DK 540245 BA-TH 1430

NESPOLO Fabien
Élève ingénieur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

ENSAM
Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
Cluny

Rapport de projet de fin d'étude

Réalisé du 6 février au 30 juin 2006
En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur Arts et Métiers

Mise en place d'une campagne d'essais mécaniques sur panneaux OSB

Maîtres de stage LMGC :
Mr Olivier Arnould
Maître de Conférences
Melle Sandrine Bardet
Maître de Conférences

Tuteur ENSAM :
Mr Remy Marchal
Professeur ENSAM

LMGC
LABORATOIRE DE MECANIQUE ET GENIE CIVIL
Mécanique de l'Arbre et du Bois
UNIVERSITE MONTPELLIER 2

UNIVERSITÉ MONTPELLIER 2
SCIENCES ET TECHNIQUES

CIRAD-Dist
UNITÉ MÉDIATHÈQUE
Baillarguet

000094981

ANNEE : 2006

CENTRE DE RATTACHEMENT PFE : Cluny.

AUTEURS : Fabien Nespolo.

TITRE : Mise en place et réalisation d'une campagne d'essais mécaniques sur panneaux OSB.

ENCADREMENT DU PFE : Olivier Arnould ; LMGC. Sandrine Bardet ; LMGC. Remy Marchal ; ENSAM.

PARTENAIRE DU PFE : Laboratoire de mécanique et génie civil (LMGC).

NOMBRE DE PAGES: 51

NOMBRE DE REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES : 19.

RESUME : Issu d'un projet national de recherche, le PFE proposé consistait à mettre en place et réaliser une campagne d'essais mécaniques sur des panneaux OSB naturellement durables, c'est-à-dire composé de mélanges de bois durables, vis-à-vis de l'agression de termites. La première partie du travail consistait donc à définir, développer, concevoir, valider et fabriquer les essais que nous avons réalisés : on a choisi d'utiliser 6 essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques des panneaux OSB. Et ensuite, on a mené une première série d'essais avant d'en analyser les résultats et d'en extraire les premières conclusions.

MOTS-CLES : Panneaux OSB durables / essais mécaniques / constantes d'élasticité/ contraintes à rupture.

ACCES AU DOCUMENT :

PARTIE A REMPLIR PAR LE PROFESSEUR RESPONSABLE DU PROJET

ACCESSIBILITE DE CE RAPPORT (entourer la mention choisie) :

Classe 0 = accès libre

Classe 1 = Confidentiel jusqu'au _ _ _ _ _ _ _ _ _

Classe 2 = Hautement confidentiel jusqu'au _ _ _ _ _ _ _ _ (date de fin de confidentialité)

Date : Nom du signataire : Signature :

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Olivier Arnould et Sandrine Bardet pour leur attention, leur patience, leur aide, le suivi et la qualité de leurs explications qu'ils ont su m'apporter. Je les remercie aussi ici pour le temps qu'ils ont consacré à la relecture de mon rapport de stage.

Je voudrais aussi remercier toute l'équipe Mécanique de l'Arbre et du Bois pour leur accueil, et plus particulièrement Joseph Gril et Bruno Clair pour leur disponibilité à répondre à mes questions et à m'apporter des explications concrètes.

Je remercie aussi les techniciens Gilles Camp et, Alain Clary pour avoir passé autant de temps avec ou sans moi à réaliser les montages d'essais et à préparer les échantillons.

Enfin, je tiens à remercier l'ensemble des services pour leur disponibilité, ainsi que les personnes des autres services ou laboratoires que j'ai pu rencontrer, ces personnes m'ont non seulement bien accueilli, mais se sont intéressés à mon travail et n'ont jamais hésité à répondre à mes questions, en me fournissant aussi des explications supplémentaires, dans le désordre : Vincent Huon (équipe thermomécanique du LMGC), Bertrand Wattrisse (équipe thermomécanique du LMGC), Nadine Amusant (CIRAD), Daniel Guibald (CIRAD).

SOMMAIRE

INTRODUCTION 6

1 Présentation 7

1.1 Projet de recherche 7

1.2 Rôle de chaque partenaire 8

1.3 Objectifs du stage 9

2 Préliminaires 10

2.1 Anatomie de l'arbre et durabilité [Dirol, 2001] 10

2.2 Comportement mécanique du bois [Navi, 1996] 11

2.2.1 Directions principales du bois : 11
2.2.2 Tenseur d'élasticité du bois: 12

2.3 Le panneau OSB 13

2.4 Echantillonnage 15

2.4.1 Nombre et type de panneaux 15
2.4.2 Plan de découpe des panneaux (annexe M) 15
2.4.3 Tri des échantillons 15

3 Conception des montages d'essais et mise au point des manipulations 16

3.1 Traction perpendiculaire 16

3.1.1 Principe 16
3.1.2 Solution retenue 17
3.1.3 Dimensionnement du montage 18
3.1.4 Simulation numérique de l'essai 21
3.1.5 Mise au point de l'essai de traction perpendiculaire : 24

3.2 Essai de compression 25

3.2.1 Principe 25

3.2.2 Mise en place de l'essai 26

3.3 Méthode ultrasonore 33

3.3.1 Principe 33
3.3.2 Mise au point de l'essai 34

3.4 Flexion 4 points [Vincent, 2002] 35

3.4.1 Présentation du banc d'essai 35
3.4.2 Schéma du montage final 36
3.4.3 Mise au point de la manipulation : 36

3.5 Méthode dite du « BING » 37

3.5.1 Principe 37
3.5.2 Mise en place de l'essai 37

3.6 Cisaillement roulant 38

4 Exploitation des résultats 39

4.1 Détermination du module d'élasticité hors plan du panneau 40

4.2 Détermination de la résistance en traction perpendiculaire 41

4.2.1 Etude des résultats 41
4.2.2 Mode de rupture 41

4.3 Détermination des modules élastiques et à rupture en flexion 43

4.3.1 Modules élastiques 43
4.3.2 Contraintes à rupture en flexion 44
4.3.3 Modes de rupture en flexion 44

4.4 Détermination du module élastique et à rupture en cisaillement 46

4.4.1 Etude des résultats du module élastique 46
4.4.2 Etude des résultats du contrainte à la rupture (tableau R.3 et R.4) 46
4.4.3 Mode de rupture 46

4.5 Conclusions de cette série d'essai 48

CONCLUSION 49

BIBLIOGRAPHIE 50

ANNEXES 51

INTRODUCTION

Les matériaux d'ingénierie à base de bois sont très largement utilisés et font l'objet d'un développement constant depuis de nombreuses années. Il s'agit entre autre de tous les panneaux à base de bois que sont les panneaux de particules, les contre-plaqués, les panneaux OSB etc. Les panneaux reconstitués à base de bois (sous forme de fibres, copeaux ou autres) permettent l'exploitation de bois impropre au sciage et la fabrication de produits de qualité constante répondant, selon les besoins, à des caractéristiques spécifiques (usage structural, décoratif et ameublement).

Parmi ces nombreux produits, nous nous sommes intéressés au panneau OSB (*i.e.*, Oriented Strand Board) appelé aussi panneau à lamelles orientées. Il est constitué de grandes lamelles minces, longues et orientées liées entre elles par un collage organique. De part ses propriétés physiques et mécaniques, l'OSB se prête à diverses applications :

- plancher,
- revêtement de toit et de mur,
- parement extérieur, etc.

Ces produits suscitent un engouement croissant non seulement dans les pays industrialisés mais aussi dans les pays émergents. En France, la demande en panneaux OSB augmente en moyenne chaque année de 20%. Il en est de même à l'échelle internationale, la demande d'OSB ne serait-ce qu'au Canada s'élevait à 7 millions de m^3 en l'an 2000.

Ces chiffres justifient à eux seuls les nombreuses recherches qui sont réalisées pour améliorer ce produit. Son principal défaut est qu'il est susceptible d'être attaqué par les agents de dégradation du bois, tels les termites et certains champignons. La solution la plus souvent préconisée consiste à rajouter lors du procédé de fabrication, des biocides d'origine synthétique. Face aux pressions environnementales, la recherche de nouvelles alternatives plus respectueuses de l'environnement et de la santé humaine s'impose.

La solution proposée par le CIRAD pour atteindre de tels objectifs consiste à faire appel aux essences naturellement durables (résistantes aux agents de dégradation du bois). En effet, ces dernières sont riches en composés chimiques appelés extractibles qui peuvent présenter une activité anti-termite.

1 Présentation

Mon travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche appelé *OSB-Biotermicide* dirigé par Nadine Amusant de l'unité de recherche *Production et Valorisation des Bois Tropicaux*, équipe *Durabilité et Préservation des Bois*, du département *Forêt* du CIRAD (Montpellier) en collaboration avec l'équipe *Mécanique de l'Arbre et du Bois* du laboratoire LMGC (Montpellier) et de l'équipe *Physicochimie et Polymères* du laboratoire LERMAB/ENSTIB (Épinal).

1.1 Projet de recherche

Ce projet a pour objectif de concevoir un éco matériau : un panneau OSB à usage structural, résistant aux termites (OSB-Biotermicide) grâce à l'utilisation de lamelles de bois provenant d'espèces naturellement durables.

Les objectifs scientifiques sont les suivants :

- concevoir un éco matériau par le choix d'espèces forestières et de résines adaptées,
- étudier le comportement mécanique du panneau en fonction des proportions de bois durables utilisés et proposer des modèles mécaniques décrivant son comportement,
- caractériser la résistance naturelle du panneau OSB vis-à-vis des termites et des champignons,
- appréhender la dégradation et la résistance mécanique des panneaux par l'utilisation de tests destructifs ou non et proposer des modèles mécaniques tenant compte de la dégradation.

La forte sensibilité des panneaux OSB à l'égard des termites s'explique par le fait que ceux-ci sont fabriqués à partir d'essences de bois non durables comme le pin sylvestre. Les prescripteurs et les utilisateurs de bois sous forme massive ou de composites privilégient les matériaux qui se caractérisent par une durée de vie effective importante. Augmenter la résistance des produits à base de bois à l'égard des termites devient un enjeu de plus en plus important.
L'industrie opte le plus souvent pour l'utilisation de biocides. Cependant, l'utilisation de certaines formulations appliquées après la fabrication du panneau conduit dans certains cas à l'apparition de défauts majeurs (décollage des couches, pertes des propriétés mécaniques dans certains cas). Certains insecticides peuvent même se révéler inefficaces en présence de certaines résines. A cela, il faut rajouter que les matières actives des produits de traitement sont en cours d'évaluation suite à la mise en place d'une directive biocide européenne (European Biocide Products Directive 98/8/CE). Face à ces évolutions, il est indispensable de proposer de nouvelles alternatives, comme l'utilisation d'essences naturellement durables.
Dans le cadre de ce projet, le choix s'est porté dans un premier temps sur deux espèces européennes : le cyprès (*cupressus sempervirens*) et le robinier (*robinia pseudo acacia*)
Le panneau sera constitué à partir d'un mélange de bois durable et non durable (pin sylvestre), ce dernier étant conservé pour des raisons d'ordre économique.

Aussi, le choix des résines entrant dans la composition des panneaux est primordial. En effet, certaines colles sont à l'origine d'émissions de substances toxiques (composés organiques volatils) à l'intérieur des maisons qui nuisent au bien être et à la santé des personnes qui y

séjournent. Cette étude est l'occasion de s'intéresser aux résines d'origine naturelle à base de tanin ou de lignine, développées par le LERMAB.

Cette étude est aussi l'occasion de proposer des critères d'évaluation permettant d'appréhender la résistance des panneaux à l'attaque des insectes. En effet, il existe de nombreuses normes permettant de caractériser les propriétés physico-mécaniques des panneaux mais pas de cadres normatifs définis pour caractériser la durabilité des panneaux vis-à-vis des termites.
En se nourrissant de la cellulose du bois, les termites créent des galeries dans la masse qui entraînent des modifications des propriétés mécaniques et structurales du matériau. De façon générale, la mesure de l'attaque d'un échantillon dégradé par des termites s'effectue à partir d'un système de cotation qui résulte de l'observation visuelle. Cependant ce critère ne reflète pas la baisse effective des propriétés mécaniques. Cette étude pourrait enfin servir de support à la mise au point ou à l'utilisation de techniques sensibles permettant d'évaluer à la fois le niveau de dégradation mais aussi la perte des propriétés mécaniques.

1.2 Rôle de chaque partenaire

L'équipe « Durabilité et Préservation des Bois » du programme Bois du CIRAD (Centre International de Recherches et Développement) de Montpellier est en charge de la gestion (porteur du projet) et de la partie biologique du projet. C'est-à-dire qu'elle étudie tout ce qui se rapproche des termites et de la durabilité des bois utilisés.
L'équipe « Mécanique de l'Arbre et du Bois » du LMGC de Montpellier est chargée des essais mécaniques et de leur interprétation, tant pour s'assurer de la bonne tenue mécanique des produits réalisés que comme moyen de caractérisation de la durabilité.
Le laboratoire « Physicochimie et Polymères » du LERMAB (site ENSTIB à Epinal) est en charge de réaliser les panneaux OSB avec deux types de colles naturelles.

Ce travail de recherche est avant tout exploratoire, cependant il sera aussi effectué en collaboration avec un partenaire industriel : la société ISOROY. Elle est intervenue essentiellement dans la partie *process*. Elle a apporté une participation opérationnelle dans la réalisation des panneaux prototypes en laboratoire. A travers un rôle de conseil, elle s'est assurée que la conception du panneau demeure cohérente par rapport aux exigences industrielles et la demande du marché. Elle est chargée de fabriquer des panneaux prototypes de laboratoire en fonction des produits initiaux utilisés dans l'industrie à savoir l'utilisation de colle urée-formaldéhyde.

Ce projet associe la recherche menée par le LERMAB, le LMGC, le CIRAD et ISOROY. Il offre l'occasion de développer un partenariat autour de la conception de nouveaux produits à base de bois (éco-produit) plus respectueux de l'environnement, sur la base d'interactions fortes entre différents pôles de compétences.

1.3 Objectifs du stage

L'objectif de mon stage a été de mettre en place et de valider des méthodes de caractérisation mécanique des panneaux OSB dans le but de déterminer un maximum de constantes élastiques (*i.e.*, principalement le module d'élasticité hors plan en traction, deux modules d'élasticité en flexion, deux modules d'élasticité en cisaillement) et diverses contraintes à rupture suivant les normes en vigueur (*i.e.*, la contrainte à rupture en traction perpendiculaire, deux en flexion et une en cisaillement). Ces différentes méthodes ont ensuite été appliquées sur une grande batterie de panneaux expérimentaux (différentes proportions d'essence durable et non durable, différentes colles et essences durables) non dégradés. On a ainsi cherché à caractériser mécaniquement les panneaux OSB durables afin de savoir s'ils pouvaient offrir des caractéristiques mécaniques acceptables pour les normes en vigueur. Pour cela, il est nécessaire d'avoir quelques notions sur le matériau bois et sur l'OSB.

2 Préliminaires

2.1 Anatomie de l'arbre et durabilité [Dirol, 2001]

Les arbres produisent naturellement des substances chimiques, souvent appelées extractibles, qui peuvent, pour certaines essences, leur permettre de résister aux attaques de certains insectes ou champignons. C'est le cas du cyprès et du robinier qui sont naturellement durables vis-à-vis des termites, c'est-à-dire qu'ils résistent naturellement, donc sans traitement préalable, à l'attaque de ces insectes. Ces extractibles sont principalement présents dans le duramen, ou bois parfait, de l'arbre (figure 2.1). Il faut savoir que l'arbre est principalement constitué de quatre grandes zones :

- L'écorce.
- Le cambium qui est la partie vivante de l'arbre ; celle qui permet la croissance de l'arbre par la création des nouvelles cellules principalement vers l'intérieur (aubier) et vers l'extérieur (liber). Elle se situe sur la périphérie de l'arbre (sous le liber de l'écorce).
- L'aubier qui est une partie partiellement morte de l'arbre. Il est constitué par les derniers accroissements annuels et il a un rôle de conduction de la sève brute. Lorsque ces accroissements s'éloignent de la partie génératrice de l'arbre, il se produit des phénomènes de transformation important, d'ordre anatomique, physique et chimique (*e.g.*, développement des extractibles). On dit qu'il y a passage par duraminisation du bois fonctionnel dans l'aubier à un bois parfait (duramen).
- Le duramen est une partie morte de l'arbre qui ne joue plus qu'un rôle mécanique structural d'ossature de l'arbre

Ainsi les panneaux sont confectionnés avec des lamelles issues du duramen de cyprès et de robinier pour utiliser leur caractère naturellement durable vis-à-vis des termites.

