture.

Si la zone 1 peut être à coup sur qualifiée de zone de bois de compression sur les 3 essences en regard des densités mesurées, la zone 2 bien que fortement colorée correspond plus à un mélange de bois de compression et de bois normal. Les modules élastiques longitudinaux de cette zone 1 sont tous inférieurs aux modules élastiques des zones 2, 3 et 4. Cette même zone 2 présente sur les 2 essences des modules élastiques longitudinaux légèrement supérieurs à celle de la zone 1, la classification de la zone 2 comme mélange BC+BN est donc vraisemblable. Une distinction des différents types de bois dans la rondelle ne peut être tentée sur un seul critère de coloration.

Les modules transverses sont fortement dispersés, il apparaît difficile de distinguer le bois de compression des autres types de bois. On remarque néanmoins que le module radial est supérieur au module tangentiel (excepté pour les deux échantillons de E1A1 et pour le premier échantillon de E1A4). Dans ces trois échantillons la tangente aux cernes n'est pas parfaitement parallèle à la face radiale du cube. Ce défaut est particulièrement marqué pour les échantillons de E1A1 (angle de 35 degrés entre la tangente au cerne et la face radiale du cube). Pour le premier échantillon de E1A4, le même angle n'est « que » de 10 degrés.

Ces résultats partiels montrent que la procédure de découpe des cubes demande à être revue. Plusieurs échantillons ont présenté des coins fortement ébréchés, voire cassés, en particulier ceux du Pin maritime.

Echantillons	Zone	Densité	Nature	E _L en GPa	E _R en GPa	E _T en GPa
E1A1	1	0,88	BC	2,68	0,63	0,95
		0,67	BC	2,22	0,56	0,66
E1A2	2	0,39	BC+BN	3,83	0,51	0,29
		0,41	BC+BN	4,69	0,57	0,32
E1A3	3	0,40	BO	4,36	0,12	0,33
		0,45	BO	4,06	0,33	0,25
E1A4	4	0,39	BO	3,40	0,46	0,24
		0,37	BO	4,55	0,16	0,12
PS21	1	0,52	BC	2,27	0,74	0,21
		0,51	BC	1,44	1,20	0,26
		0,48	BC	1,42	0,90	0,28
PS22	2	0,38	BC+BN	2,21	1,61	0,25
		0,40	BC+BN	3,20	-	-
		0,40	BC+BN	3,39	1,30	0,28
PS23	3	0,45	BO	1,81	1,33	0,41
		0,48	BO	4,01	2,97	0,42
		0,46	BO	3,54	1,88	0,42
PS24	4	0,45	BO	5,04	0,96	0,60
		0,47	BO	2,74	0,58	0,57
		0,52	BO	2,82	1,08	0,44

Tableau 4-5 Résultats partiels obtenus sur les échantillons cubiques

Paramètres géométriques cellulaires

A partir des résultats fournis par Ruelle, nous avons calculé les valeurs de nos paramètres géométriques D_R , D_T , e_R , e_T (Tableau 4.9) à partir des valeurs FLDR, FLDT, FePR, FePT (Tableau 4.6).

L'examen des valeurs portées dans le Tableau 4.9 permet de comparer les valeurs des paramètres géométriques du bois initial normal à ceux de bois initial de compression.

Comparaison entre le bois initial normal et le bois initial de compression

Conformément à la littérature, quelque soit l'espèce il n'y a pas de différences notables en terme de diamètre radial et tangentiel ou en terme d'épaisseur entre les deux tissus. Les diamètres radial et tangentiel et les épaisseurs pariétales déduits ne sont pas différents

Comparaison entre le bois final normal et le bois final de compression

La différence essentielle entre le bois final de compression et le bois final normal réside dans les épaisseurs de parois qui sont toujours supérieures dans le bois final de compression

Les diamètres radial et tangentiel déduits ne peuvent être considérés comme significativement différents de ceux du bois final normal

Vers une description de l'anisotropie élastique du bois de réaction

Espèce	Echantillon		Nature	FLDR		FLDT		FepPR		FepPT	
				moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type
Epicea E3	1.16	Tot_cerne	BC	17,30	9,72	18,12	6,04	8,82	2,95	10,80	3,95
		Bois initial		31,14	5,44	24,76	4,60	4,81	0,38	6,29	3,69
		Bois final		6,86	2,77	12,97	4,35	11,31	2,56	14,75	1,83
	2.12,5	Tot_cerne	BC	18,36	10,43	18,12	6,58	8,14	2,50	9,70	3,06
		Bois initial		34,95	5,69	25,24	5,22	4,35	0,43	5,46	0,85
		Bois final		7,04	3,19	12,02	4,80	10,45	1,93	13,44	2,11
	4.5	Tot_cerne	BN	26,75	10,23	21,76	4,94	5,09	1,52	6,38	2,45
		Bois initial		36,83	6,27	23,52	4,75	3,82	0,34	4,87	0,75
		Bois final		11,00	5,41	17,36	4,16	7,39	1,13	10,11	2,63
7.13	Tot_cerne	BN	26,02	10,60	22,55	6,55	6,58	2,26	7,00	3,46	
	Bois initial		34,10	5,98	25,89	6,38	4,25	0,39	4,83	0,59	
	Bois final		8,75	5,61	14,42	4,56	9,88	1,95	12,65	3,93	
Pin maritime PM	1.11	Tot_cerne	BC	17,84	6,19	20,13	5,27	6,97	2,13	9,42	2,46
		Bois initial		19,21	4,40	22,98	4,76	3,91	0,97	5,46	0,99
		Bois final		20,96	9,72	21,65	4,86	6,26	1,39	8,96	1,33
	2.11,5	Tot_cerne	BC	16,65	4,42	18,67	5,23	8,19	1,21	10,24	1,28
		Bois initial		20,19	4,41	19,71	5,55	7,91	0,81	9,31	0,95
		Bois final		14,74	4,90	17,34	5,09	7,80	1,30	10,11	1,07
	4. 6	Tot_cerne	BN	26,20	8,77	29,12	6,56	5,71	0,97	7,08	1,31
		Bois initial		33,46	5,79	34,61	5,35	5,25	0,43	6,69	0,50
		Bois final		15,56	5,43	28,46	5,73	6,12	1,02	8,77	1,18
6. 4.5	Tot_cerne	BN	25,55	9,47	28,51	7,15	5,15	1,11	6,56	2,01	
	Bois initial		34,35	6,43	31,35	5,90	4,84	0,51	5,67	0,54	
	Bois final		16,14	4,65	23,00	5,67	6,22	1,15	8,60	1,24	

Tableau 4-6 Critères anatomiques mesurés par Ruelle sur les bois initial et final du bois normal (BN) et du bois de compression (BC) d'Epicea et de Pin maritime

Espèce	Echantillon		Nature	e _T (μ m)		D _T (μ m)		e _R (μ m)		D _R (μ m)	
					écart type		écart type	moy	écart type		écart type
Epicea	1.16	Tot_cerne	BC	4,41	1,48	28,92	9,99	5,40	1,98	26,13	12,67
E3		Bois initial		2,40	0,19	31,05	8,29	3,15	1,85	35,95	5,82
		Bois final		5,65	1,28	27,73	6,18	7,38	0,91	18,17	5,32
		Tot_cerne	BC	4,07	1,25	27,81	9,64	4,85	1,53	26,49	12,93
2.12,5		Bois initial		2,18	0,21	30,70	6,07	2,73	0,43	39,30	6,12
		Bois final		5,23	0,97	25,46	6,90	6,72	1,05	17,49	5,12
		Tot_cerne	BN	2,54	0,76	28,14	7,39	3,19	1,22	31,84	11,75
4.5		Bois initial		1,91	0,17	28,39	5,51	2,43	0,38	40,64	6,61
		Bois final		3,69	0,56	27,47	6,79	5,05	1,31	18,39	6,54
		Tot_cerne	BN	3,29	1,13	29,55	10,01	3,50	1,73	32,60	12,86
7.13		Bois initial		2,13	0,20	30,72	6,97	2,41	0,29	38,36	6,37
		Bois final		4,94	0,97	27,07	8,49	6,32	1,97	18,63	7,56
		Tot_cerne	BC	3,48	1,06	29,54	7,73	4,71	1,23	24,81	8,32
Pin maritime	1.11	Bois initial		1,95	0,49	28,44	5,75	2,73	0,50	23,11	5,37
		Bois final		3,13	0,70	30,62	6,19	4,48	0,66	27,21	11,12
		Tot_cerne	BC	4,09	0,61	28,91	6,51	5,12	0,64	24,84	5,63
2.11, 5		Bois initial		3,96	0,41	29,02	6,50	4,66	0,47	28,10	5,22
		Bois final		3,90	0,65	27,44	6,16	5,05	0,54	22,54	6,20
		Tot_cerne	BN	2,86	0,48	36,20	7,87	3,54	0,65	31,91	9,74
4.6		Bois initial		2,62	0,22	41,30	5,86	3,34	0,25	38,71	6,23
		Bois final		3,06	0,51	37,23	6,90	4,39	0,59	21,68	6,45
		Tot_cerne	BN	2,58	0,56	35,07	9,15	3,28	1,00	30,71	10,58
6.4, 5		Bois initial		2,42	0,26	37,02	6,44	2,83	0,27	39,19	6,94
		Bois final		3,11	0,58	31,60	6,91	4,30	0,62	22,37	5,80