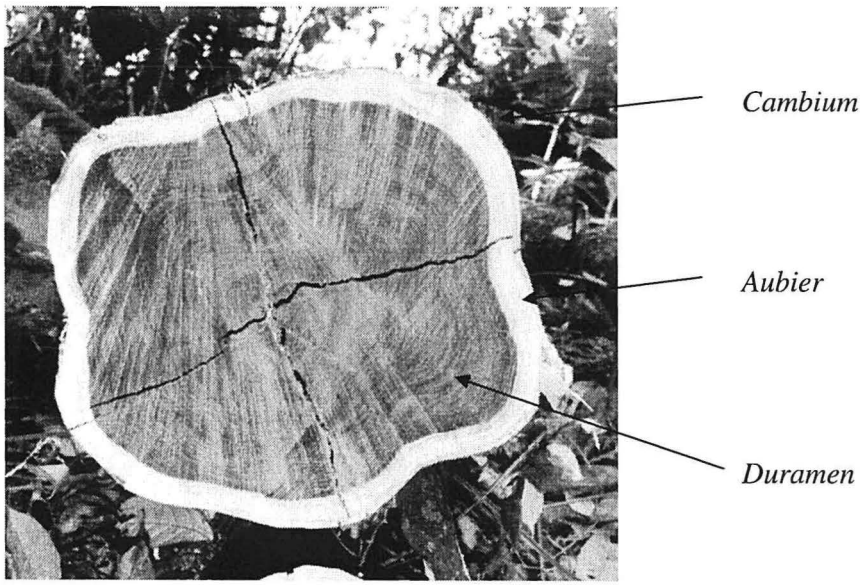


Figure 2.1. *Coupe transversale de Boco [BEAUCHENE].*

2.2 Comportement mécanique du bois [Navi, 1996]

De part sa structure végétale complexe et sa croissance, le bois est un matériau possédant des caractéristiques mécaniques très différentes des autres matériaux. Il convient ainsi d'avoir quelques notions sur le comportement mécanique du bois, à l'échelle centimétrique ou millimétrique, pour pouvoir analyser au mieux, par la suite, les caractéristiques des panneaux OSB.

2.2.1 Directions principales du bois :

On observe dans le bois trois directions principales : longitudinale (*L*), tangentielle (*T*) et radiale (*R*) (figure 2.2).

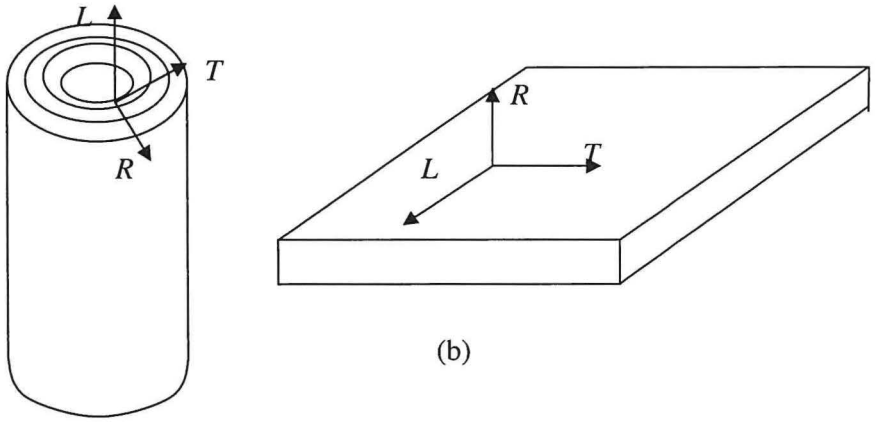


Figure 2.2. *Système local de coordonnées dans la matière : (a) cernes annuels et système de coordonnées naturelles locales d'un billon ; (b) orientation du repère dans une lamelle de bois obtenue par déroulage et constituant le panneau OSB.*

Lors de sa croissance, l'arbre développe une structure organisée pour résister aux sollicitations naturelles et à son propre poids. On observe ainsi un comportement orthotrope cylindrique.

Dans la direction longitudinale, *L*, le module élastique et la résistance mécanique du bois sont très importants devant les caractéristiques des directions transverse, *T*, et radiale, *R*. Le comportement mécanique est aussi meilleur dans la direction radiale que tangentielle.

En faisant abstraction de défauts comme les nœuds ou des variations de croissance, on peut considérer le bois comme un matériau localement orthotrope cylindrique, les plans de symétrie étant alors les plans *RT* et *LR* et les directions d'orthotropie *L*, *R* et *T*.

2.2.2 *Tenseur d'élasticité du bois:*

La loi de comportement mécanique reliant la déformation d'un matériau élastique linéaire à la contrainte peut s'écrire sous la forme (notation de Voigt) :

$$\{\varepsilon\}=[S]\{\sigma\}, \tag{1}$$

où $\{\varepsilon\}$ est le vecteur des composantes du tenseur des déformations, [S] est la matrice des souplesses et $\{\sigma\}$ le vecteur des composantes du tenseur des contraintes.

La matrice des souplesses du bois, orthotrope, est donnée dans le repère local (R, T, L) par (matériau orthotrope) :

$$[S]=\begin{bmatrix} \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{LT}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{bmatrix}, \tag{2}$$

avec E_R, E_T, E_L, les modules d'élasticité correspondant aux directions R, T, L.

G_{TL}, G_{RL}, G_{RT}, les modules de cisaillement correspondant aux plans TL, RL, RT.

ν_{RL}, ν_{TL}, ν_{LT}, ν_{TR}, ν_{LR}, ν_{RT}, les coefficients de Poisson.

La matrice des complaisances est symétrique, ainsi :

$$\frac{\nu_{rt}}{E_r}=\frac{\nu_{tr}}{E_t}, \frac{\nu_{rl}}{E_r}=\frac{\nu_{lr}}{E_l}, \frac{\nu_{tl}}{E_t}=\frac{\nu_{lt}}{E_t}. \tag{3}$$

Par conséquent, on voit que les propriétés élastiques du bois sont définies totalement par 9 paramètres E_R, E_T, E_L, G_{TL}, G_{RL}, G_{RT}, ν_{RL}, ν_{TL}, ν_{RT}.

Il faut préciser également que le bois est un matériau viscoélastique, ses propriétés mécaniques vont dépendre de la vitesse de déformation à laquelle le bois va être soumis. Il sera bon de faire des essais à différentes vitesses pour vérifier que la viscosité n'influence pas, ou peu, les valeurs obtenues.

Enfin, le comportement du bois varie en fonction de la température (c'est un polymère) et du taux d'humidité (le bois absorbe l'eau). Nos essais seront donc réalisés à température et hygrométrie contrôlée standards : 20°C et 65% d'humidité relative (correspond à 12% d'humidité dans le bois).

2.3 Le panneau OSB

Le panneau OSB est un panneau composé de lamelles orientées de bois, liées entre elles par des colles ou résines. Il est généralement constitué de trois couches distinctes de bois :

- ♥ Deux couches extérieures identiques,
- ♥ Une couche intérieure dont les lamelles sont orientées à 90° par rapport à celles des couches externes. Le croisement des couches permet ainsi de limiter les variations géométriques du bois dues aux variations d'humidité.

La fabrication industrielle d'un panneau OSB suit globalement le processus suivant (figure 2.3) [CWC (Canadian Wood Council) , 2006] :

- ♦ Les grumes conditionnées sont écorcées puis déchiquetées en petites lamelles.
- ♦ Les lamelles sont ensuite triées par taille (on supprime celles qui sont trop petites) puis séchées pour obtenir un taux d'humidité compris entre 3 et 7%.
- ♦ Les lamelles de bois sont ensuite encollées.
- ♦ Puis elles sont disposées de manière à constituer des matelas superposés de lamelles orientées suivant le type de la couche (externe ou interne).
- ♦ Enfin, les lamelles sont pressées (de 30 à 10 kg/cm²) et chauffées (170°C pendant 3min20s) pour former le panneau final.

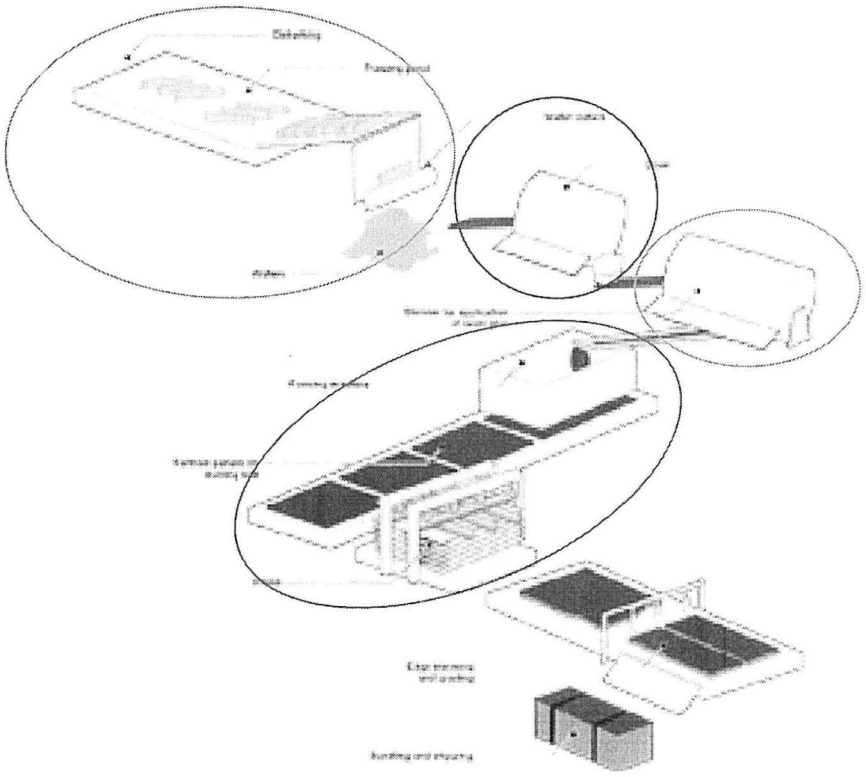


Figure 2.3. *Processus de fabrication d'un panneau OSB [CWC, 2006] (légende de couleurs dans le texte).*

Remarque : Les panneaux que nous avons testés ont été réalisés à la main. Les lamelles ont été découpées dans des billons de bois déroulés à l'ENSAM de Cluny et font 100*15*0,6mm. Elles ont été également purgées de tout défaut comme les nœuds. L'orientation de celles-ci dans les panneaux est très bonne (meilleure que dans un panneau industriel). Le pressage a été réalisé à une pression de 28kg/cm² pour une température de 195°C. La masse volumique recherchée était de 700kg/m^3.

On notera également que les panneaux OSB sont constitués, certes de bois, mais aussi de colle. Le comportement mécanique d'un panneau sera donc très différent de celui du bois brut non seulement à cause de la colle mais aussi en raison de l'orientation des lamelles. On parlera ainsi de direction 'hors plan' pour la direction perpendiculaire au plan du panneau et longitudinale ou transverse pour les directions dans le plan du panneau ; la direction longitudinale correspondant à la direction L moyenne des lamelles des couches externes et la direction transverse correspondant à la direction T moyenne des lamelles des couches externes (figure 2.4).

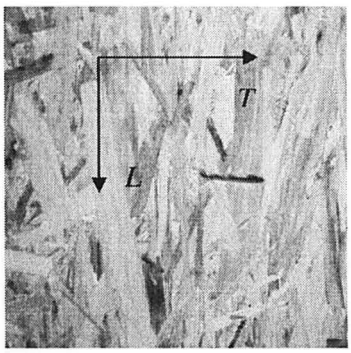


Figure 2.4. *Axes principaux d'un panneau OSB.*

Les essais que nous avons réalisés nous ont permis de mesurer ou estimer les modules d'élasticité (3) et de cisaillement (2). On n'a pas d'information sur les coefficients de poisson. Les autres informations obtenues nous permettront d'étudier plus finement l'influence des dégradations des termites sur le comportement mécanique.
On a ainsi réalisé six essais différents pour mesurer cinq modules d'élasticité et quatre contraintes à la rupture.

2.4 Echantillonnage

2.4.1 Nombre et type de panneaux

On dispose de 3 panneaux par mélange d'essence avec un type de colle donné. Les panneaux diffèrent les uns des autres par leur composition en essence de bois mais aussi par les types de colles employées :

- colle à base de tanin,
- colle à base de lignine,
- colles synthétiques standards : MUF (mélanine-urée-formol) pour les couches externes et PMDI (base isocyanate) pour la couche interne).

Le principe consiste à mélanger une essence de bois durable (cyprès ou robinier) avec une essence de bois non durable (pin sylvestre). Suivant les panneaux la proportion de chaque espèce varie. On aura également des panneaux dit de référence, composés uniquement d'une seule espèce.

Les panneaux ont été fabriqués par deux sites différents :

- ENSTIB,
- Isoroy.

La composition des panneaux est décrite en annexe A.

Ainsi on dispose de 42 panneaux fabriqués par l'ENSTIB et de 9 panneaux fabriqués par Isoroy, soit au total 51 panneaux de 17 compositions différentes.

2.4.2 Plan de découpe des panneaux (annexe B)

Les éprouvettes seront taillées dans les panneaux, par le CIRAD, suivant le plan d'échantillonnage visible en annexe B.

Les éprouvettes carrées serviront pour les essais de traction perpendiculaire et de cisaillement alors que les éprouvettes rectangulaires seront utilisées pour les tests de flexion.

Remarque : En raison du croisement des couches, les éprouvettes carrées sont découpées à 45° pour ne privilégier aucun sens des lamelles. De même, il est nécessaire de réaliser une éprouvette de flexion dans chaque sens des fibres du bois du panneau pour obtenir les modules de flexion dans les deux directions.

2.4.3 Tri des échantillons

Chaque échantillon est pesé et mesuré afin de pouvoir déterminer sa densité. Pour calculer de manière la plus précise possible cette densité, les mesures seront prises avec une balance au milligramme et un pied à coulisse électronique au centième de millimètre reliés à un ordinateur avec une saisie automatique des valeurs. Ces mesures ont été réalisées au CIRAD.

Les échantillons sont conditionnés et poncés avant d'être mesurés pour obtenir des valeurs relativement peu dispersées sur un même échantillon.

Lorsque nous ferons nos tests, nous comparerons les résultats obtenus pour des échantillons de densité voisine. En effet, nous nous sommes aperçu que dans un panneau, la densité n'était pas la même dans toutes les zones. Pour améliorer la pertinence de nos résultats on a choisi de classer les échantillons par densité (annexe C).

3 Conception des montages d'essais et mise au point des manipulations

3.1 Traction perpendiculaire

Le montage est inspiré de la norme AFNOR EN 319 [1993]. L'idée principale du montage a été reprise et modifiée pour qu'il puisse être utilisé sur toutes les machines de traction dont nous pouvions disposer. Cet essai nous a permis de déterminer la résistance à la rupture en traction perpendiculaire d'un panneau OSB.

3.1.1 Principe

On dispose d'éprouvettes carrées de 50mm de côté [EN319, 1993] découpées dans les panneaux d'essai (*cf.* paragraphe 2.4) de 15mm d'épaisseur. Sur chaque face de l'éprouvette on vient coller des plaques métalliques à l'aide d'une colle polyuréthane bi-composant (figure 3.1). On vient ensuite exercer un effort de traction sur ces plaques et on mesure l'effort à rupture de l'échantillon qui permet de remonter à la résistance à la rupture en traction perpendiculaire.

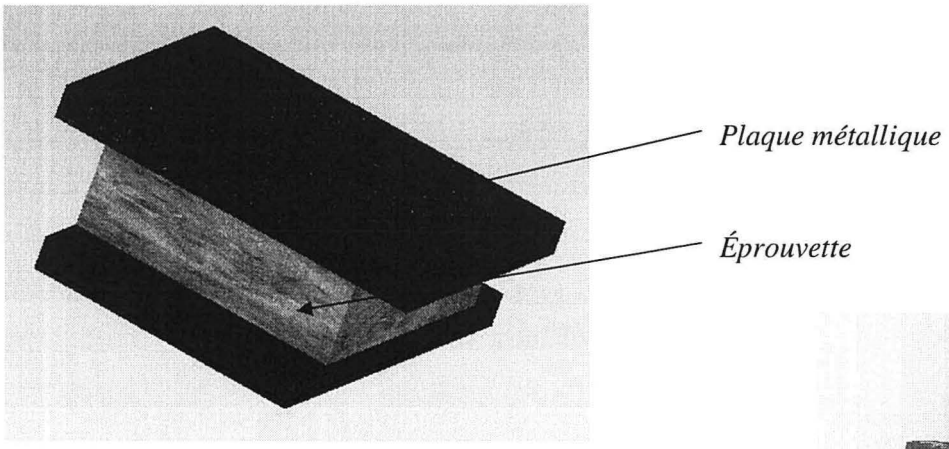


Figure 3.1. *Eprouvette d'essai.*

Pour exercer cet effort, on réalise deux mors dont un monté sur rotule (figure 3.3). Cette rotule permet de solliciter au maximum l'éprouvette en traction, sans cisaillement parasite, même si le montage n'est pas parfaitement positionné sur la machine. Pour lier ce montage à la machine de traction, nous avions deux solutions :

- Soit nous réalisions un montage se fixant directement sur le bâti de la machine (figure 3.2). Remarque : On verra dans le paragraphe 3.1.4, l'intérêt de croiser ou pas les plaques de traction.

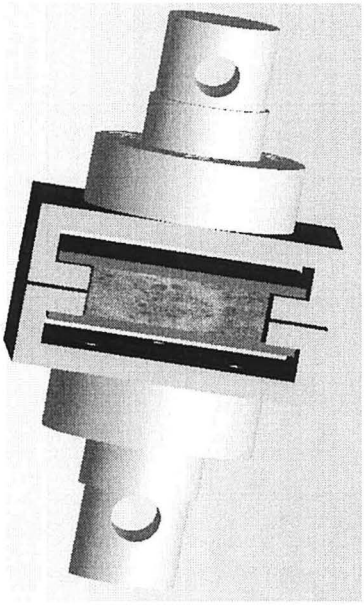


Figure 3.2. *Fixation sur le bâti de la machine.*

❖ Soit nous réalisions un montage pouvant se monter dans les mors classiques de traction d'une machine (figure 3.3).

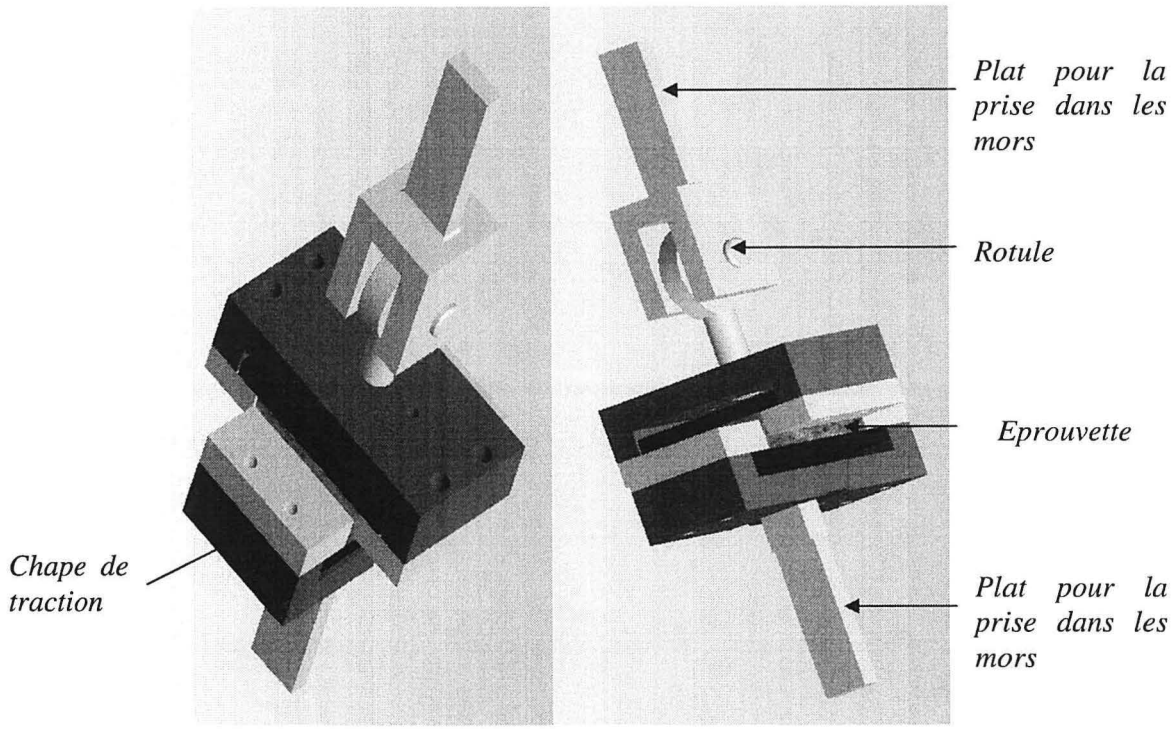


Figure 3.3. *Fixation sur des mors de traction.*

3.1.2 Solution retenue

La deuxième solution présente l'avantage d'être adaptable sur n'importe quelle machine de traction par l'intermédiaire de ses mors, alors que la première solution ne peut se monter que sur la machine pour laquelle le montage a été réalisé. Etant donné que nous ne savions pas lors de la réalisation du montage sur quelle machine nous réaliserions nos essais (à cause de la capacité de charge de la machine) nous avons préféré le second montage, beaucoup plus polyvalent et simple à réaliser.

Nota : Toutes les pièces ont été réalisées par l'atelier du LMGC sauf la rotule qui fut achetée dans le commerce.

3.1.3 Dimensionnement du montage

- *Le collage des plaques* est réalisé avec une colle bi-composants polyuréthane. Le choix du collage des échantillons sur les plaques métalliques présentait un risque majeur : la rupture en traction aurait pu se produire dans le joint de colle et non dans le bois. Des essais préalables ont permis de vérifier que le joint de colle était suffisamment résistant et que la rupture avait bien lieu dans l'épaisseur du panneau.

- *Résistance des plaques supportant les échantillons :* ces plaques sont soumises à des contraintes de cisaillement et de flexion. On les dimensionne en tenant compte uniquement de la contrainte la plus critique : le cisaillement. On modélise le problème comme illustré sur la figure 3.4.

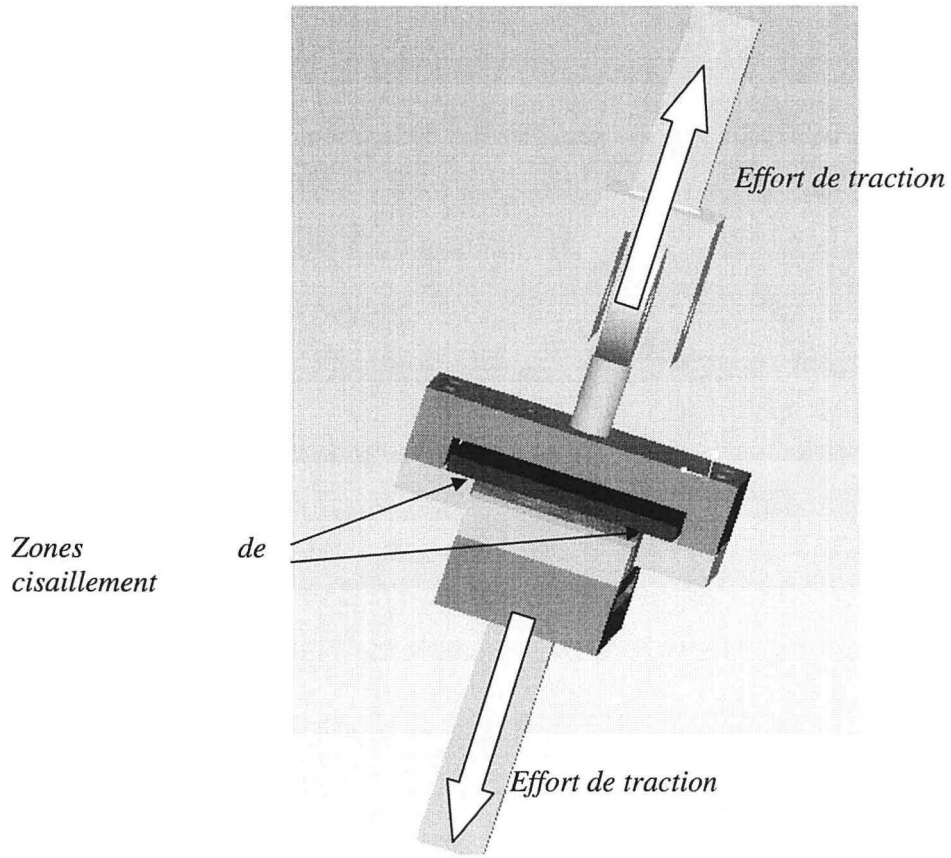


Figure 3.4*. Modélisation d'une des plaques métalliques.*

Pour une première estimation des efforts de rupture mis en jeu, j'ai utilisé les données fournies par la norme EN 300 [1997]. Celle-ci donne une valeur maximale pour des panneaux de classe 4, les plus résistants, de résistance à la traction d'environ 1125N pour une section de 50*50mm². Afin d'estimer en première approche, la valeur de rupture d'un échantillon, j'ai choisi un coefficient de sécurité égal à 5 pour couvrir les nombreuses incertitudes et approximations de calcul. En effet, la valeur de la résistance utilisée est théorique, et on ne savait pas à l'avance à quelle charge résisterait un panneau OSB : les

valeurs pour les échantillons du projet seront probablement très différentes des valeurs d'un panneau du commerce en raison des essences de bois et des colles utilisées qui sont différentes. Pour mes calculs, j'ai donc utilisé un effort de traction maximum d'environ 6000N.
Les plaques sont réalisées en acier E235, soit une limite d'élasticité $R_e = 235MPa$. Ainsi le cisaillement maximal admissible sans plastification est de $\tau_{max} = 0,5*R_e = 117MPa$ (critère de Tresca).
On cherche à connaître l'épaisseur minimale que devront faire les plaques en acier pour résister aux efforts mis en jeu. Pour cela, on assimile les plaques à des poutres. On utilise les formules de la théorie des poutres RdM (cette hypothèse est grossière mais elle nous permet néanmoins d'obtenir un ordre de grandeur de l'épaisseur acceptable au vu des marges de sécurité que l'on s'octroie) en supposant donc la répartition de la contrainte de cisaillement constante dans l'épaisseur de la plaque.
Par conséquent, la contrainte de cisaillement moyenne dans la zone la plus sollicitée :

$$\tau = s * \frac{F}{S}, \tag{4}$$

avec F l'effort de cisaillement, s un coefficient de sécurité pris égal à 5 et S la surface cisaillée : $S = 2 * 50 * e$ où la largeur de la plaque métallique est de 50mm. On obtient alors :

$$e > \frac{5 * F}{2 * 50 * \tau}. \tag{5}$$

Soit **e > 2,56 mm**

On choisira des plaques de 5mm d'épaisseur pour augmenter leur rigidité et par conséquent diminuer leur flexion sous charge. On verra au paragraphe 3.3.3 que la flexion des plaques influe beaucoup sur la répartition des contraintes dans l'échantillon. Cette valeur a aussi été choisie pour des raisons pratiques : les plaques seront ainsi taillées dans du plat métallique de 50*5 mm². Cette épaisseur présente aussi l'avantage d'être encore facilement sciable avec les machines de l'atelier du LMGC.

- *Dimensionnement des chapes de traction :* n'étant pas limité par l'encombrement, le système pourra sans aucun problème être très massif. Afin d'obtenir une grande rigidité des chapes, celles-ci seront réalisées en acier et on leur donnera de forte épaisseur, 12mm en moyenne, pour supporter au mieux les contraintes de traction, mais surtout de flexion/cisaillement en cours d'essai.
  Afin de vérifier le montage et avoir une idée de ses déformations au cours d'un essai, nous l'avons modélisé sous Pro-Engineer (version Wildfire 2.0) et ses déformations sous charge ont été calculées par la méthode des éléments finis dans le logiciel Pro-Mechanica. Pour réaliser les calculs, l'effort mis en jeu lors de la simulation a été pris égal à 6000N afin de se ménager encore une fois une marge de sécurité vis-à-vis des incertitudes de calcul et des hypothèses simplificatrices faites pour pouvoir modéliser le montage.
  Après avoir dessiné la chape sous Pro-Engineer, un module permet de basculer sous Pro-Mechanica. Une fois dans ce logiciel de calcul, on commence par mettre en place les efforts sur la chape et les conditions aux limites en déplacement, illustrées sur la figure 3.5. On a choisi de concentrer les efforts, dans la direction de traction uniquement, sur les arêtes de la chape (flèches en jaunes) ce qui représente le cas le

plus défavorable de calcul. Dans la réalité, les efforts se répartiront sur la surface de contact entre les plaques métalliques et les chapes. On s'attendra donc à avoir des contraintes dans le matériau, plus importantes que dans la réalité. Le blocage de tous les déplacement ont été placées au niveau du plat de traction (en bleu) dont la liaison est supposée être un encastrement parfait avec la chape de traction.

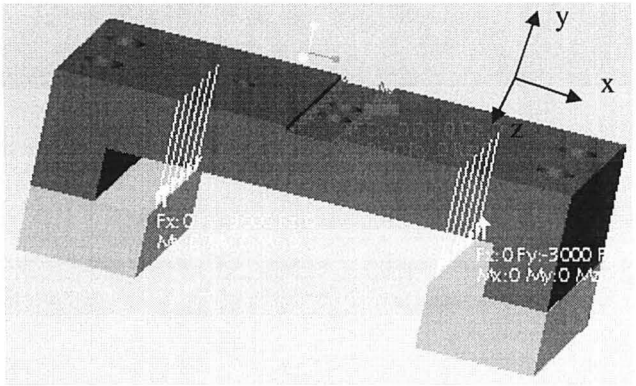


Figure 3.5. *Mise en place des conditions aux limites.*

On affecte ensuite un matériau aux pièces (dans notre cas, on utilise l'acier pré-rentré dans les banques de données de Pro-Mechanica ayant un module de Young de 200 GPa et une résistance élastique R_e de 220MPa proche de l'acier de construction mécanique utilisé).
Pro-Engineer maille automatiquement le volume et il est très difficile de modifier ses critères de maillage. Par contre, lors du calcul on peut choisir les critères de convergence et le degré maximal du polynôme d'interpolation des déplacements. On a choisi de faire converger les calculs suivant l'énergie de déformation, qui permet de tenir compte des contraintes et des déformations dans la pièce, à moins de 10%. Pour cela, le degré maximum du polynôme d'interpolation est fixé à 9 (degré maximum possible proposé par Pro-Engineer) ; c'est-à-dire que Pro-Engineer pourra utiliser un polynôme d'interpolation de degré 9 pour obtenir une convergence du calcul de l'énergie de déformation inférieure à 10%.

On s'intéresse à la contrainte de von Mises pour valider le montage. Celle-ci doit être inférieure à la limite élastique de l'acier.