Tableau 4.7 Paramètres géométriques cellulaires du réseau nid d'abeille d'Epicea et de Pin maritime déduits des mesures de Ruelle

Espèce	Echantillon		Nature	FLDR		FLDT		FepPR		FepPT	
				moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type
Pin sylvestre	1.13.5	Tot_cerne	BC	22,09	9,16	20,30	5,50	7,70	2,38	8,85	2,09
PS2		Bois initial		34,90	7,26	23,60	4,57	6,01	2,76	7,02	1,06
		Bois final		15,10	5,42	18,50	4,73	6,77	1,97	8,31	1,38
		Tot_cerne	BC	26,19	11,63	21,45	5,51	7,06	2,21	8,14	2,32
2.13		Bois initial		41,48	6,49	25,75	5,66	5,10	0,65	5,47	0,87
		Bois final		13,40	4,97	17,97	4,11	7,45	1,95	9,31	1,33
		Tot_cerne	BN	27,98	13,04	23,38	6,49	7,71	3,22	8,33	3,05
4.8		Bois initial		44,25	7,47	29,35	5,33	4,97	0,55	5,62	0,99
		Bois final		13,11	5,99	19,85	4,33	7,88	2,29	11,85	2,47
		Tot_cerne	BN	24,88	11,78	20,22	6,57	7,39	2,85	8,75	3,32
7.7.5		Bois initial		39,91	5,96	25,64	5,19	4,58	0,37	5,06	0,79
		Bois final		14,26	5,09	17,35	4,49	8,56	2,06	11,12	1,74
		Tot_cerne									

Tableau 4-8 Critères anatomiques mesurés par Ruelle sur le Pin sylvestre

Espèce	Echantillon		Nature	eT (µm)		DT (µm)		eR (µm)		DR (µm)	
					écart type		écart type	moy	écart type		écart type
Pin sylvestre	1.13, 5	Tot_cerne	BC	3,85	1,19	29,15	7,59	4,42	1,05	29,79	11,54
PS2		Bois initial		3,00	1,38	30,61	5,63	3,51	0,53	40,90	10,02
		Bois final		3,39	0,99	26,81	6,11	4,16	0,69	21,88	7,39
		Tot_cerne	BC	3,53	1,10	29,59	7,83	4,07	1,16	33,25	13,83
2.13		Bois initial		2,55	0,32	31,22	6,52	2,74	0,43	46,58	7,13
		Bois final		3,72	0,97	27,28	5,45	4,66	0,67	20,84	6,92
		Tot_cerne	BN	3,86	1,61	31,71	9,54	4,16	1,53	35,70	16,26
4.8		Bois initial		2,49	0,27	34,96	6,32	2,81	0,50	49,22	8,02
		Bois final		3,94	1,14	31,70	6,80	5,92	1,23	20,99	8,27
		Tot_cerne	BN	3,70	1,43	28,98	9,89	4,38	1,66	32,28	14,63
7.7, 5		Bois initial		2,29	0,18	30,69	5,98	2,53	0,40	44,49	6,33
		Bois final		4,28	1,03	28,47	6,23	5,56	0,87	22,82	7,15
		Tot_cerne									

Tableau 4-9 Paramètres géométriques du nid d'abeilles déduits des mesures de Ruelle sur le Pin sylvestre

4.2.3 Influence de modifications anatomiques sur les caractéristiques élastiques prédites.

L'objet de ce paragraphe est d'évaluer l'influence sur les caractéristiques élastiques du RSV de certaines modifications structurales essentielles entre un bois normal et un bois de compression. Cette estimation s'est faite en faisant varier les valeurs des paramètres descriptifs de l'anisotropie élastique du Résineux Standard Virtuel selon les tendances générales évoquées dans la littérature. La cohérence des valeurs numériques attribuées aux paramètres descriptifs de cette distorsion du RSV a de plus été vérifiée en regard des résultats anatomiques obtenus par Ruelle.

A l'échelle du cerne : une masse volumique cible de $0,65 \text{ g/cm}^3$

En regard des différents résultats obtenus par A.THIBAUT, une valeur de $0,65 \text{ g/cm}^3$ a été choisie comme masse volumique cible pour le bois de compression. La texture et la fraction volumique en rayons ligneux du bois de compression n'ont pas été modifiées, elles ne sont en outre pas identifiées dans la littérature.

A l'échelle tissulaire.

Conformément à la littérature (Timell, 1986), la structure anatomique des tissus bois initial et rayon ligneux du bois de compression a été considérée comme strictement identique à celle des mêmes tissus du RSV.

Les modifications envisagées ont donc porté sur les paramètres géométriques cellulaires du bois final RSV.

Les diamètres radial et tangentiel doivent être respectivement égal et légèrement inférieur aux mêmes paramètres décrivant le bois final RSV.

Compte tenu de ces deux dernières contraintes, l'application de la relation 3.12 du chapitre 3, permet d'envisager une épaisseur de paroi de bois final de $4,60 \mu\text{m}$ plus de 60% supérieure à celle décrivant le bois final du RSV ($2,87 \mu\text{m}$). La conséquence immédiate de cette modification est une augmentation de plus de 50% de la masse volumique de ce même tissu (de $0,73$ à $1,10 \text{ g/cm}^3$, colonne A Tableau 4.10).

Sous l'ensemble de ces conditions, les colonnes A des Tableaux 4.10 et 4.11 représentent des jeux de paramètres cellulaires possibles ainsi que les caractéristiques élastiques calculées.

Il est alors possible d'évaluer l'impact de ces modifications sur les modules élastiques prédits par la modélisation.

Le module élastique le plus sensible à une augmentation de 50% de la masse volumique du bois final est le module longitudinal E_L qui passe d'une valeur de $13,1 \text{ GPa}$ pour le RSV à $18,47 \text{ GPa}$ dans le bois de compression (colonnes RSV et A, Tableau 4.11). Cette modification exprime directement la sensibilité du modèle à une diminution de la porosité (i.e à une augmentation de la densité). La deuxième modification particulièrement notable concerne le module élastique tangentiel E_T dont la valeur passe de $0,635 \text{ GPa}$ à $1,05 \text{ GPa}$;

cette rigidification est directement imputable à la réduction du terme de flexion des parois par une forte augmentation de l'épaisseur pariétale.

A l'échelle ultrastructurale

Conformément à des constatations cytologiques déjà évoquées, le taux de microfibrilles a été abaissé (colonnes B des Tableaux 4.10 et 4.11) à 30%. La modification la plus remarquable a lieu sur le module élastique longitudinal E_L qui passe d'une valeur de 18,47 GPa à 11,70 GPa. Les modules transverses sont assez peu sensibles à cette modification.

Une modification de l'angle des microfibrilles a ensuite été envisagée (colonnes C des Tableaux 4.10 et 4.11) dans les deux tissus bois initial et bois final. L'angle adopté a été fixé initialement à 45 degrés, valeur pouvant être considérée comme maximale dans le bois de compression.