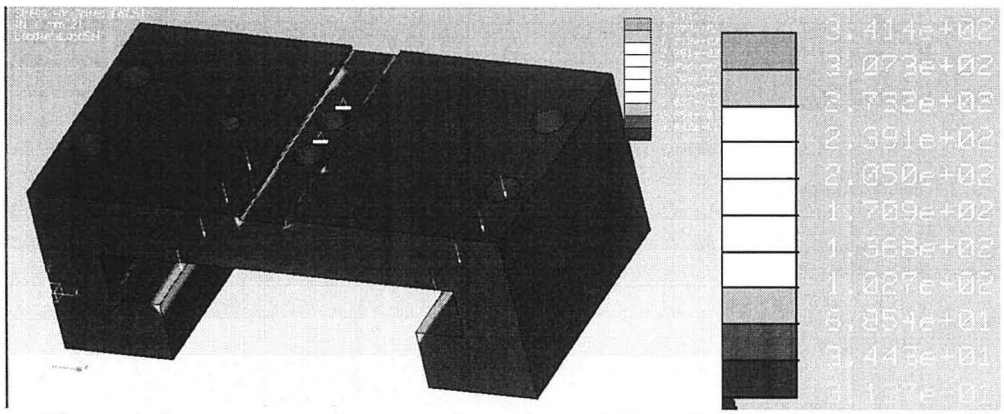


Figure 3.6. *Répartition des contraintes de von Mises dans la pièce (en MPa).*

On peut voir sur la figure 3.6 que la contrainte maximale de von Mises au sein de la pièce est de l'ordre 200MPa dans les zones où les efforts sont appliqués. Il est à noter que ceci est juste une simulation et que dans la réalité, les efforts ne seront pas si localisés. On pourra donc s'attendre à avoir des contraintes moins élevées dans ces zones.
Quoi qu'il en soit la contrainte maximale de von Mises est inférieure à la limite élastique d'un facteur de 1,1 en plus du coefficient de sécurité de 5, donc le dimensionnement semble correct.

- *Choix de la rotule de traction :* la rotule est un embout de vérin rotulé choisi dans le catalogue du constructeur *Michaud-Chailly.* Elle doit pouvoir supporter un effort de traction de 6000N en charge statique (vu les vitesses de déplacement, on peut considérer que le chargement est quasi statique). La rotule choisie supporte une charge de 24000N et à un diamètre de tige filetée M12.

3.1.4 Simulation numérique de l'essai

Nous avons modélisé le système de traction sous Pro-Engineer et Pro-Mechanica afin de simuler son comportement lors d'un essai et d'observer la répartition des contraintes dans une éprouvette de bois massif (Robinier). On a imposé un déplacement de 0,015mm (correspondant à la flèche des plaques soumises au chargement de 6000N), suivant y, des surfaces des plaques métalliques repérées sur la figure 3.7. Les conditions de calcul sont les mêmes que dans le paragraphe 3.1.3.

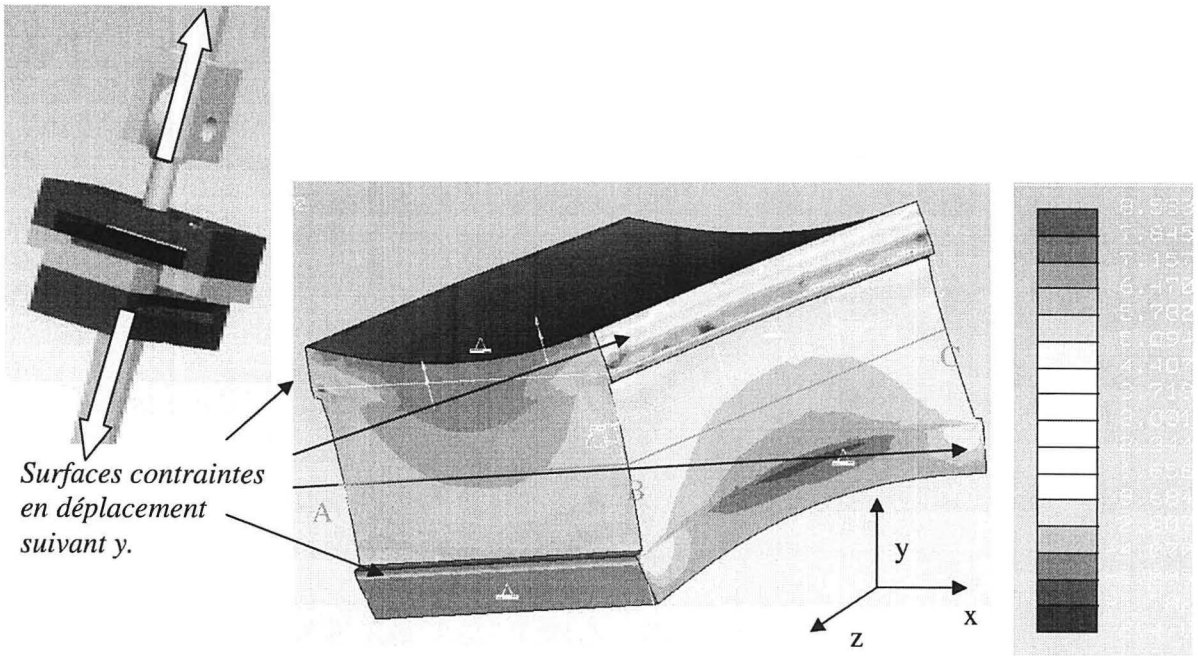


Figure 3.7. *Répartition des contraintes σ_{yy} sur un échantillon (en MPa).*

➢ *Validation du calcul :*

On cherche à estimer la contrainte moyenne de traction présente dans l'éprouvette numérique pour pouvoir la comparer à la contrainte moyenne qui serait normalement présente si le champ de traction était uniforme : $\sigma_{yy} = \frac{F}{S}$. Pro-Mechanica ne nous permet pas de calculer la contrainte moyenne sur une section de l'éprouvette ; cependant on peut calculer la contrainte moyenne sur le périmètre d'une section (figure 3.8). On voit ici l'intérêt d'avoir croisé les plaques de traction. La répartition des contraintes est ainsi similaire sur les quatre faces de l'éprouvette. Les différences de contraintes que l'on peut néanmoins observer sont dues à l'anisotropie du matériau, les sections les plus contraintes étant celles correspondant au sens L.

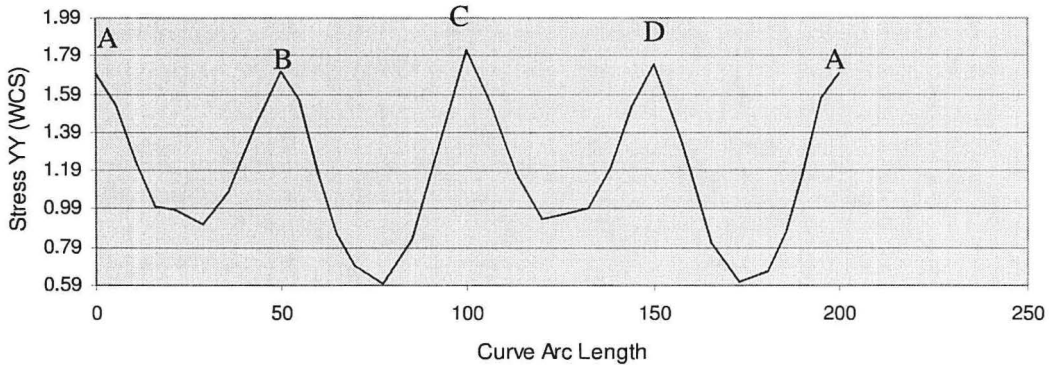


***Figure 3.8**. Répartition des contraintes de traction σ_{yy} (en MPa) sur le périmètre d'une section (ABCD) (figure 3.7).*

A partir de cette valeur et de la forme de la répartition de contrainte à l'intérieur de l'éprouvette, on pourra vérifier la cohérence de nos résultats.
Sur le périmètre d'une section de l'éprouvette, on a une contrainte moyenne de traction de σ_{moy}=1,3MPa.
Comme montré sur la figure 3.9, la contrainte est maximale sur les bords de la section et diminue au fur et à mesure que l'on se rapproche du centre. On peut donc penser que la contrainte moyenne sur la surface sera inférieure à la contrainte moyenne sur le périmètre.

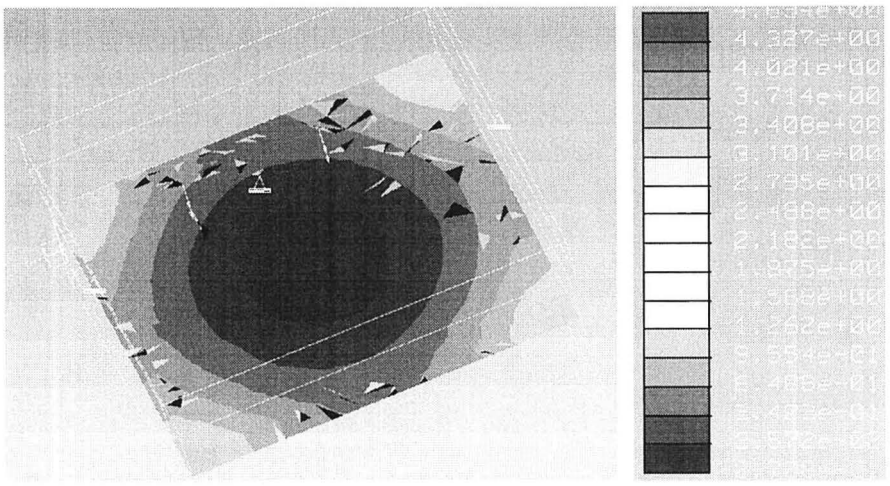


Figure 3.9. *Répartition des contraintes de traction σ_{yy} sur une section moyenne de l'éprouvette (en MPa).*

Si la contrainte de traction avait été uniforme, elle aurait été égale à la contrainte moyenne suivante :

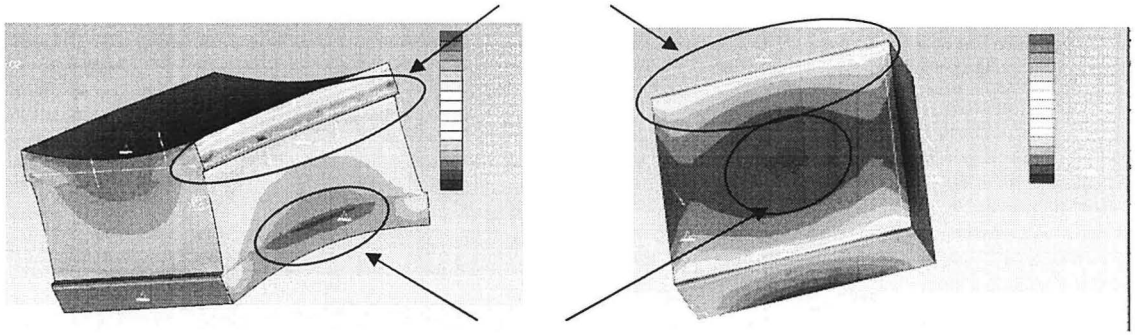
$$\sigma_{moy}^{th} = \frac{F}{S} = \frac{3000}{2500} = 1{,}2MPa\,. \qquad (6)$$

On a donc $\sigma_{moy}^{th} < \sigma_{moy}$.

La contrainte moyenne sur le périmètre est donc supérieure à la contrainte moyenne théorique. Comme la contrainte moyenne sur la surface est inférieure à cette valeur, les résultats obtenus semblent cohérents et le modèle numérique semble acceptable.

➢ *Analyse du champ de contrainte dans l'éprouvette :*

Zone de traction



Zone de compression

Figure 3.10. *Répartition des contraintes σ_{yy}. L'échelle des contraintes dans la figure de gauche est la même que celle de la figure 3.7. Sur la figure de droite, la valeur minimale vaut -0,4 MPa et la valeur maximale vaut 5 MPa.*

La flexion des plaques entraîne une répartition du champ de contrainte de traction σ_{yy} non uniforme dans l'éprouvette. En effet, on peut voir sur la figure 3.10 qu'il y a une zone dans laquelle les plaques exercent de la compression sur l'échantillon et une zone où elles exercent de la traction. Cette répartition de contrainte semble relativement néfaste pour l'essai, en ce sens qu'elle créé des zones privilégiées de rupture là où la contrainte de traction est maximale et qu'elle perturbe la rupture dans les zones en compression.
Aussi, le champ de contrainte donné par le calcul est très différent de celui qui est réellement présent dans les éprouvettes de panneau OSB. En effet, pour les calculs numériques, on a considéré l'éprouvette comme du bois massif, ne connaissant pas encore les caractéristiques mécaniques de l'OSB. Le panneau OSB ayant un comportement très spécifique, il serait dangereux d'extrapoler directement les résultats obtenus sur le bois massif à l'OSB. De plus, il y a, entre l'éprouvette et les plaques métalliques, un joint de colle dont on ne connaît ni les propriétés (visco) élastiques ni la géométrie exacte. Cependant, on peut supposer que si la répartition de contrainte est très hétérogène dans le bois massif, elle le sera aussi dans le panneau OSB. Ainsi la valeur à rupture obtenue par les essais de traction perpendiculaire est une valeur moyenne. C'est-à-dire que localement, la contrainte de rupture à la traction pourra être plus élevée que celle calculée comme l'on montré les calculs numériques.

3.1.5 Mise au point de l'essai de traction perpendiculaire

Des essais préliminaires ont été réalisés sur des éprouvettes taillées dans un panneau OSB du commerce (classe 2). Au cours de ces essais, on a donc essayé d'améliorer la répartition du champ de contrainte en remplaçant les plaques métalliques par des profilés en 'I' (annexe D), permettant de mieux répartir les contraintes de traction dans l'éprouvette.
Les essais réalisés avec les deux dispositifs ont donnés des valeurs de rupture similaires dans les deux cas : les éprouvettes sollicitées par les profilés cassent à 1500N et celles sollicitées par les plaques métalliques à 1400N. Ces valeurs sont en accord avec la norme EN300 qui donne des valeurs minimales de rupture à la traction perpendiculaire de 1125N pour une éprouvette de 50*50mm². On choisira donc en définitif, pour des raisons de simplicité, de coût et de délais, de réaliser les essais avec des plaques métalliques même si le champ de contrainte est théoriquement très hétérogène. De plus, cet essai est normalisé et donc approuvé par les services de certification.

Ces essais ont, enfin, permis de déterminer la vitesse de déplacement de la machine pour rompre l'échantillon en 60±30s [EN 319, 1993]. On vérifie bien en même temps que le montage d'essai se comporte comme prévu lors d'un test : rupture de l'échantillon dans son épaisseur et pas dans la colle, placement de l'éprouvette au mieux sur les chapes de traction pour que le contact entre les plaques métalliques et le système de traction soit le plus uniforme possible, déformations en flexion des pièces métalliques…

En raison de la faible rigidité du système de traction, on ne peut pas mesurer un module d'élasticité avec cette méthode (*cf.* paragraphes 3.2 et 3.3) c'est pourquoi la mesure du module d'élasticité hors plan a été réalisée par un essai de compression.

3.2 Essai de compression

L'essai de traction perpendiculaire que nous avons réalisé ne permet pas de calculer avec suffisamment de précision le module d'élasticité hors plan du panneau en raison de l'imprécision de la mesure de déformation moyenne de l'éprouvette et de la répartition des contraintes dans l'échantillon (*cf.* paragraphe 3.1.4). C'est pourquoi nous avons choisi de réaliser des essais de compression. Cet essai a pour but de déterminer le module d'élasticité hors plan d'un panneau OSB. Pour cela, il a fallu pouvoir relier la déformation moyenne d'un échantillon à la contrainte moyenne durant l'essai. Ceci a posé certains problèmes que l'on a cherché à résoudre en suivant la démarche suivante.

3.2.1 Principe

On dispose d'éprouvettes carrées de 50 mm de coté et de l'épaisseur du panneau. On vient appliquer par l'intermédiaire de plateaux de compression un effort sur l'éprouvette, comme illustré sur la photo suivante (figure 3.11).

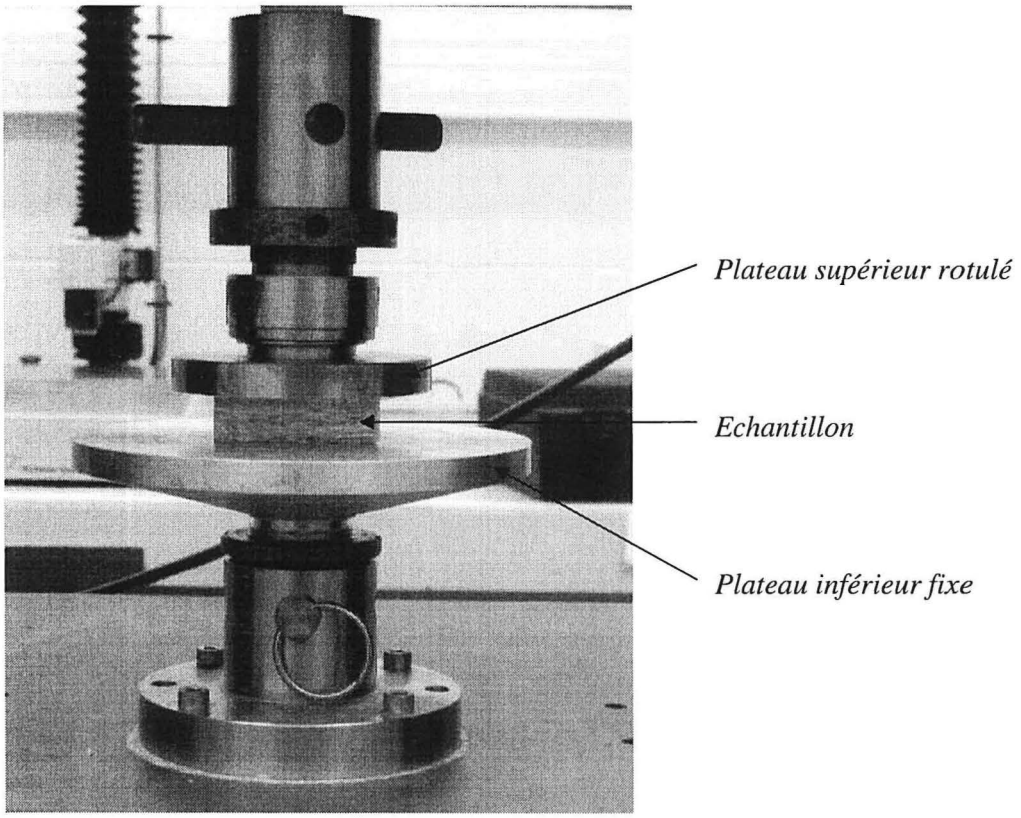


Figure 3.11. *Essai de compression.*

On notera aussi, que le plateau supérieur est monté sur une rotule pour compenser les éventuels défauts de parallélisme qu'il pourrait y avoir entre les deux faces d'appui de l'éprouvette. On a ainsi une répartition des efforts plus homogène sur les surfaces chargées.

3.2.2 *Mise en place de l'essai*

On dispose pour notre essai, d'une machine de traction MTS pilotée par un ordinateur avec son logiciel d'acquisition de données. La cellule d'effort dont nous disposons nous permet de monter jusqu'à 5000N.
On cherchera à obtenir les valeurs de déformation de l'échantillon en fonction des efforts appliqués sur l'éprouvette afin d'en déduire le module d'élasticité hors plan du panneau OSB. Pour cela, on a envisagé plusieurs solutions de mesure de déplacements (annexe E).

3.2.2.1 Essai simple sur échantillon de bois massif

Pour valider cet essai, nous réalisons en premier lieu, des essais de compression sur des éprouvettes de bois massifs de 40*40*10 mm dont le module d'élasticité transversal est parfaitement connu (mesure préalable par méthode ultrasonore [Balme, 2005]).
Il est à noter que ce bois est celui qui a servi à faire les panneaux OSB. On teste une éprouvette de cyprès dans le sens radial et une éprouvette de pin sylvestre dans le sens tangentiel (tableau 3.1).
On mesure les efforts de compression mis en jeu grâce au capteur de force de la machine ainsi que la déformation transversale moyenne, mesurée pour des questions de simplicité par l'intermédiaire du capteur de déplacement interne de la machine de traction (annexe E). La valeur de déplacement mesuré correspond donc au déplacement de l'échantillon de bois et de la machine (y compris les plateaux et le capteur de force) :

$$u_{total} = u_{échantillon} + u_{machine} . \qquad (7)$$

L'essai se déroule de la manière suivante :

- on comprime l'échantillon à vitesse constante (v = 2µm/s) jusqu'à 3500N. La vitesse est choisie de manière à avoir une vitesse de déformation faible pour rester dans un essai quasi statique et minimiser les phénomènes visqueux. La charge maximale atteinte a été choisie de manière arbitraire et exploratoire.
- on réalise ensuite une décharge toujours à vitesse constante jusqu'à 10N.

On obtient ainsi une courbe de déformation moyenne en fonction de la contrainte de compression moyenne dans l'échantillon comme présentée sur la figure 3.12. On observe un phénomène d'hystérésis entre la courbe de charge et la courbe de décharge, que l'on tentera d'expliquer plus loin.

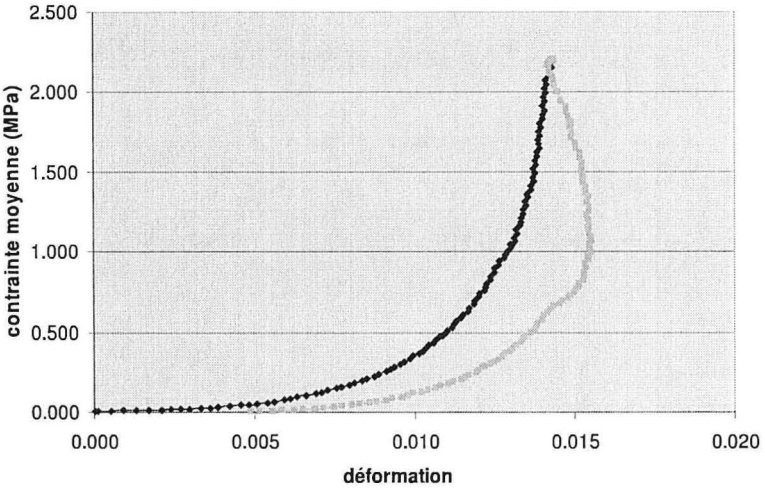


Figure 3.12. *Courbe de compression type.*

Pour connaître la part du déplacement due à l'échantillon, il nous faut connaître le déplacement propre à la machine. Pour cela, on réalise un essai plateau de compression contre plateau de compression, donc sans éprouvette, comme illustré sur la figure 3.13.

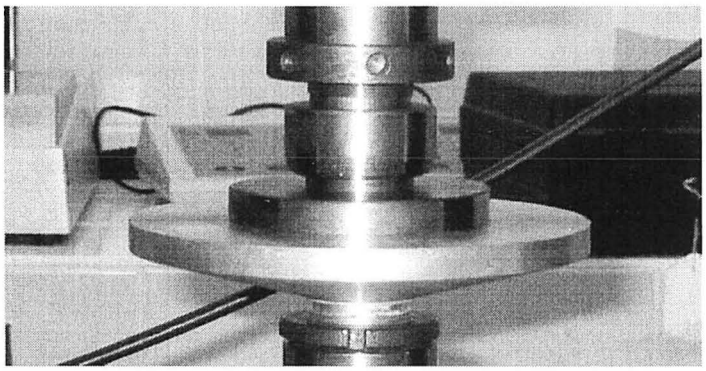


Figure 3.13. *Essai plateau contre plateau.*

Remarque : Le déplacement maximal enregistré est de l'ordre de 0,3mm pour 3500N. Cette valeur n'est pas du tout négligeable devant l'ordre de grandeur des déplacements mesurés au cours d'un essai avec une éprouvette (0,6mm pour 3500N). Il est donc indispensable de tenir compte de la déformation de la machine.

On enregistre les données de l'essai plateau contre plateau pour en extraire une courbe de déplacement, en fonction de l'effort appliqué, propre à la machine. A partir de là, une macro développée sous *Excel* par Joseph Gril nous permet d'obtenir par interpolation polynomiale la valeur exacte du déplacement de la machine pour un effort donné, si on connaît la courbe de déformation de la machine en compression. On peut maintenant en déduire le déplacement et donc la déformation moyenne de compression de l'échantillon de bois. Les courbes de compression avec ou sans la correction de la machine sont comparées sur la figure 3.14.

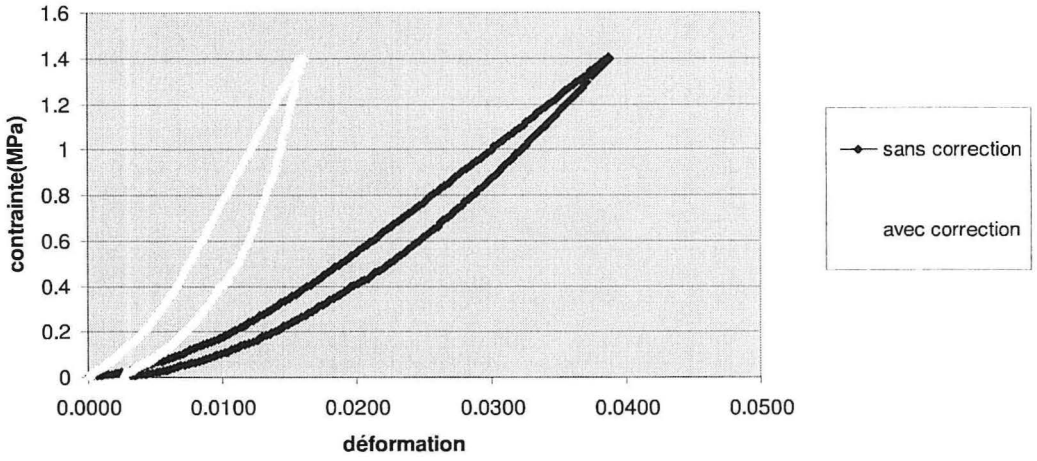


Figure 3.14. *Mise en évidence de la correction de la machine sur un échantillon d'OSB.*

La courbe de charge obtenue figure 3.14 est composée d'un pied de courbe (partie non linéaire) puis d'une partie relativement linéaire. On s'intéresse à la partie linéaire théoriquement représentative de la réponse élastique du matériau (*cf.* paragraphe 3.2.2.2). Pour connaître le module d'élasticité, on calcule la pente moyenne de cette courbe. Les valeurs obtenues pour le pin ou le cyprès sont en moyenne 2 fois inférieure aux valeurs mesurées par méthode ultrasonore [Balme, 2005] (tableau.**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** 3.1).

	Valeur en compression (GPa)	Valeur par méthode ultrasonore (GPa)
Pin (tangentiel)	0,6	1,09
Cyprès (radial)	0,8	1,55

Tableau 3.1. *Comparaison de module d'élasticité mesuré par les deux méthodes.*

Ces résultats n'étant pas satisfaisants, on a donc cherché à améliorer notre méthode d'essai et plus particulièrement l'interprétation des courbes.
Dans un premier temps, on a vérifié que les déplacements corrigés de la machine étaient justes : pour cela, on a mesuré les déplacements avec deux comparateurs placés sur le plateau de compression mobile (annexe F.b) et on a vérifié que l'on obtenait des courbes de déplacements comparables avec les deux méthodes de mesure (figure 3.15).

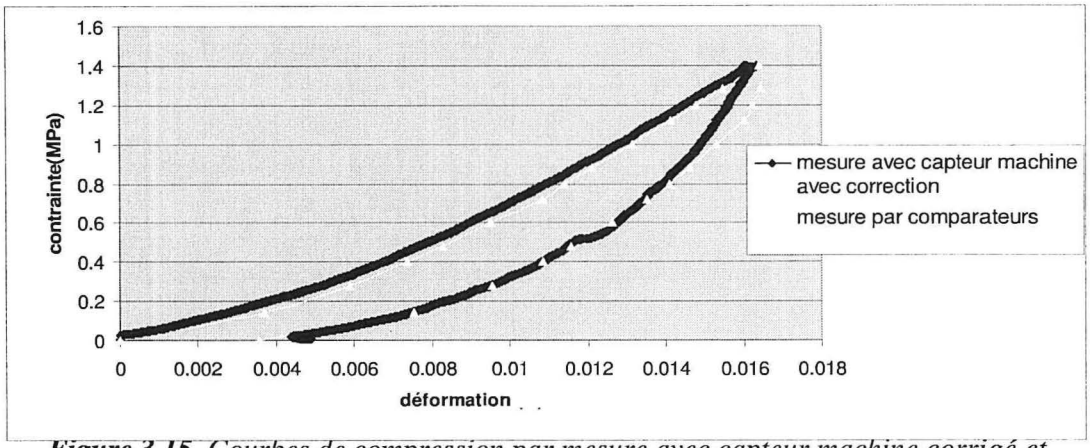


Figure 3.15. *Courbes de compression par mesure avec capteur machine corrigé et comparateurs sur un échantillon d'OSB.*

Après réflexion, l'explication suivante, pour la trop faible valeur mesurée des modules d'élasticité, a été envisagée : la surface de contact entre les plateaux et l'éprouvette est peut-être inférieure à la surface totale. En effet, si la surface n'est pas parfaitement plane, le contact entre les plateaux et l'éprouvette est réduit et les calculs du module, en supposant un état de contrainte et de déformation homogène, sont donc faussés. En effet, avec nos hypothèses, la contrainte est le rapport de la charge de compression et de la surface totale de l'éprouvette. Si la surface réelle de contact est inférieure à la surface estimée de l'échantillon, la contrainte moyenne réelle est localement supérieure à celle calculée. Afin de vérifier cette hypothèse, on a enduit de craie les plateaux de compression avant de faire un essai. Il semblerait alors que la surface réelle de contact soit effectivement inférieure à celle supposée. Il est alors nécessaire de modifier notre interprétation des résultats ou de modifier le cycle de chargement (on a également essayé de modifier l'interface entre l'échantillon et les plateaux : annexe F.a).

3.2.2.2 Essai sur un échantillon de bois massif avec deux cycles de charge/décharge

Afin de déterminer le module d'élasticité, on fait l'hypothèse suivante : le premier cycle de charge n'est pas représentatif du comportement élastique du matériau mais d'un effet plus global de « structure ». En effet lorsque l'on vient comprimer l'éprouvette la première fois, on écrase la matière pour donner à la surface de l'éprouvette, la forme de la surface du plateau, comme illustré sur la figure 3.16.

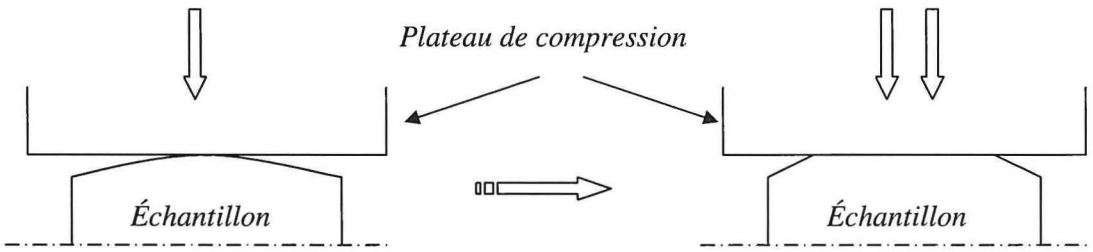


Figure 3.16. *Déformation de la surface de contact entre l'échantillon et le plateau de compression.*

La surface de contact lors de cette première phase de mise en charge varie donc en fonction de l'effort de compression et la courbe obtenue ne permet donc pas de remonter au module

d'élasticité. La réalité de cette hypothèse est partiellement mise en évidence par la non linéarité de la courbe de compression lors de la première charge (figure 3.18). En effet la surface de contact augmente alors que le matériau reste globalement (*i.e.*, en dehors des zones de contact) élastique linéaire ce qui induit une courbe de charge d'allure « parabolique ». Lorsque l'on atteint la charge maximale de 3500N, on a déformé plastiquement une partie du matériau proche du contact pour obtenir une surface de contact entre les plateaux et l'échantillon se rapprochant de la section réelle de l'éprouvette.
Pour mettre en évidence cette hypothèse, on a fait un test de compression constitué de 2 cycles de charge/décharge (figure 3.17) :

- charge de 0 à 3500N,
- décharge de 3500 à 1500N,
- charge de 1500 à 3500N,
- décharge de 3500 à 10N.