La modification la plus sensible des caractéristiques élastiques a porté sur les modules transverses. Le module E_R passe ainsi d'une valeur de 1,15 GPa à 3,36 GPa, dans le même temps le module tangentiel passe de 1,15 GPa à 3,16 GPa. Cette modification des caractéristiques élastiques macroscopiques est directement imputable à une rigidification transverse de la double paroi par une augmentation de l'angle des microfibrilles (φ). Le module longitudinal E_L dont la valeur est de 9,08 GPa à cette étape de la construction apparaît comme une valeur possible pour un bois de compression.

La valeur de 45 degrés de l'angle des microfibrilles doit être considérée comme une valeur maximale. Pour cette raison les évolutions des différents modules élastiques avec la valeur de l'angle des microfibrilles insérée dans la modélisation sont reportées sur la Figure 4.12.

On remarque qu'une diminution de l'angle des microfibrilles a pour conséquence majeure une augmentation forte du module longitudinal et une diminution des modules élastiques transverses. Ces mêmes modules élastiques sont en outre assez proches l'un de l'autre et ce quelque soit l'angle des microfibrilles (on tend vers une isotropie transverse).

Pour une valeur d'AMF (φ) de 30 degrés le module longitudinal passe d'une valeur de 9,08 GPa à 11,07 GPa, les modules transverses évoluent quant à eux de 3,35 GPa à 2,17 GPa pour E_R et de 3,15 à 2,7 GPa pour E_T . Plusieurs facteurs explicatifs de tels résultats peuvent être évoqués.

Module d'élasticité longitudinal

Le module longitudinal est a priori surestimé par la modélisation appliquée. Directement liée à la porosité (relation 2.17 du chapitre 2), l'évaluation du module longitudinal suppose que les tissus ligneux peuvent être considérés comme des structures nids d'abeilles à cellules rectangulaires. La présence dans le plan transverse du bois de compression, d'espaces intercellulaires quasi systématiques est ici ignorée, elle conduit de fait à une évaluation par excès du module longitudinal.

Modules d'élasticité transverses

Dans le bois de compression, la modélisation prévoit une quasi isotropie transverse (Figure 4.12). Cette tendance est explicable (relation 3.6 du chapitre 3) par une diminution du terme de flexion a_F provenant d'une épaisseur pariétale particulièrement importante (Figure 4.11). La forme arrondie des cellules contribue sans doute à un renforcement de la résistance en flexion (élément BCE envisagé dans le chapitre 2, Figure 2.3).

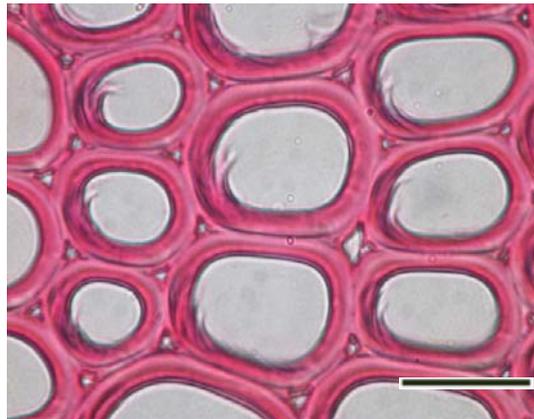


Figure 4.11 Coupe transversale de Pinus pinaster (bois final de compression) colorée à la safranine. Grossissement 500X. Barre d'échelle 25 μ m. Ruelle (2003).

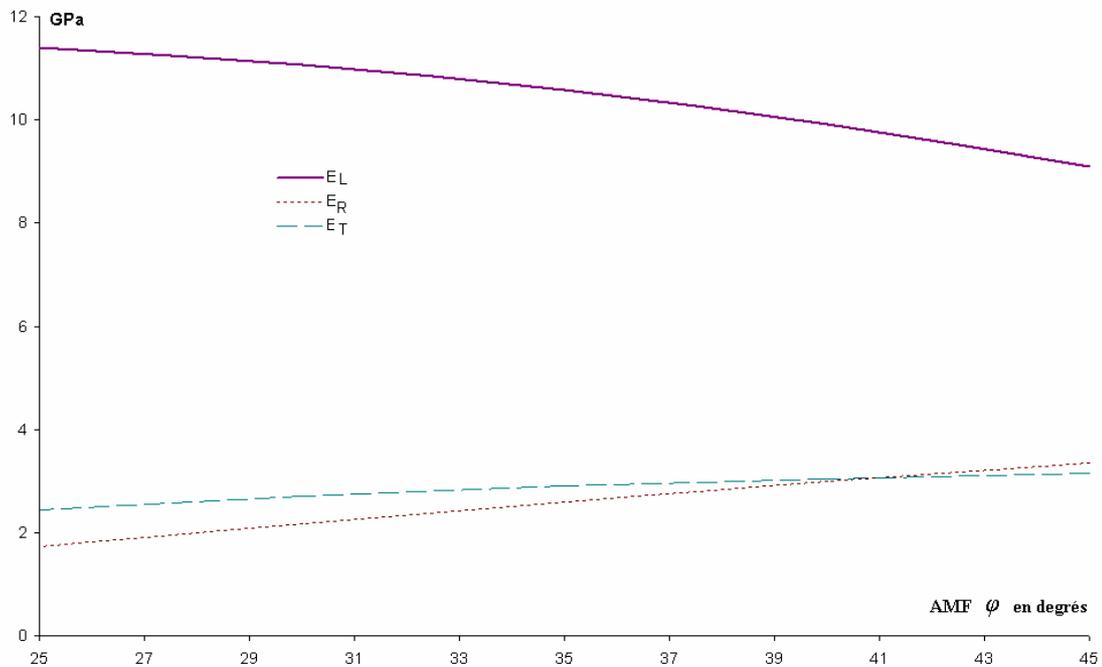


Figure 4.12 Evolutions des différents modules élastiques d'une distorsion du bois RSV avec l'angle des microfibrilles

	RSV	VERS UN BOIS DE COMPRESSION			
		A	B	C	D
Paroi de cellule bois initial					
E^m matrice en GPa	2	2	2	2	2
ν^m coefficient de Poisson de la matrice	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
E^f fibrilles en GPa	62	62	62	62	62
AMF dans S_2 en degrés (φ_i)	22	22	22	45	30
V taux de microfibrilles	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3
Tissu de bois initial					
D_{Ti} diamètre tangentiel en μm	30	30	30	30	30
e_{Ti} épaisseur paroi tangentielle en μm	1,068	1,068	1,068	1,068	1,068
OV paramètre d'ovalisation D_{ri}/D_{ti}	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
$e_i = e_{Ri}/e_{Ti}$ paramètre d'épaisseur pariétale	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ρ_{initial} masse volumique en g/cm^3	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167
Paroi de cellule de bois final					
E^m matrice en GPa	2	2	2	2	2
ν^m coefficient de Poisson de la matrice	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
E^f fibrilles en GPa	62	62	62	62	62
AMF dans S_2 en degrés (φ_f)	5,9	5,9	5,9	45	30
V taux de Microfibrilles	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3
Tissu de bois final					
D_{Tf} diamètre tangentiel en μm	35	31	31	31	31
e_{Tf} épaisseur paroi tangentielle en μm	2,87	4,60	4,60	4,60	4,60
OV paramètre d'ovalisation D_{Rf}/D_{Tf}	0,43	0,485	0,485	0,485	0,485
$e_f = e_{Rf}/e_{Tf}$ paramètre d'épaisseur pariétale	1	1	1	1	1
ρ_{final} masse volumique en g/cm^3	0,729	1,1	1,1	1,1	1,1

Tableau 4.10 Paramètres ultrastructuraux et tissulaires envisagés pour les bois initial et final de compression