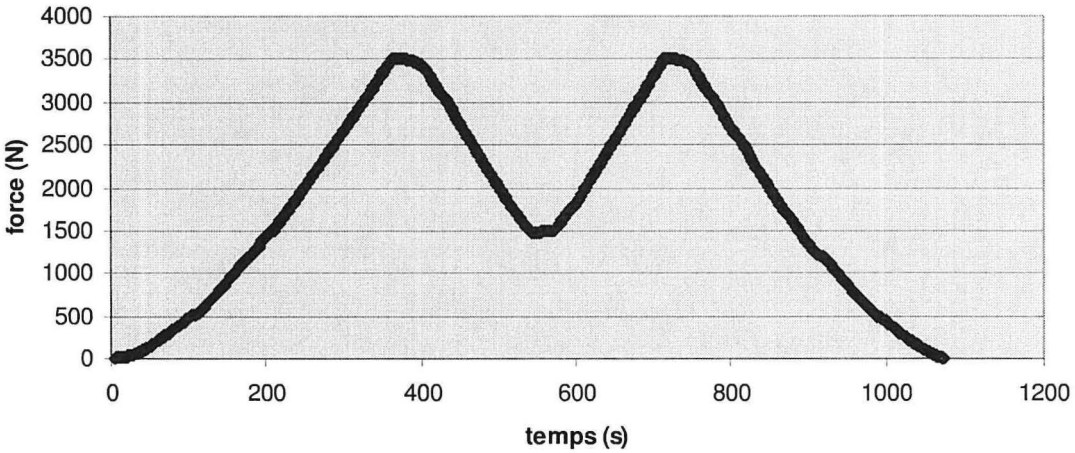


Figure 3.17. *Courbe de charge/décharge pour un essai piloté en déplacement.*

Au cours de la première montée en charge, l'éprouvette se « met en place », puis à partir du deuxième cycle, l'éprouvette est soumise à l'essai de compression proprement dit, la surface d'appui étant, à ce moment-là, supposée constante tant que l'on ne dépasse pas les 3500N atteints pendant la première montée en charge.
La courbe de compression résultant de ce type d'essai est donnée sur la figure 3.18. On remarque que, lors du premier cycle, les courbes de charge et de décharge sont différentes : la montée en charge est parabolique alors que la décharge est globalement quasi-linéaire. Par contre lors du deuxième cycle de charge, la réponse de l'éprouvette devient répétitive, elle suit toujours la même courbe quasi-linéaire à la charge et à la décharge. Ainsi on valide bien le fait que la première charge représente une mise en place de l'éprouvette (augmentation de la surface de contact par déformation irréversible) et que les cycles suivants correspondent à des essais dans le domaine élastique à surface de contact constante. On obtient une courbe similaire à une courbe d'indentation où la montée en charge correspond à la pénétration de l'indenteur dans le matériau (la surface de contact entre le poinçon et le matériau augmente en fonction de l'effort au cours de la pénétration), et la décharge permet de caractériser l'élasticité du matériau avec une courbe quasi-linéaire au début de la décharge (surface de contact constante [Arnould, 2003]). La suite de l'essai permet de déterminer le comportement élastique linéaire du matériau en supposant que la surface réelle de contact entre les plateaux et l'échantillon est très proche de la surface totale de l'éprouvette et qu'elle reste effectivement constante au cours de cette partie du cycle de charge/décharge.

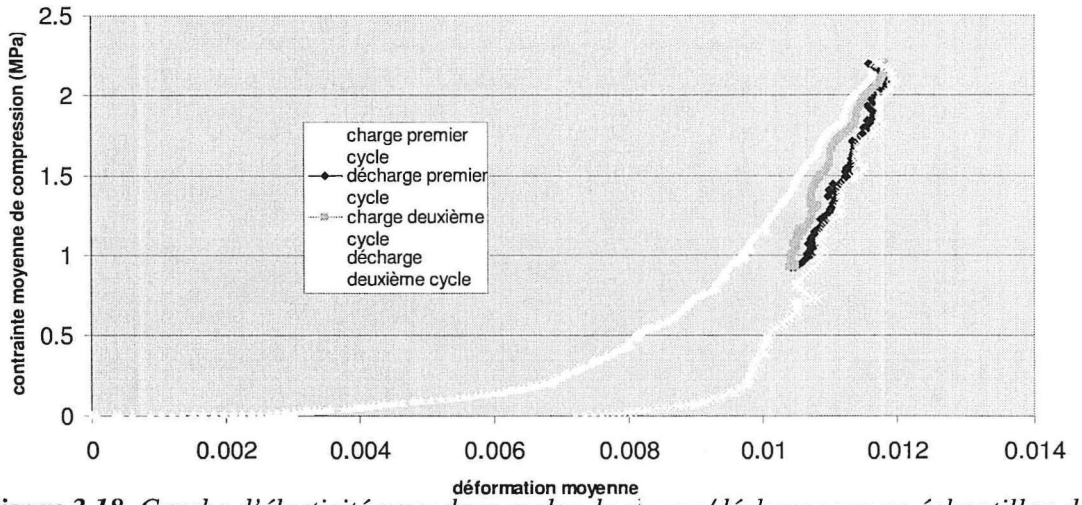


Figure 3.18. *Courbe d'élasticité pour deux cycles de charge/décharge sur un échantillon de cyprès.*

Pour calculer le module d'élasticité hors plan, on calculera donc la pente d'une des courbes de charge ou de décharge après la première montée jusqu'à 3500N. On obtient alors les valeurs présentées dans le tableau 3.2.

module de Young	valeur en compression (GPa)	valeur par méthode ultrasonore (GPa)
Cyprès (radial)	1,2	1,55
Pin (tangentiel)	0,8	1,1

Tableau 3.2. *Confrontation du module d'élasticité mesuré par les deux méthodes.*

En moyenne, les valeurs obtenues sont proches de celles mesurées par ultrasons [Balme, 2005]. Cependant, la différence de résultats peut s'expliquer par le fait que la surface réelle de contact n'est toujours pas totalement celle espérée ainsi que par le fait qu'il est possible que le matériau soit légèrement endommagé lors de la première montée en charge et que par conséquent sa réponse soit un peu différente, on limitera donc pour les essais définitifs, la charge maximale à 2000N. De plus, l'essai par ultrasons est un essai dynamique, les valeurs ainsi obtenues sont toujours supérieures à un essai statique en raison de la viscosité du bois. L'ordre de grandeur des résultats est donc relativement satisfaisant.

Ce protocole expérimental a ensuite été validé sur un panneau OSB acheté dans le commerce. La réponse est du même type que pour un échantillon de bois massif : la première montée en charge est de forme parabolique et le reste de l'essai est caractérisé par des courbes quasi-linéaires (figure 3.19).

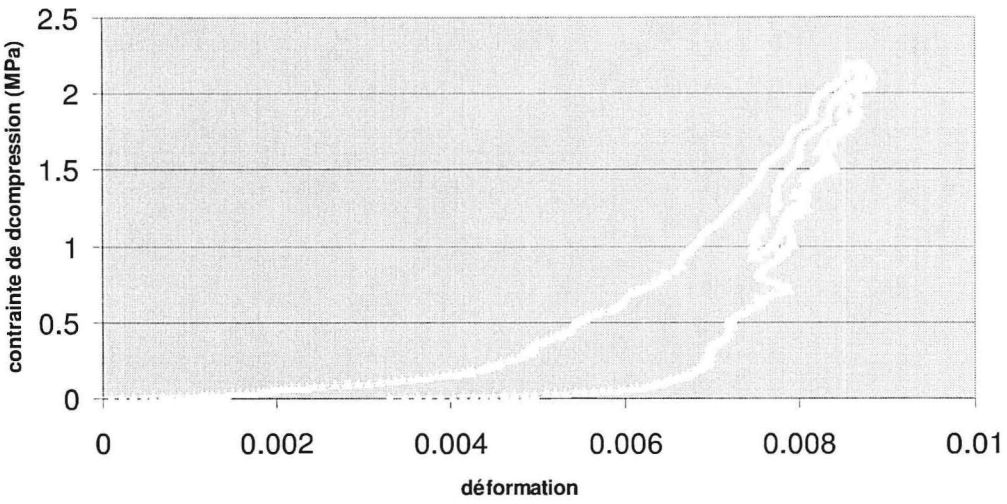


Figure 3.19. *Essai de compression sur panneau OSB du commerce.*

Pour optimiser encore les essais, réduire le temps de ceux-ci et dégrader au minimum l'échantillon, le module d'élasticité est calculé sur la partie de la courbe correspondant à la première décharge. Ceci évitera ainsi de faire un autre cycle de charge.

3.2.2.3 Validation du protocole

Le module d'élasticité hors plan calculé suivant le protocole précédent sur le panneau OSB du commerce est de 280 MPa. On confronte cette valeur avec celle de 340MPa mesurée par une méthode ultrasonore à contact direct (*cf.* paragraphe 3.3). Il est à noter que l'essai par méthode ultrasonore est un essai dynamique. En raison de la viscoélasticité du bois, les valeurs de module d'élasticité donnée par ce genre d'essai sont toujours supérieures à celle données par des essais quasi statiques. La différence entre les deux méthodes est ici de 17%. Pour un matériau bois, cette erreur est tout à fait acceptable et on peut ainsi valider les valeurs de module d'élasticité hors plan obtenue par les essais de compression. On a aussi réalisé un calcul d'erreur sur les valeurs obtenues pour valider leur pertinence (annexe G). Les calculs ont révélé que nos mesures étaient précises, au mieux, à environ 5% près pour les essais de compression soit 14MPa pour un module de 280MPa. On notera quand même que c'est la précision maximale que l'on peut obtenir ; dans la pratique, cette précision sera certainement plus faible en raison de paramètres plus ou moins bien maîtrisés.
On a retenu le protocole suivant (annexe H) : les plateaux de compression sont rotulés, la mesure de déplacement est faite par l'intermédiaire du capteur de déplacement de la traverse que l'on corrigera, et le module d'élasticité est calculé à partir de la première courbe de décharge.

3.3 Méthode ultrasonore

L'utilisation des ultrasons pour la mesure des constantes d'élasticité est une méthode très simple d'emploi pour contrôler les caractéristiques d'un matériau. On l'utilisera pour déterminer le module élastique hors plan d'un panneau OSB en complément aux essais de compression.

3.3.1 Principe

Le principe consiste à envoyer un train d'onde dans le matériau via un émetteur et à mesurer son temps de propagation via un récepteur. Dans notre cas, on utilise une méthode dite de contact direct, c'est-à-dire que l'émetteur et le récepteur sont en contact avec l'éprouvette de test. Le montage est constitué d'un générateur de fréquence, de deux transducteurs (émetteur et récepteur) et d'un oscilloscope permettant d'observer le signal émit par le générateur et le signal reçu par le récepteur (figure 3.20.a).

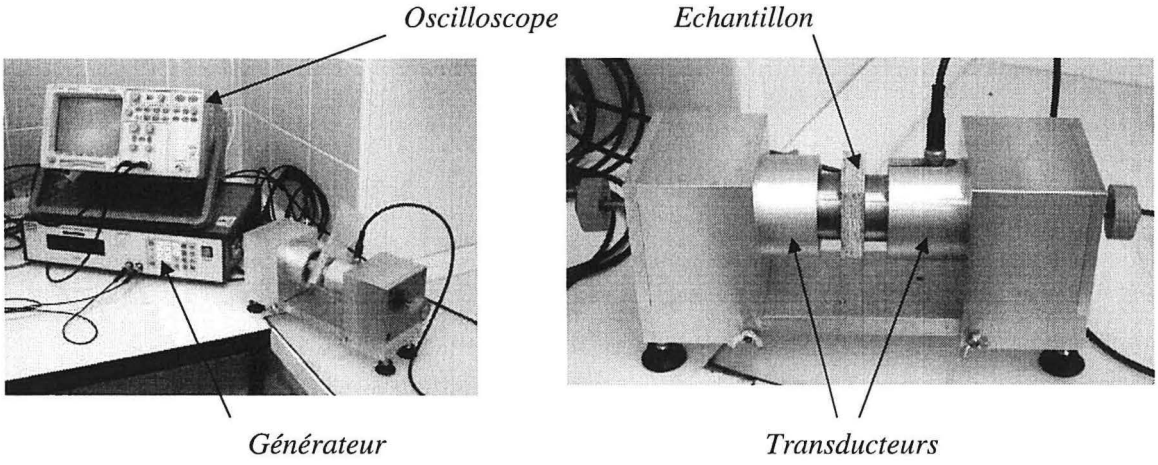


Figure 3.20.a. *Mesure par ultrasons en contact direct.*

Cette méthode est basée sur le fait que la vitesse de propagation d'une onde dans un matériau dépend de son module d'élasticité E et de sa masse volumique ρ: pour une même masse volumique, plus un matériau sera rigide et plus la vitesse de propagation de l'onde sera importante.
Pratiquement, pour connaître cette vitesse de propagation, on s'intéresse au temps que met l'onde pour traverser l'échantillon. On appelle ce temps, t, « le temps de vol ». Ensuite connaissant l'épaisseur e de l'échantillon, on peut remonter à la vitesse de propagation V_l :

$$V_l = e/t. \tag{8}$$

Dans le cas d'un matériau élastique isotrope, la vitesse des ondes longitudinales V_l obéit à l'inégalité [François, 2001]:

$$\sqrt{\frac{E}{\rho}} \le V_l \le \sqrt{\frac{E}{\rho}\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}}. \tag{9}$$

On distingue ainsi deux cas :

- le mode « barre longue » ou contraintes planes : l'éprouvette est très élancée dans la direction de propagation de l'onde, sa longueur est bien plus grande que la dimension caractéristique de sa section droite, alors :

$$V_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (10)$$

- Le mode « milieu infini », ou déformations planes, correspondant à une éprouvette de faible épaisseur, par rapport à sa section dont la dimension caractéristique est plus grande que la longueur l'onde, dans ce cas :

$$V_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}}. \quad (11)$$

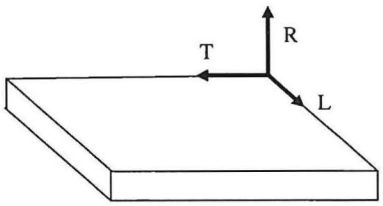


Figure 3.20.b. *Orientation des directions dans un panneau.*

Dans notre cas, on a une éprouvette de faible épaisseur (figure 3.20) et un matériau orthotrope. La vitesse dépend donc du module d'élasticité correspondant à la direction r, dans laquelle les ondes se propagent (direction hors plan pour nos éprouvettes) et des différents coefficients de Poisson :

$$V_l = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_1}{\rho} * \frac{(1-\nu_{23}\nu_{32})}{(1-\nu_{21}\nu_{13}\nu_{32}-\nu_{31}\nu_{12}\nu_{23}-(\nu_{23}\nu_{32}+\nu_{21}\nu_{12}+\nu_{31}\nu_{13}))}}. \quad (12)$$

L'émetteur utilisé envoie des ondes ayant une fréquence de 100kHz. La longueur d'onde, pour un module d'élasticité de l'ordre de 280MPa et une densité de 0,6 ($V_l \approx 680$m/s), est donc de l'ordre de 7mm. Cette longueur d'onde est plus grande que l'épaisseur des lamelles composant le panneau OSB (la vitesse de propagation sera plus représentative du comportement moyen du panneau) mais plus petite que le coté de la section droite de l'éprouvette. Néanmoins, on ne connaît pas les valeurs des coefficients de Poisson de notre matériau. En se basant sur les travaux de Thomas [2003], on peut obtenir un ordre de grandeur du coefficient $\frac{(1-\nu_{23}\nu_{32})}{(1-\nu_{21}\nu_{13}\nu_{32}-\nu_{31}\nu_{12}\nu_{23}-(\nu_{23}\nu_{32}+\nu_{21}\nu_{12}+\nu_{31}\nu_{13}))}$ de l'équation (12), soit 1,03. En conséquence, on peut utiliser l'équation (10) en première approximation.

3.3.2 Mise au point de l'essai

On réalise la mise au point de l'essai avec des échantillons de panneau OSB du commerce. C'est Yves El Kaïm, ingénieur électronicien du LMGC qui a réglé les paramètres du générateur.

Les échantillons que nous avons testés sont ceux qui nous ont également servis pour réaliser les tests de compression/traction perpendiculaire ou cisaillement. C'est donc sur ces mêmes échantillons qu'il a fallu coller des plaques métalliques. Pour obtenir un signal exploitable sur l'oscilloscope, il faut enduire de gel couplant l'échantillon. Pour éviter tous problèmes de collage ultérieurement, nous avons placé les échantillons dans un sac plastique très fin afin d'éviter que l'échantillon soit en contact avec le gel. L'influence de ce sac sur les calculs peut être négligée ; des essais réalisés par Thierry Laurent avec et sans sac plastique ont donné des résultats similaires. Le protocole détaillé de l'essai est décrit en annexe I.

3.4 Flexion 4 points [Vincent, 2002]

Le bâti de flexion 4 points est celui réalisé par Pierre Vincent lors de son DEA sur la mise en place d'un dispositif expérimental pour la caractérisation du comportement viscoélastique thermoactivé du bois vert. Ce bâti a été modifié pour répondre à notre cahier des charges. On cherchera avec ce montage à mesurer les modules de flexion longitudinal (dans le sens des lamelles des couches externes) et transverse (dans le sens des lamelles des couches internes) ainsi que les contraintes à rupture dans les mêmes directions (annexe J). On s'appuiera pour cela sur la norme EN789 [2005].

3.4.1 Présentation du banc d'essai

Dans une flexion simple (trois points), la section droite de l'éprouvette soumise au chargement maximum est la section médiane (au niveau de l'appui central). Il en résulte du cisaillement en plus de la flexion ce qui rend plus délicate l'interprétation du comportement mécanique.
Dans la flexion quatre points (ou circulaire) la partie médiane de l'éprouvette (entre les appuis) est soumise à de la flexion pure (*i.e.*, moment de flexion constant et absence de cisaillement). Avec ce test, on mesure donc uniquement le comportement en flexion et les résultats obtenus sont donc plus justes.
La déformation de l'éprouvette, ne peut pas être directement mesurée à partir du déplacement des appuis. En effet, ce déplacement se décompose en une partie liée à la déformation de l'éprouvette et en une autre partie correspondant à l'écrasement de l'éprouvette au contact avec les rouleaux.
La mesure de la déformation vraie de l'éprouvette en flexion nécessite le recours à une solution spécifique à l'aide d'un comparateur.

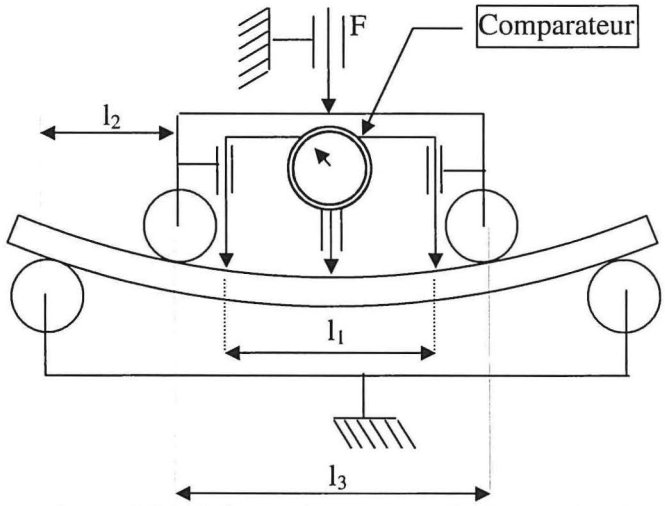


Figure 3.21. *Schéma du montage de flexion 4 points*

Le comparateur va mesurer la flèche entre deux points de référence distants de « l_1 » (figure 3.21). Nous ne pouvons pas prendre les appuis supérieurs comme référence, car, s'il y a une déformation surfacique localisée (écrasement), on ne mesure plus seulement la flèche de l'échantillon, mais la flèche plus la profondeur de l'empreinte sous les appuis.

Inconvénients :
Ce système demande une conception délicate pour le montage du comparateur (problèmes techniques d'arc-boutement liés aux frottements).

3.4.2 *Schéma du montage final*

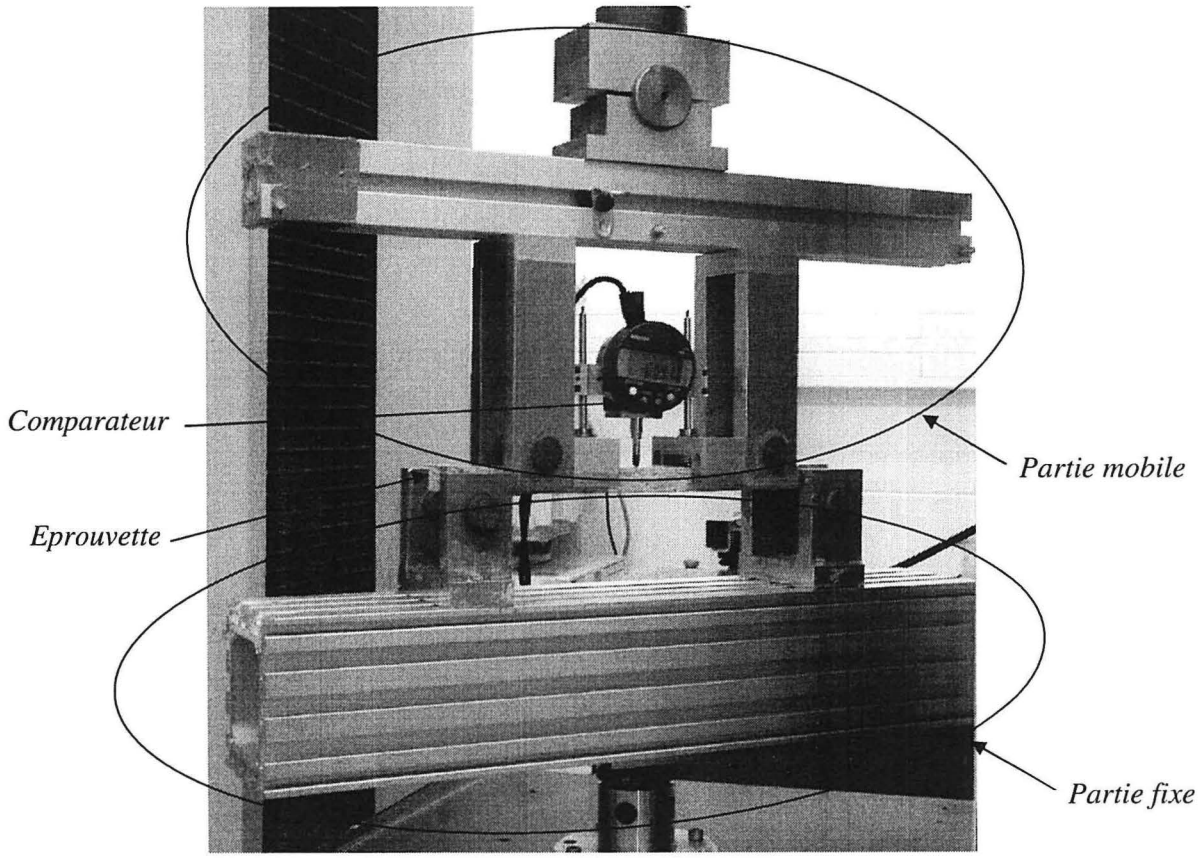


Figure 3.22. *Montage de flexion 4 points.*

3.4.3 *Mise au point de la manipulation :*

On a cherché dans un premier temps à vérifier que la rupture en flexion de l'échantillon se situait bien dans la zone de flexion pure en réalisant des essais sur des éprouvettes taillées dans un panneau OSB du commerce.

Pour les réglages de la machine, nous avons choisi de respecter la norme EN 789 [2005] sur les essais de flexion 4 points. Celle-ci impose que la rupture soit atteinte en (300±120)s et que la vitesse de chargement soit constante. Pour déterminer la vitesse de déplacement de la traverse de la machine, des essais sur des échantillons de panneau du commerce ont été réalisés. Au final, on a choisi une vitesse de déplacement de 10µm/s. Le protocole détaillé de l'essai est en annexe K.

3.5 Méthode dite du « BING »

Cette méthode a été conçue et réalisée par P.A Bordonné pendant sa thèse [BORDONNE, 1989]. Elle se base sur la réponse vibratoire d'une poutre en flexion soumise à un choc. On utilisera cette méthode afin de connaître les modules transversaux et longitudinaux de flexion. On peut également obtenir des modules de cisaillement mais dans notre cas les valeurs obtenues sont parfois « étonnantes » (*cf.* paragraphe 3.5.2).

3.5.1 Principe

Pratiquement, on dispose un barreau de bois sur deux élastiques dont la raideur est très faible devant celle du matériau testé. On place à une extrémité un microphone qui enregistre les vibrations du barreau lorsqu'on donne un choc à l'autre extrémité de l'échantillon (figure 3.23).Via un ordinateur et un logiciel de traitement, on analyse le signal obtenu.

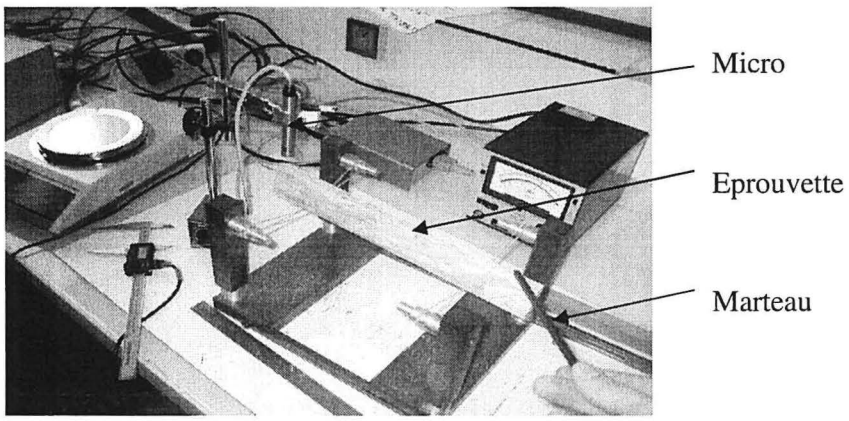


Figure 3.23. *Montage d'un essai « BING ».*

3.5.2 Mise en place de l'essai

Les essais ont été réalisés sur les barreaux de flexion. Leur géométrie n'était pas idéale pour ce genre de test (on préfère travailler sur des barreaux très élancés de section carrée) mais nous ne disposions pas de matière suffisante pour tailler de nouvelles éprouvettes. De plus, nous avons utilisé cette méthode sans savoir si elle pourrait donner des résultats exploitables. En effet, celle-ci marche très bien sur des matériaux homogènes à l'échelle d'une poutre de dimensions « normalisées », mais elle est très sensible aux défauts qui peuvent être présents dans l'échantillon. Par conséquent, l'OSB étant très hétérogène, nous ne savions pas si nous pourrions obtenir des résultats fiables. Quoi qu'il en soit, nous avons essayé d'obtenir des spectres de fréquences utilisables (c'est-à-dire avec des pics de fréquences caractérisant les modes propres de vibration de la poutre). Pour cela nous avons procédé « à tâtons », disposant l'éprouvette de manière différente à chaque fois (à plat ou sur chant) et en donnant un choc le plus sec possible avec le marteau dans le but d'obtenir le meilleur spectre possible. Le protocole suivi pour cet essai est donné dans l'annexe L.

3.6 Cisaillement roulant

Le montage pour le cisaillement roulant est inspiré du mécanisme proposé par la norme AFNOR EN789 [2005] et des travaux de Farshid Faraji lors de sa thèse [FARAJI, 2005]. Le montage a été modifié pour que l'on puisse déterminer le module d'élasticité du cisaillement roulant et le module de rupture (annexe M).

♥ *Principe :*

On vient coller de chaque coté d'une éprouvette carrée de 50mm de coté une plaque en métal à l'aide d'une colle polyuréthane bi-composant (figure 3.24).

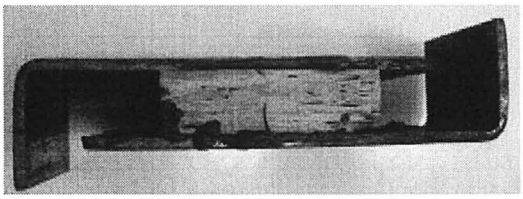


Figure 3.24. *Eprouvette collée sur ses plaques métalliques.*

Par l'intermédiaire d'un montage en aluminium, on vient exercer un effort de compression sur chaque plaque en métal comme sur les photos suivantes (figure 3.25). L'échantillon est alors cisaillé dans son épaisseur.

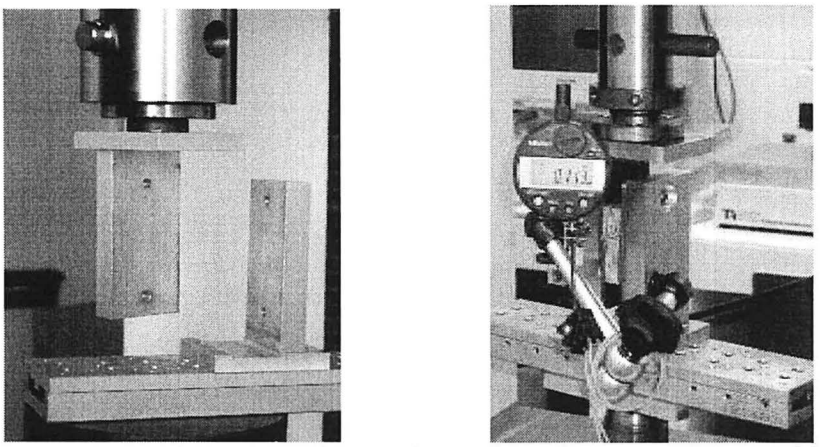


Figure 3.25. *Disposition de l'échantillon sur la machine de traction [Faraji, 2005].*

Les éprouvettes sont taillées à 45° dans le panneau (*cf.* paragraphe 4.2 et annexe B). Le module de cisaillement obtenu est donc une combinaison du module longitudinal et transversal (annexe M). Pour déterminer ces deux modules, on pourra utiliser les valeurs de cisaillement données par l'essai de BING lorsqu'ils sont acceptables (*cf.* paragraphe 3.5).

♥ Détermination des conditions expérimentales :

Pour les réglages de la machine, nous avons choisi de respecter la norme EN 789 [2005] sur les essais de cisaillement en roulant. Celle-ci impose que la rupture soit atteinte en (300±120)s et que la vitesse de chargement soit constante. On a donc réalisé des essais sur des échantillons taillés dans un panneau OSB du commerce pour déterminer la bonne vitesse de déplacement de la traverse de la machine afin de respecter la norme.
Le protocole complet est en annexe N.

4 Exploitation des résultats

Avec les différents essais réalisés, on a cherché à déterminer les caractéristiques suivantes :

- le module d'élasticité hors plan,
- la résistance à la rupture en traction perpendiculaire,
- les modules de flexion longitudinal et transversal,
- le module de cisaillement en roulant,
- la résistance à la rupture en cisaillement en roulant.

On a cherché à faire une caractérisation la plus complète du panneau OSB afin de pouvoir déterminer ultérieurement, d'une part les paramètres les plus sensibles à la dégradation par les termites, et d'autre part afin de pouvoir mettre en place une modélisation numérique du panneau OSB.

Remarque : On réalise une première campagne d'essais sur des échantillons sains. Son objectif est d'évaluer les caractéristiques mécaniques des panneaux OSB non dégradés. Dans cette partie de notre recherche, nous testons un nombre réduit d'échantillons.

En effet, nous ne savions pas encore comment allaient se comporter ces panneaux prototypes. Avant de se lancer dans de lourdes et longues séries de tests, nous avons donc cherché à nous faire une idée des propriétés mécaniques des panneaux. C'est-à-dire savoir si son comportement mécanique pouvait correspondre aux valeurs exigées par la norme EN 300 [1997]. Ainsi nous avons testé un échantillon par panneau et par type d'essai.