	RSV	A	B	C	D
Paroi de cellule de rayon					
E^m matrice en GPa	2	2	2	2	2
ν^m coefficient de. Poisson de la matrice	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
E^f microfibrilles en GPa	60	60	60	60	60
AMF dans S_2 en degrés	46	46	46	46	46
V taux de microfibrilles	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Tissu de rayon					
D_{Tr} diamètre tangentiel en μm	34,5	34,5	34,5	34,5	34,5
e_{Tr} épaisseur paroi tangentielle en μm	1,032	1,032	1,032	1,032	1,032
OV paramètre d'ovalisation D_{Rr}/D_{Tr}	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
$e_R = e_{Rr}/e_{Tr}$ paramètre d'épaisseur pariétale	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
ρ_{rayon} masse volumique en g/cm^3	0,202	0,202	0,202	0,202	0,202
Paramètres de cerne					
T_x texture	0,512	0,512	0,512	0,512	0,512
n fraction volumique en rayons en %	2	2	2	2	2
Les critères cibles					
Masse volumique $\rho = 0,45 \text{ g}/\text{cm}^3$	0,45	0,65	0,65	0,65	0,65
$E_R = 1,00 \text{ GPa}$	1	1,36	1,15	3,36	2,17
$E_T = 0,636 \text{ GPa}$	0,635	1,05	1,15	3,16	2,70
$E_L = 13,1 \text{ GPa}$	13,1	18,47	11,70	9,08	11,07
$E_L/E_R = 13,1$	13,1	13,6	10,19	2,70	5,101
$E_R/E_T = 1,57$	1,57	1,29	0,99	1,06	0,80

Tableau 4.11. Paramètres ultrastructuraux et tissulaires des rayons ligneux et paramètres de cerne envisagés pour le bois de compression

4.2.4 Conclusion

Une campagne expérimentale a permis d'identifier certaines caractéristiques mécano physiques du bois de compression de trois essences résineuses. Le bois de réaction bien que plus dense que le bois normal montre un module d'élasticité longitudinal bien inférieur à celui du bois normal. Des échantillons de ce type de bois montrent en outre un retrait longitudinal important. Ces singularités sont attribuées depuis longtemps à un angle des microfibrilles particulièrement ouvert (pouvant aller jusqu'à 45 degrés).

Des essais de compression jusqu'à rupture ont montré que ce type de bois se distingue singulièrement du bois normal par son aptitude à se déformer avant de rompre. Ces résultats apportent une justification bio mécanique à la formation du bois de compression dans l'arbre.

L'évaluation des modules élastiques équivalent apparaît fortement dépendante de la méthode envisagée. Les plus fortes valeurs sont déterminées par la méthode vibratoire.

Les résultats des essais de compression sur les échantillons cubiques montrent que des éprouvettes de bois de compression présentent un module d'élasticité longitudinal apparent inférieur à celui d'éprouvettes de bois opposé et à celui d'éprouvettes constituées à la fois de bois normal et de bois de compression. Les modules équivalents transverses déterminés par notre expérimentation ne permettent pas de distinction nette entre le bois normal et le bois de compression.

Une distorsion du modèle Résineux Standard Virtuel a été envisagée afin de tester l'aptitude du modèle (envisagé jusqu'alors pour le bois normal) à la prédiction des propriétés mécaniques élastiques du bois de compression. Dans le cas du module élastique longitudinal, la modélisation est apte à décrire la diminution des propriétés mécaniques avec l'angle des microfibrilles et prévoit une isotropie dans le plan transverse.

5 Conclusion et perspectives

Le comportement élastique du matériau bois est habituellement expliqué par la combinaison des comportements individuels de multiples éléments structuraux attachés à chacune des échelles d'hétérogénéités. Partant de cette constatation, l'objectif principal de ce travail était de préciser les paramètres les plus pertinents susceptibles de conditionner la variabilité de l'anisotropie élastique du bois des résineux.

Dans ce but, un certain nombre de propositions bibliographiques ont été intégrées selon une « intuition » mécanicienne, au sein d'une modélisation globale multi échelles de l'anisotropie élastique.

Sur la base d'une étude documentaire pluridisciplinaire, les sources principales de variabilité intra arbre de l'anisotropie élastique sont inventoriées dans le chapitre 1. Les échelles d'hétérogénéités et de descriptions envisagées à l'issue de ce recensement sont strictement limitées à l'essentiel ; l'échelle de la sous couche pariétale, l'échelle de la double cloison cellulaire, l'échelle du tissu ligneux et l'échelle du cerne.

Un ensemble de modélisations mécaniques, basées sur la recherche du solide élastique homogène équivalent, assure le passage de la microstructure au comportement mécanique macroscopique du bois sans défaut. Utilisant essentiellement des lois des mélanges, ces homogénéisations ne font appel qu'à un nombre limité de paramètres structuraux (jugés strictement utiles). Les cheminements intermédiaires amenant à la simulation de l'anisotropie élastique d'un bois de résineux sont alors résumés à 4 transitions fondamentales, appelées Passages.

Le Passage 1 introduit l'anisotropie élastique à l'échelle de la sous couche par la prise en compte d'un renfort filamentaire de la matière ligneuse assuré par des microfibrilles de cellulose quasi cristallines. Il permet la transition des propriétés mécaniques des bio polymères essentiels au comportement mécanique de la sous couche élémentaire.

Le Passage 2 établit un lien entre le comportement de sous couche et la première étape vers un comportement mécanique tissulaire appelée comportement de double cloison cellulaire. Le paramètre majeur expliquant l'anisotropie élastique à cette échelle est l'inclinaison des microfibrilles dans la sous couche S_2 (paramétrée par l'angle des microfibrilles AMF (φ)).

Le Passage 3 permet l'expression des propriétés élastiques d'un tissu ligneux homogène, assimilé à une structure nid d'abeille, à partir des propriétés mécaniques de la double cloison. La prise en compte de la géométrie (diamètres radial et tangentiel, épaisseurs de paroi radiale et tangentielle) et de l'arrangement cellulaires (parois en quinconces ou alignées) autorise alors l'expression des propriétés élastiques de trois tissus ligneux ; le bois initial, le bois final et enfin le rayon ligneux.

Le Passage 4 conduit enfin à l'expression du comportement mécanique du cerne par son assimilation à un bicouche bois initial-bois final renforcé radialement par des rayons ligneux homogènes. Les paramètres descriptifs utilisés à cette échelle sont la texture (épaisseur relative de bois final dans le cerne) et la fraction volumique en rayons ligneux.

La méthodologie employée autorise la substitution éventuelle, à chaque Passages, de modélisations prédictives plus sophistiquées.

La seconde partie du chapitre 2 illustre cette alternative par la mise en place d'une schématisation du renfort filamentaire cellulosique par un squelette de microfibrilles entrecroisées (modélisation Squelette M3).

Les Passages 1 et 2 sont, à cette étape et dans la suite du travail, remplacés par un Passage 1-2 qui assure la transition directe des propriétés mécaniques des bio polymères cellulose, hémicelluloses et lignines à celles du tissu ligneux.

Une des originalités de cette modélisation réside dans la schématisation de la double cloison par une couche unique renforcée par un réseau de microfibrilles entrecroisées dont l'orientation est empruntée à l'angle des microfibrilles dans S_2 .

Une étude documentaire puis une optimisation contrainte conduisent, en fin de chapitre 2, à la construction d'un Résineux Standard Virtuel (RSV). Les propriétés mécano physiques cibles adoptées pour la construction de cette essence fictive sont la masse volumique ρ et les trois modules élastiques E_R , E_T , E_L du résineux standard (Guitard, 1987) stabilisé à un taux d'humidité de 12%. L'essence RSV, élaborée par l'assemblage de trois tissus ligneux (bois initial, bois final et rayons ligneux), est alors décrite par un jeu total de 22 paramètres structuraux. Le réalisme biologique du RSV est testé par la confrontation, à posteriori, de certains de ses paramètres descriptifs à leurs équivalents obtenus expérimentalement sur 3 essences résineuses.

L'outil de modélisation RSV est ensuite employé dans le chapitre 3 afin d'analyser la sensibilité des propriétés élastiques du bois normal à la variabilité de l'ensemble des paramètres architecturaux retenus.

Quelque soit l'option de modélisation envisagée à l'échelle de la double cloison (Multicouches M1, M2 ou Squelette M3), l'anisotropie élastique globale du matériau est fortement dépendante de l'anisotropie élastique de la double paroi. Il est ainsi montré que l'essentiel du comportement élastique macroscopique du bois RSV (densité de 0,45 et AMF (φ) compris entre 5 et 25 degrés) résulte des variations de l'angle des microfibrilles dans la double cloison virtuelle. L'influence de l'angle des microfibrilles sur l'anisotropie élastique macroscopique est particulièrement marquée sur un bois final présentant une forte densité (0,75) et un AMF (φ) compris entre 5 et 10 degrés. Pour un bois initial présentant de faibles épaisseurs pariétales et un AMF (φ) supérieur, un terme de flexion de paroi vient concurrencer l'influence de l'inclinaison des microfibrilles sans toutefois bousculer la hiérarchie précitée.

La comparaison des évolutions des modules élastiques de double cloison prédits par les deux types de modélisations (M2 et M3) montre que pour le modèle Multicouche M2, un angle des microfibrilles (φ) usuel (i.e : compris entre 5 et 35 degrés) conditionne essentiellement le module élastique longitudinal de la double cloison. Dans le cadre d'une modélisation Squelette M3, ce même paramètre (φ) n'intervient fondamentalement que sur les modules transverses de la double cloison. Il est également montré à cette étape que le choix du module d'élasticité des fibres cellulosiques à prendre en compte est directement lié à l'option de modélisation envisagée pour la double cloison.

L'outil RSV mis en œuvre dans le cadre du bois normal est ensuite envisagé pour décrire l'anisotropie élastique du bois de compression (chapitre 4). Devant le manque de références

concernant les caractéristiques élastiques (E_R , E_T et E_L) et l'anisotropie élastique de ce type de bois, une expérimentation sur trois essences résineuses est mise en place. Les modules élastiques longitudinaux obtenus sur des éprouvettes parallélépipédiques s'avèrent sensiblement différents selon l'essai mis en œuvre pour les déterminer (méthode vibratoire ou essais de compression jusqu'à rupture). Ils demeurent néanmoins bien inférieurs à ceux du bois normal.

L'exploitation des courbes expérimentales des essais de compression jusqu'à rupture montre par ailleurs que des éprouvettes de bois de compression ont plus tendance à se déformer avant de rompre que des éprouvettes de bois normal.

Des expériences préliminaires visant l'identification des modules élastiques équivalents E_R , E_T et E_L du bois de compression ont été tentées sur des éprouvettes cubiques centimétriques sèches à l'air. Ici encore, le module longitudinal du bois de compression est inférieur à celui du bois normal.

Les modules transverses E_R et E_T obtenus ne sont pas différents et ce quelque soit la nature de l'éprouvette testée (bois de compression, bois opposé). Les dimensions de telles éprouvettes impliquent la mise au point d'une expérimentation plus soignée passant notamment par un dispositif expérimental parfaitement approprié (entre autre mesure de déplacements sur les faces des échantillons) et la définition d'un volume élémentaire représentatif (effet largeur et nombre de cernes). La géométrie des échantillons se doit en outre d'être irréprochable (uniformité du champ de contraintes). Une lubrification à l'interface échantillon plateau devra également être mise en place (film de téflon).

Une étude bibliographique, présentée en première partie du chapitre 4, permet de faire état de quelques transformations structurales majeures accompagnant la transition d'un bois normal à un bois de compression. Sur cette base, une distorsion du Résineux Standard Virtuel est ensuite présentée. L'impact de certaines modifications (augmentation d'épaisseur pariétale, diminution de diamètre cellulaire, diminution du taux de cristallinité de la cellulose augmentation de l'angle des microfibrilles dans la sous couche S_2) sur les caractéristiques élastiques prédites par la modélisation gigogne est alors évalué.

Certaines hypothèses de construction du modèle, valables pour le bois normal (cellules rectangulaires et de forme régulière), conduisent à une légère surestimation du module longitudinal par une évaluation par défaut de la porosité. La diminution du degré d'anisotropie élastique transverse du bois de compression (rapport E_R / E_T) est constatée à cette étape. Cette tendance est expliquée par des épaisseurs de parois importantes conduisant à une forte diminution du terme de flexion des parois.

Une campagne expérimentale plus large devra être menée prochainement pour acquérir certaines données anatomiques manquantes (texture, fraction volumique en rayons ligneux) et afin de disposer d'un ensemble plus large de mesures de modules élastiques.

Sans remettre en cause la hiérarchisation introduite au chapitre 3, le réalisme biologique de certains « tiroirs » de modélisation pourrait sans doute, par de nouvelles investigations, être amélioré.

Les interactions biologiques entre certaines variables structurales demandent à être explicitées :

- à l'échelle du tissu ligneux, les variations d'épaisseurs pariétales ne sont sans doute pas physiologiquement indépendantes des variations des diamètres cellulaires,
- à l'échelle de la couche d'accroissement, le réalisme de la discrétisation bois initial bois final est biologiquement discutable ; les évolutions de densité intra cerne sont sans doute plus proches d'une sigmoïde que d'une fonction échelon.

Le premier champ d'application du concept de modélisation multi échelles, concerne la prédiction des propriétés de transferts en dessous et au dessus du point de saturation des fibres. Les ponctuations, constituent en effet les éléments structuraux essentiels conditionnant la variabilité des coefficients de transports (Comstock, 1970, Siau, 1986). Le nombre d'échelles de modélisations à prendre en compte devrait être inférieur à celui envisagé pour une modélisation de l'anisotropie élastique (l'échelle de la sous couche est généralement ignorée).

Un deuxième champ d'application vise l'explication structurelle de l'anisotropie des coefficients de retraits hydriques. Ainsi l'anisotropie transverse des retraits a souvent été analysée par l'influence de la combinaison de plusieurs facteurs associés à l'anatomie (alternance de bois initial bois final, présence de rayons ligneux, morphologie cellulaire, structure et topo chimie des parois, angle des microfibrilles). Les échelles de modélisations à envisager seront, dans ce dernier cas, identiques à celles prises en compte dans ce travail.

Bibliographie

BADEL E., PERRE 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.* 56 467-478.

BADEL E. (1999) : Détermination des propriétés élastiques et du retrait transverse d'un cerne annuel de chêne dans le plan transverse: description de la morphologie, mesures des propriétés microscopiques et calcul d'homogénéisation, thèse ENGREF- Nancy 1, 176 pp.

BAILLERES H. (1994) : Précontraintes de croissance et propriétés mécano physiques de clones d'Eucalyptus (Pointe – Noire , Congo) : hétérogénéités, corrélations et interprétations histologiques. Thèse Université Bordeaux 1, spécialité Sciences du Bois, 161 pp.

BARBER N.F., MEYLAN B.A. (1964) : The anisotropic shrinkage of wood: a theoretical model. *Holzforschung* 18 (5): 146-155.

BARKAS W.W. (1941) : The influence of ray cells on the shrinkage of wood. in *Wood Water Relationships IV. Trans Faraday Soc.* 37. 535.

BARRETT J.D. (1973) : Theoretical models of wood shrinkage and elasticity. Ph.D University of California, Berkeley, 276 pp.

BERGANDER A., SALMEN L. (2000) : a The transverse elastic modulus of the native wood fibre wall, *J. Pulp. Paper. Sci.* 26: 234-238.

BERGANDER A., SALMEN L. (2000) : b Variations in Transverse Fibre Wall Properties: relations between Elastic Properties and Structure: *Holzforschung*.54: 654-660.

BERGANDER A., (2001) : Local variability in chemical and physical properties of spruce wood fibers. Doctoral thesis. Stockholm 77 pp.

BERGANDER A., BRANDSTROM J., DANIEL G., SALMEN L. : Fibril angle variability in earlywood of Norway spruce using soft rot cavities and polarization confocal microscopy. Submitted to *Journal of Wood Science*.

BLEDSKY A.K, GASSAN J. (1999) : Composites reinforced with cellulose based fibres, *Prog. Polym. Sci* 24: 221-274.

BODIG J, JAYNE B.A (1982) : *Mechanics of wood and wood composites*, Van Nostrand Reinhold, New York, NY.

BOTOSSO P.C. (1997) : Une méthode de mesure du retrait microscopique du bois : Application à la prédiction du retrait tangentiel d'éprouvettes de bois massif de Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.), thèse en Sciences du Bois, Université Nancy 1, 247 pp.

BOUTELJE J.B. (1962) a : The relationship of structure to transverse anisotropy in wood with reference to shrinkage and elasticity. *Holzforschung* 30.

BOUTELJE J.B (1962) b : On shrinkage and change in microscopic void volume during drying, as calculated from measurements on microtome cross sections of Swedish pine. *Svensk papp.erstidning* 65, 209-215.

BOUTELJE J.B (1972) : On the relation ship between structure and the shrinkage and swelling of the wood in Swedish pine (*Pinus sylvestris* L.) and Spruce (*Picea abies*). *Svensk papp.erstidning* 755, 1-6.

BOYD J.D. (1974) a :Relating lignification to microfibril angle differences between tangential and radial faces of all layers in wood cells. *Drev. Visk* 19: 41-54.

Bibliographie

- BOYD J.D. (1974) b : Anisotropic shrinkage of wood: identification of the dominant determinants. *Journal of the Japan Wood Research Society* 20 (10): 473-482.
- BOYD J.D, FOSTER J.C. (1975) : Microfibrils in primary and secondary wall growth develop trellis configurations, *Can.J.Bot.* 53 (23): 2687-2701.
- BOYD J.D.(1977) : Relationship between fibre morphology and shrinkage of wood, *Wood Sci.Technol.* 11 : 3-22.
- BRISTOW J.A, KOLSETH P. (1986) : Paper. Structure and properties. International Fiber Science and Technology Series 8, 390 pp. Editions Marcel Dekker, inc/ New York. Basel.
- BURGERT I., FRUHMANN K. (2003) : Micromechanics of wood –structure – function relationships on the tissue and fiber level. Proceedings of the second International Conference of the European Society for Wood Mechanics. Stockholm, Sweden, May 25th-28th 2003, pp 85-94.
- CARLSSON L., SALMEN L. (1986) : Basic Relations for Laminated Orthotropic Plates, in : Bristow J.A. Editions Marcel Dekker, inc/ New York. Basel, Paper. Structure and properties. International Fiber Science and Technology Series 8, pp. 369-375
- CAVE I.D. (1968) : The anisotropic elasticity of the plant cell wall, *Wood Sci.Technol.* 2: 268-278.
- CAVE I.D. (1972) : Swelling of a fibre reinforced composite in which the matrix is water reactive. *Wood Sci. Technol.* 6 : 157-161.
- CAVE I.D. (1975) : Wood substance as a water reactive fibre reinforced composite. *J. Microscopy.* 104: 47-52.
- CAVE I.D. (1976) : Modelling the structure of softwood cell wall for computation of mechanical properties. *Wood Sci. Technol.* 10: 19-28.
- CHAFFEY, I. (2000) : Microfibril orientation in wood cells: new angles on an old topic. *Trends in Plant Sciences*, 5: 360-362.
- CHARRON S., JOUREZ B., MARCHAL M., HEBERT J. (2003) : Etude comparative des caractéristiques physiques et mécaniques des mélèzes d'Europe (*Larix decidua* Mill.), du Japon (*Larix kaempferi* (Lambert) Carr.) et de leur hybride (*Larix x eurolepis* Henry). *Biotechnol.Agron. Soc. Environ.* 7 (1) : 5-16.
- CHOW K.Y. (1946) : A comparative study of the structure and chemical composition of tension wood and normal wood in beech (*Fagus sylvatica* L.), *Forestry* 20 : 60-77.
- CLAIR B., DESPAUX G., CHANSON B., THIBAUT B. (2000) : Utilisation de la microscopie acoustique pour l'étude des propriétés locales du bois: étude préliminaire de paramètres expérimentaux, *Ann. For. Sci.* 57 : 335-343.
- CLAIR B. (2001) : Etude des propriétés mécaniques et du retrait au séchage du bois à l'échelle de la paroi cellulaire : essai de compréhension du comportement macroscopique paradoxal du bois de tension à couche gélatineuse. Thèse ENGREF, spécialité Sciences Forestières et du Bois, 165 pp.
- COMSTOCK G.L. (1970) : Directional permeability of softwoods. *Wood Fiber* 1 : 283-289.
- COUSINS W.J. (1978) : Young's Modulus of Hemicellulose as related to moisture content. *Wood Science and Technology*, 10 : 1.9-17.
- DAVIAUD R., FILLIATRE C. (1983) : Introduction aux matériaux composites. Editions du CNRS. 452 p.
- DECOUX V., VARCIN E., LEBAN J.M. : Relationships between the intra rings wood density assessed by X ray densitometry and optical anatomical measurements in conifers. Consequences for the cell wall apparent density. Non publié.

Bibliographie

- DENNE M.P. (1988) : Definition of latewood according to Mork (1928). IAWA Bulletin n.s.10 (1): 59-62.
- DONALDSON L.A. (2001) : Lignification and lignin topochemistry- an ultrastructural view. *Phytochemistry* 57: 859-873.
- DUMAIL J.F. (1995) : Caractéristiques physiques et mécaniques du bois juvénile de pin maritime (*Pinus pinaster*), thèse de Mécanique, Université Bordeaux 1, 229 pp.
- DUNNING C.E. (1968) : Cell- wall morphology of longleaf pine latewood. *Wood Sci. Technol.* 1: 65-76.
- ERICKSON H.D., HARRISSON A.T. (1974) : Douglas Fir Wood Quality Studies, Part I: Effects of Age and Stimulated Growth on Wood Density and Anatomy. *Wood Sci. Technol.* 8: 207-225
- FARRUGGIA F., LAHBABI R., PERRE P. (1996) : Détermination des propriétés mécaniques des résineux à l'échelle microscopique du plan ligneux, Cahiers Lorrains du Bois ARBOLOR.
- FARRUGGIA F. (1998) : Détermination du comportement élastique d'un ensemble de fibres de bois à partir de son organisation cellulaire et d'essais mécaniques sous microscope. Thèse ENGREF, spécialité Sciences Forestières et du Bois, 93 pp.
- FARRUGGIA F., PERRE P. (2000) : Microscopic tensile tests in the transverse plane of earlywood and latewood parts of spruce. *Wood Sci. Technol.* 34: 65-82.
- FENGEL D. (1968) : The ultrastructure of wood. *Wood Sci. Technol* 2 (2): 73-83.
- FENGEL D., STOLL M.(1973) : On the Variation of the Cell Cross Area, The Thickness of the Cell Wall and of the Wall Layers of Spruce wood Tracheids within an Annual Ring, *Holzforshung* 27: 1-7.
- FENGEL D., WEGENER G. (1984) : The Internal Structure of Fibrils, *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions.* De Gruyter, Berlin - New York. 97-98.
- FERRAND J.C. (1982) : Réflexions sur la Densité du Bois. 1ere partie : Définition de la densité du bois. *Holzforshung* 36: 99-105.
- FIORAVANTI M., FEDERICI S. (2003) : Determination of Microfibril Angle in Compression Wood by Means of X-ray Diffraction Technique. Proceedings of the second International Conference of the European Society for Wood Mechanics. Stockholm, Sweden, May 25th-28th 2003. pp 223-229.
- FUKUZAWA K., IMAGAWA H. (1981) : Quantitative analysis of lignin using an UV microscopic image analyser. Variation within one growth increment. *Wood Sci. Technol* 15: 45-55.
- GACHET C., GUITARD D., GRIL J. (2003) : The importance of S2 sub- layer in the description of cell wall anisotropy in softwood. Proceedings of the second International Conference of the European Society for Wood Mechanics. Stockholm, Sweden, May 25th-28th 2003. pp 319-324.
- GIBSON L.J., ASHBY M.F.(1988) : Cellular solids, Pergamon Press.
- GILLIS P.P. (1972) : Orthotropic elastic constant of wood. *Wood Sci. Technol.* 6: 138-156.
- GINDL W., GUPTA H.S., GUNWALD C. (2002) : Lignification of spruce tracheids secondary cells walls related to longitudinal hardness and modulus of elasticity using nano-indentation. *Can.J.Bot* 80 : 1029-1033.
- GINDL W., WIMMER R., GUPTA H., SCHOBERL T. (2003) : Nanoindentation technique-mechanical analysis at the sub- micron scale. Proceedings of the second International Conference of the European Society for Wood Mechanics. Stockholm, Sweden, May 25th-28th 2003. p 285-290.
- GRIL J. (1987) : Une modélisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure, thèse de Sciences Physiques, Université Paris VI, 268 pp.
- GUILLEY E. (2000) : La densité du bois de Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) : Elaboration d'un modèle pour l'analyse des variabilités intra et inter arbre ; Origine et évaluation non destructive de l'effet

Bibliographie

« arbre » ; interprétation anatomique du modèle proposé, thèse ENGREF, spécialité Sciences Forestières et Sciences du Bois, 207 pp.

GUITARD D. (1987) : Mécanique du matériau bois et composites, Editions C.E.P.A.D.U.E.S. 220 p

GUITARD D., EL AMRI F. (1987) : "La fraction volumique en rayons ligneux comme paramètre explicatif de la variabilité de l'anisotropie élastique du matériau bois.". Actes du 2^{ème} Colloque des Sciences et Industries du Bois". 22-24 Avril 1987. Nancy.

GUITARD D., MASSE H., YAMAMOTO H., OKUYAMA T. (1999) : Growth stress generation: a new mechanical model of the dimensional change of wood cells during maturation, *J.Wood Sci* 45: 384-391.

GUITARD D., GACHET C. (2002) : Paramètres structuraux et/ou ultrastructuraux facteurs de variabilité intra arbre de l'anisotropie élastique du bois, *Annals of Forest Science*, accepté.

HACKNEY J. M., ATALLA H., VANDERHART D.L. (1994) : *Int.J. Biol.Macromol* 16 : 215.

HERMAN M., DUTILLEUL P., SHAW T.A. (1999) : Growth rate effects on intra ring and inter ring trajectories of microfibril angle in Norway spruce (*Picea abies*) *IAWA J.* 20: 3-21.

HOLMBERG S., PERSSON K., PETERSSON H. (1999) : Non linear behaviour and analysis of wood and fibre materials. *Computers and Structures* 72. 459-480.

HULT E.L, LARSSON P.T., IVERSEN T. (2000) : A comparative CP/MAS 13 C-NMR study of cellulose structure in spruce wood and kraft pulp. *Cellulose* 7: 35-55.

HUNTER A.J. (2001) : The distribution of mechanical stresses in the cell wall of wood induced by capillary tension in the lumen water- an approximate analysis. *Wood Sc. & Technol.*35: 283-296.

ISHIKAWA A., OKANO T., SUGIYAMA J. (1997) : Fine structure and tensile properties of ramie fibres in the crystalline form of cellulose I, II, III₁ and IV₁. *Polymer* 38 (2): 463-468.

JODIN P. (1994) : Le bois, matériau d'ingénierie, Editions A.R.B.O.L.O.R. 433 p.

KATAOKA Y., SAIKI H., FUJITA M. (1992) : Arrangement and Superimposition of Cellulose Microfibrils in the Secondary Walls of Coniferous Tracheids. *Mokuzai Gakkaishi* 38 (4) : 327-335.

KELLER R. (1999) : Cours de DEA Sciences du Bois: structure, composition, formation du bois. ENGREF.

KHALE E., WOODHOUSE J. (1994) : The influence of cell geometry on the elasticity of softwood, *Journal of Materials Science* 29: 1250-1259.

KHALILI S., NILSSON T., DANIEL G. (2001) : The use of soft rot fungi for determining the microfibrillar orientation in the S2 layer of pine tracheids. *Holz Roh Werkst.* 58: 439-447.

KOLLMANN F.P., COTE W.A.(1984) : Principles of wood sciences and technology.1. Solid wood. Springer -Verlag, New York.

KOMPELLA M.K., LAMBROS J.(2002) : Micromechanical characterization of cellulose fibers. *Polymer Testing* 21 : 523-530.

KOPONEN S., TORATTI T., and KANERVA P. (1989) : Modelling elastic and shrinkage properties of wood. *Wood Sci.Technol.* 23: 55-63.

KOPONEN S., TORATTI T., and KANERVA P. (1991) : Modelling longitudinal elastic and shrinkage of wood based on cell structure. *Wood Sci. Technol.* 25: 25-32.

KRAMER P.J., KOZLOWSKI T.T. (1979) : Physiology of Woody Plants. Academic Press New York San Francisco London. 811 p.

Bibliographie

- LAHBABI R. (1995) : Mesure par analyse d'image de paramètres microscopiques requis pour une prédiction déterministe des propriétés du bois. Thèse ENGREF, Nancy, 141 pp.
- LARTIGUE C. (1987) : Mécanismes élémentaires mis en jeu lors du séchage du pin maritime. Thèse de Mécanique, Université Bordeaux I, 150 pp.
- LEBAN J.M. (1999) a : Un modèle de profil microdensitométrique pour le Pin Laricio. Rapport final de la convention DERF INRA n° 01.40.27/98 : Modélisation : croissance, branchaison, qualité des bois et intégration logicielle. Dreyfus PH.ed .p 16-22.
- LEBAN J.M. (1999) b: Un modèle de profil microdensitométrique pour le Cèdre de l'Atlas. Rapport final de la convention DERF INRA n° 01.40.27/98 : Modélisation : croissance, branchaison, qualité des bois et intégration logicielle. Novembre 1999.
- MAKINEN H., SARANPAA P., LINDER S. (2002) : Wood density of Norway spruce in relation to nutrient optimization and fibre dimensions. *Can. J. For. Res.* 32: 185-194.
- MARGUERIE D., BEGIN Y., COURNOYER L. (2000) : Distinction anatomique du bois du Mélèze (*Larix laricina* [Du Roi] K. Koch), de l'Épinette blanche (*Picea glauca* [Moench.] Voss), et de l'Épinette noire (*Picea mariana* [Mill.] B.S.P.), en vue de l'analyse des macrorestes. *Géographie physique et Quaternaire.* 54(3) : 317-325.
- MARION C. (2001) : "Caractérisation de l'agencement cellulaire du bois à l'aide de critères morphologiques mesurables par analyse d'images", rapport de DEA Sciences du Bois, 30 pp.
- MARK R.E. (1967) : Cell wall mechanics of tracheids. New Haven and London, Yale University Press.
- MARK R.E, GILLIS P.P. (1970) : New models in cell wall mechanics. *Wood and Fiber* 2 : 79-95.
- MARK R.E. (1972) : Mechanical behaviour of the molecular components of fibers in: Eds. Jayne, B.A, Syracuse University Press, Syracuse: Theory and design of wood and fiber composite materials. pp. 49-82.
- MARK R.E. (1980) : Molecular and cell wall structure of wood. Adhesion in Cellulosic and Wood-Based Composites. Plenum Press pp. 7-51.
- MARTIN P. (1984) : Propriétés technologiques pp. B1-1-B1-28, dans Le matériau bois. Propriétés. Technologie. Mise en œuvre. (1984) Editions ARBOLOR.
- MCMILLIN C.W. (1973) : Fibril angle of Loblolly Pine wood as related to specific gravity, growth rate and distance from pith. *Wood Sci Technol* 7(4): 251-255.
- MICHELL AJ. (1989) : Wood cellulose organic polymer composites. *Composite Asia Pacific*, Adelaide.89: 19-21.
- MONTIES B. (2003) : Biological variability of lignification and mechanical behaviour of woody plants. Proceedings of the second International Conference of the European Society for Wood Mechanics. Stockholm, Sweden, May 25th-28th 2003. p 1-14.
- MOTT L., SHALER S.M. GROOM L.H. (1996) : A technique to measure strain distribution in single wood pulp fibres. *Wood Sci. Technol.*28 429-437.
- NAVI, P., RASTOGI P.K., GRESSE V., TOLOU A. (1995) : Micromechanics of wood subjected to axial tension. *Wood Sc. & Technol.*29: 411-429.
- NORIMOTO M., TAKABE K. (1985) : On noncrystalline structure of wood. *Wood Research and Technical Notes*, 21 : 96-101.
- NORTHOLT M.G., BOERSTOEL H., MAATMAN H., HUISMAN R., VEURINK J., ELZERMAN H. (2001) : The structure and properties of cellulose fibres spun from a anisotropic phosphoric acid solution. *Polymer* 42: 8249-8264.

Bibliographie

- ONAKA F. (1949) : Studies on compression and tension wood. Wood research, Bulletin of the Wood research Institute, Kyoto University, Japan, 24: 3. 1-88.
- PAKKARI T. SERIMAA R. (1984) : A study of structure of wood cells by X-ray diffraction. Wood Sci. Technol 18: 79-85.
- PANSHIN A.J., DE ZEEUW C. (1980) : "Textbook of wood technology" - Fourth edition -Mc Graw Hill Book Company - 722 p.
- PERRE P. (1994) : « Le séchage du bois » pp. 202-290 dans Le bois, matériau d'ingénierie, recueil de textes par P. JODIN, Editions A.R.B.O.L.O.R. 433 p.
- PERRE P., KELLER R. (1994) : La prédiction des propriétés macroscopiques du bois à partir de sa structure anatomique: besoin ou moyen de caractériser la paroi? Journal of trace and Microprobe Techniques 12(4) : 277-288.
- PERRE P. (1998) : Relations structure- propriétés et comportement haute température dans le bois: compte-rendu de la réunion conjointe de deux projets financés par la DERF, 145 p.
- PERRE P. (1998) : The use of homogenisation to simulate heat and mass transfert in wood: towards a double porosity approach, Keynote adress, IDS.
- PRESIOZA M., GUITARD D. et SALES C. (1986) : "Contraintes internes de séchage dans le matériau bois: Le tenseur des coefficients de contraintes de séchage comme caractéristique isotrope de la matière ligneuse". Bois et forêts des tropiques. Cahiers scientifiques n°8, p. 91-109.
- PRESTON R.D. (1934) : The organization of the cell wall of the coniferous tracheid. Phil. Trans.Roy.Soc. CCXXIV : 131-174.
- PLUVINAGE G. (1992) : La rupture du bois et de ses composites, Editions CEPADUES, 319 p
- ROLAND J.C., MOSINIAK M., CZANINSKY Y., VIAN B. (1982) : "Précisions ultra structurales sur les modalités d'oscillation dans l'orientation de la cellulose des parois du bois", Colloque Sciences et Industries du Bois, Groupe 1 Grenoble 20-22 septembre 1982.
- RUEL K. (1984) : Etudes en microscopie électronique des inter relations cellulose – hémicelluloses- lignine dans les parois végétales, thèse d'état, Grenoble, 194 pp.
- RUEL K., IMAI T., PILATE T., BAILLERES H., JOSELEAU J.P. (2003) : Microstructural diversity of cell walls in wood revealed by immuno- electron microscopy. Proceedings of the second International Conference of the European Society for Wood Mechanics. Stockholm, Sweden, May 25th-28th 2003.
- RUELLE J. (2003) : Anatomie comparative bois normal/bois de réaction et observation des relations structure/propriétés du bois de six espèces d'angiospermes de forêt tropicale humide et de trois espèces de gymnospermes de zone tempérée. Rapport de DEA Sciences du Bois. 39 p.
- SAKURADA I., NUKUSHINA Y., ITO T. (1962) : Experimental determination of the elastic modulus of crystalline regions in oriented polymers, J. Polymer Sci. 57: 651- 660.
- SAHLBERG U., SALMEN L., OSCARSSON A. (1997): "The fibrillar orientation in the S2 layer of wood fibres as determined by X-ray diffraction analysis". Wood Sci. Technol.31:77-86.
- SALMEN L., DE RUVO A. (1985) : A model for the prediction of fiber elasticity. Wood and Fiber Science, 17 (3): pp 336-350.
- SALMEN L. (1986) : The cell wall as a composite structure, in : Bristow J.A. Editions Marcel Dekker, inc/ New York. Basel, Paper. Structure and properties. International Fiber Science and Technology Series 8, pp 51-73.

Bibliographie

- SALMEN L., KOLSETH P. (1986) : A mechanical model of softwood. , in : Bristow J.A. Editions Marcel Dekker, inc/ New York. Basel, Paper. Structure and properties. International Fiber Science and Technology Series 8, pp. 377-380.
- SALMEN L., OLSSON A.M. (1998) : Interaction between hemicelluloses, lignin and cellulose : structure-property relationships. J.Pulp Paper Sci. 24 : 99-103.
- SALMEN L. (2001) : Micromechanics of the wood cell wall : a tool for a better understanding of its structure. Proceedings of the First International Conference of the European Society for Wood Mechanics. Lausanne, Switzerland.
- SAREN M.T, SERIMAA R., ANDERSSON S., PAAKKARI T., SARANPAA P. (2001) : PESONEN E.: Structural variation of tracheids in Norway Spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). Journal of Structural Biology 136:101-109.
- SASSUS F. (1998) : Déformations de maturation et propriétés du bois de tension chez le hêtre et le peuplier : mesures et modèles. Thèse ENGREF, spécialité Sciences Forestières et du Bois.
- SCHNIEWIND A.P.(1959) : Transverse anisotropy of wood: A function of gross anatomic structure. Forest products journal.350-359.
- SCHNIEWIND A.P.(1972) : Elastic behavior of the wood fiber, Theory and design of wood fiber composite materials. B.A. Jayne Editor.
- SEICHEPINE J.L. (1980) : Mise au point d'une méthode expérimentale destinée à l'identification de la matrice des complaisances élastiques de solides anisotropes : application au matériau bois, thèse de l'I.N.P.L, 186 pp.
- SENFT J.F., BENDSEN B.A.(1985) : Measuring microfibrillar angles using light microscopy. Wood Fiber Sci 17(4): 564-567.
- SIAU J.F.(1984): "Transport processes in wood", Springer-Verlag Berlin N.Y. 254p.
- SINGH A.P., DONALDSON L.A. (1999) : Ultrastructure of tracheid cell walls in Radiata Pine (*Pinus radiata*) mild compression wood. Can. J. Bot. 77: 32-40.
- TIMELL. T.E. (1986) : Compression wood in Gymnosperms. (vol.I). Bibliography, Historical Background, Determination, Structure, Chemistry, Topochemistry, Physical Properties, Origin and Formation of Compression Wood. Springer –Verlag, Berlin 706 p.
- TSAI S.W., HAHN H.T. (1980) : "Introduction to composite materials" Technomic Publishing Company, Wesport.
- TSOUMIS G. (1991). Science and technology of wood : structure, properties, utilization. Van Nostran Reinhold, New York, 494 p.
- VANDERHART D.L., ATALLA R.J. (1984) : Studies of microstructure in native celluloses using solid-state ¹³C NMR. Macromolecules 17 : 1465-1473.
- VENET J., KELLER R. (1986) : Identification et classement des bois français. Editions de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, 2ième édition revue par R. KELLER, 310 p.
- VIEVILLE P. (1992) : Influence des paramètres architecturaux sur les caractéristiques viscoélastiques du bois à ses différentes échelles d'hétérogénéité, thèse de Mécanique et Energétique, I.N.P.L., 197pp.
- WATANABE U., NORIMOTO M, OHGAMA T, FUJITA M. (1999) : Tangential Young's modulus of coniferous earlywood investigated using cell models. Holzforschung 53 : 209-214.
- WATANABE U., NORIMOTO M., MOROOKA T. (2000) : Cell wall thickness and tangential Young's modulus in coniferous earlywood. J. Wood Sci. 46 : 109-114.

Bibliographic

WIMMER R., LUCAS B.N., TSUI T.Y., OLIVER W.C. (1997) : Longitudinal hardness and Young's Modulus of spruce tracheid secondary walls using nanoindentation technique. *Wood Sc. Technol*, 31: 131-141.

YAMAMOTO H. (1998) : Generation mechanism of growth stresses in wood cell walls: role of lignin deposition and cellulose microfibril during cell wall maturation. *Wood Sc. Technol*, 32: 171-182.

YAMAMOTO H. (1999) : A model of the anisotropic swelling and shrinking process of wood. Part1. Generalization of Barber's wood fiber model *Wood Sc.Technol*, 33: 311-325.

YAMAMOTO H., SASSUS F., NINOMOIYA M., GRIL J. (2001) : A model of anisotropic swelling and shrinking process of wood .*Wood Sc.Technol*, 35: 167-181.

YAMAMOTO H., OKUYAMA T., GRIL J. (2003) : Role of the Gelatinous Layer (G-Layer) on the Physical Properties Peculiar to the Tension Wood. *Proceedings of the second International Conference of the European Society for Wood Mechanics*. Stockholm, Sweden, May 25th-28th 2003. p 23-29.

YLINEN A., JUMPPANEN P. (1967) : Theory of the shrinkage of wood. *Wood Sc. Technol*, 1 : 241-252.