Les échantillons seront choisis dans la gamme moyenne de densité (couleur bleue en annexe N) et de manière à avoir les densités les plus proches les unes des autres et une première idée du comportement moyen par type de panneau.

4.1 Détermination du module d'élasticité hors plan du panneau

Comme vu au paragraphe 3, ce sont les résultats donnés par les essais de compression et par une méthode ultrasonore qui nous permettent de déterminer le module élastique hors plan pour chaque panneau. Les résultats par mélange et par colle sont donnés dans l'annexe O.

En confrontant les résultats donnés par les deux méthodes, on vérifie bien que les valeurs déterminées par l'essai ultrasonore (dynamique) sont supérieures à celles données par l'essai de compression (quasi statique). La différence entre les deux méthodes est en moyenne de 30%.
Aussi, on observe une dispersion entre les différents échantillons prélevés dans un même panneau et ayant des densités proches (tableau O.3 et O.4) :

- pour l'essai de compression, la dispersion des valeurs est de 15-20% (écart type) pour la plupart des mélanges sauf pour les panneaux à base de robinier qui ont soit une grande dispersion (30 à 40% pour le robinier pur), soit une très faible dispersion (<10% pour les panneaux contenants 50% de robinier).
- en ce qui concerne les résultats de la méthode dynamique, la dispersion est toujours grande pour les panneaux de robinier pur (elle peut aller jusqu'à 48%), et pour les autres mélanges, elle est de l'ordre de 10 à 20%.

On peut expliquer cette grande dispersion dans les mesures pour les panneaux de robinier par le fait qu'ils étaient très hétérogènes d'un point de vu des densités et de mauvaise qualité. Les autres panneaux étaient plus homogènes et on observe en conséquence moins de dispersion.
Nota : Pour affiner ces résultats, on pourrait les corréler plus finement avec la densité de chaque échantillon.

On note que les mélanges d'essences donnants les meilleurs modules d'élasticité hors plan (compromis entre les modules donnés par les deux méthodes et les dispersions) sont les panneaux à base de cyprès (75 et 100%). Il semblerait également que les panneaux à base de lignine offrent de meilleurs résultats que les panneaux à base de colles synthétique ou de tanin.

4.2.1 Etude des résultats

On utilise ici les résultats donnés par l'essai de traction perpendiculaire (annexe P). On peut comparer les valeurs données avec la norme AFNOR EN300 [1997] qui donne comme critère de viabilité mécanique, une résistance à la traction perpendiculaire d'au moins 0,45N/mm² pour un panneau de classe 4. D'après les tableaux P.1 et P.2, seuls les panneaux à base de 75 et 100% de cyprès (toutes colles confondues) sont viables, ainsi que ceux comportant 50% de cyprès collés avec une colle à base de lignine et ceux composés de 50% de robinier avec une colle au tanin. Les autres panneaux ne remplissent pas ce critère.
On émet cependant une réserve sur la pertinence de ces valeurs en raison du faible nombre d'essais par mélange d'essences de bois et de colles (3 essais) réalisés et à cause de la dispersion parfois importante des valeurs trouvées (>40%). Il serait intéressant de faire plus d'essais pour valider cette campagne.

4.2.2 Mode de rupture

On observe deux types de rupture :

- le premier a lieu aux interfaces entre les lamelles donc soit dans le joint de colle, soit entre la colle et le bois. La surface de rupture est reconnaissable par le fait que les lamelles sont entières et non dégradées (figure 4.1).

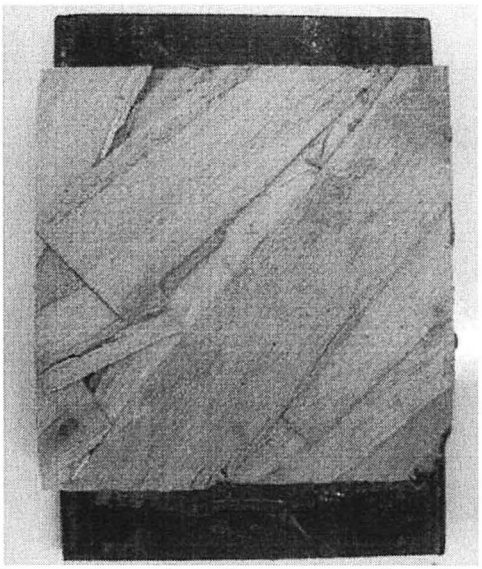


Figure 4.1. *Rupture entre lamelles sur un échantillon de robinier.*

- le second type de rupture a lieu en deux temps :
    - la première phase ressemble au premier mode de rupture, en ce sens qu'elle se produit dans l'interface entre deux lamelles. Ce qui la différencie du cas précédent, c'est que la rupture n'a pas lieu sur tout le joint entre lamelles. Il semblerait qu'il y ait un moment où le joint soit plus résistant et où il ne casse pas. On arrive à ce moment-là au second mode de rupture.
    - Ce sont les lamelles de bois qui sont alors sollicitées et la rupture a lieu dans le bois. On observe donc sur les faciès de rupture des zones où les lamelles sont intactes et des zones où le bois a été déchiré (figure 4.2).

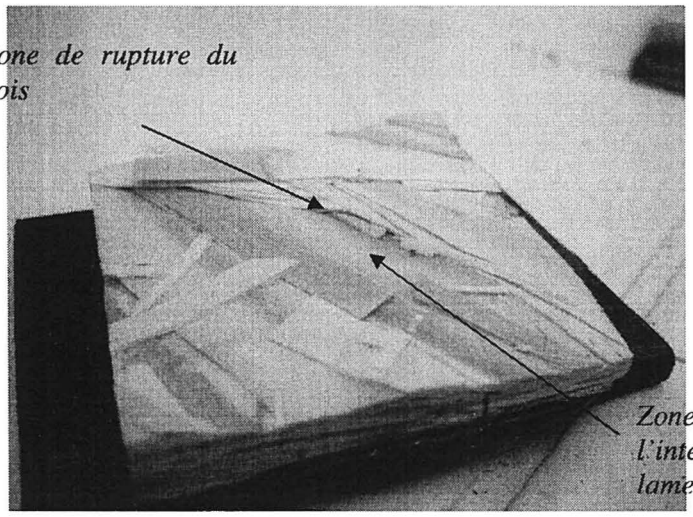


Figure 4.2. *Faciès de rupture dans la colle et le bois sur un échantillon de cyprès.*

Remarque :
- Dans tous les cas, on n'observe jamais de zones où la lamelle se serait déchirée dans son épaisseur.
- Le second mode de rupture a lieu en général pour les fortes valeurs de résistance à la traction perpendiculaire (*e.g.* échantillon de cyprès), l'interface entre la colle et le bois est meilleur. Et le mode de rupture dans l'interface entre lamelles caractérise les faibles modules de rupture (*e.g.* 100% robinier).

4.3.1 Modules élastiques

Les essais donnant les modules élastiques longitudinaux et transversaux en flexion sont les essais de flexions quatre points et l'essai dit de « BING ». Les tableaux récapitulatifs des résultats sont en annexe Q. On peut observer sur ces tableaux, les valeurs de modules élastiques données par les deux essais ainsi que les écarts entre les valeurs minimales et maximales mesurées pour un type de mélange.

Les dispersions observées sont en générale très importantes (souvent supérieures à 40%) pour la flexion 4 points. Celles observées pour les essais de BING sont un peu plus faibles mais elles restent quand même assez marquées. Les conséquences de ce phénomène sont que pour un même mélange d'essences de bois et de colle, certains échantillons (et donc panneaux) sont acceptables par la norme AFNOR EN300 [1997], et d'autres ne le sont pas (pour qu'un échantillon soit dans les critères de la norme, il faut que son module élastique longitudinal soit supérieur à 4800N/mm² et que son module élastique transversal soit supérieur à 1900N/mm² pour un panneau de classe 4). On observe donc une grande dispersion quelque soit la méthode de mesure. Cette différence de mesure traduirait ainsi la différence de propriétés mécaniques d'un panneau à l'autre.

Il faut noter cependant que ces deux essais présentaient quelques défauts majeurs :

- En ce qui concerne le test de flexion 4 points, suivant les modes de rupture des éprouvettes (*cf.* paragraphe 4.1.3.3), le comparateur ne mesure pas forcément tout à fait la flèche de l'échantillon : lorsque l'éprouvette commence à se rompre entre les couches de lamelles (et donc lorsque l'on observe un décollement de celles-ci (figure 4.3)), le comparateur mesure la flèche de la partie supérieure de l'échantillon, qui est différente de celle de la partie inférieure. La mesure du module d'élasticité s'en trouve donc faussée.

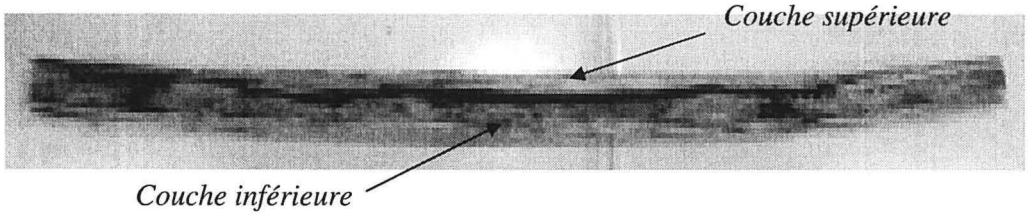


Figure 4.3. *Rupture entre couches d'un échantillon de robinier.*

Aussi, la mesure peut être faussée quand des ruptures « locales », c'est-à-dire n'entraînant pas la ruine de l'éprouvette, se créent dans la zone de mesure du comparateur. On pourra également faire une remarque sur la taille de l'éprouvette. Habituellement les éprouvettes de flexion sont beaucoup plus importantes que les nôtres. Les distances entre les points d'appuis sont donc supérieures et l'éprouvette est plus sollicitée par une contrainte de flexion pure. Dans notre cas, nous n'avons pas pu avoir des éprouvettes plus grandes en raison de la taille réduite des panneaux. Enfin, le guidage du système de mesure n'était pas tout à fait idéal en ce sens qu'il persistait quelques frottements, gênant parfois les déplacements du comparateur.

- L'essai de « BING » est, rappelons-le, exploratoire (*cf.* paragraphe 3.5.2). Les valeurs obtenues ne sont peut être donc pas toujours réalistes. Cet essai étant un essai dynamique, les valeurs devraient donc être logiquement plus élevées que celles données par le test de

flexion 4 points (quasi statique), en raison de la viscosité du bois. D'après le tableau Q.3, on n'observe pas toujours ce principe. Les valeurs obtenues par méthodes dynamiques sont souvent inférieures à celles données par la flexion 4 points.

4.3.2 Contraintes à rupture en flexion

Ces valeurs ont été déterminées avec l'essai de flexion 4 points et sont présentées en annexe Q.

Les panneaux en 100% robinier ne remplissent pas les critères de la norme AFNOR EN300 [1997] : leur résistance à la flexion est inférieure à celle exigée (28N/mm² en longitudinal et 15N/mm² en transversal pour un panneau de classe 4).

De manière générale, les valeurs de contrainte à rupture sont meilleures avec une colle à base de lignine plutôt qu'à base de tanin. En ce qui concerne les essences de bois, les mélanges à base de cyprès donnent les meilleurs résultats.

4.3.3 Modes de rupture en flexion

On observe trois modes principaux de rupture des éprouvettes :

- La rupture a lieu au niveau des interfaces entre les lamelles. On observe un décollement de séries de lamelles (souvent entre une couche externe et la couche interne) (figure 4.4).

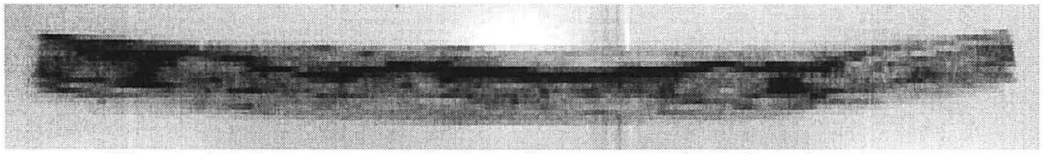


Figure 4.4. *Rupture entre les lamelles sur un échantillon de robinier.*

Le faciès de rupture montre les lamelles intactes et entières (figure 4.5).

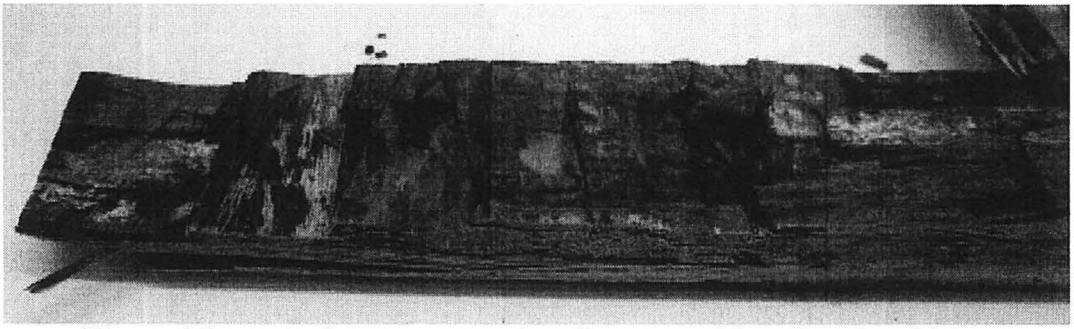


Figure 4.5. *Faciès de rupture entre lamelles sur un échantillon de robinier.*

Ce mode de rupture caractérise en général les échantillons à base de robinier, quelque soit la colle utilisée. Il semblerait que le collage avec le robinier soit assez difficile.

- Le second mode de rupture a lieu dans le bois. On observe donc un déchirement des lamelles (figure 4.6).

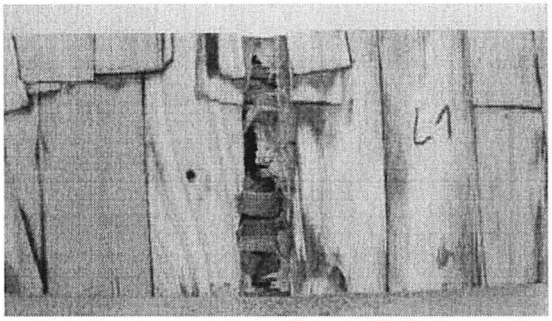


Figure 4.6. *Rupture dans le bois sur un échantillon à 75% de cyprès avec une colle à base de lignine.*

- Le dernier mode de rupture se caractérise par une combinaison des deux premiers. On observe en premier lieu une rupture dans la colle, et ensuite on a une seconde rupture dans le bois (figure 4.7). C'est le mode le plus fréquemment rencontré, quelque soit la colle ou le mélange.

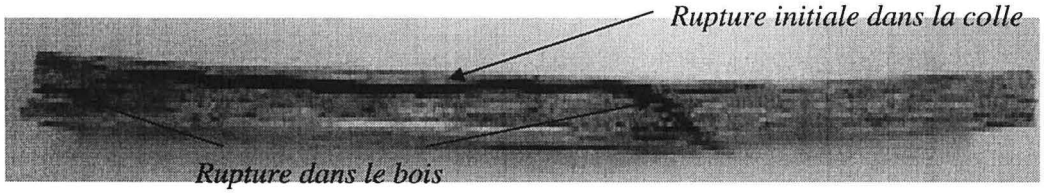


Figure 4.7. *Rupture combinée sur une éprouvette à base de robinier.*

Remarque : On a pu observer que les échantillons collés avec une colle à base de tanin se cassaient dans la colle. Le collage semble donc moins efficace qu'avec la colle composée de lignine.

4.4 Détermination du module élastique et à rupture en cisaillement

On utilise les résultats donnés par les essais de cisaillement roulant.

4.4.1 Etude des résultats du module élastique

Les résultats sont regroupés en annexe R (tableaux R.1 et R.2).

On peut faire une remarque sur les couples bois-colle. On s'aperçoit en regardant les valeurs de module élastique que la colle à base de lignine semble bien se marier avec les échantillons de cyprès et que celle à base de tanin semble mieux s'accommoder avec les échantillons de robinier.

On émet cependant une réserve sur la pertinence de ces valeurs en raison du faible nombre d'essai par mélange d'essences de bois et de colles (3 essais) réalisés et à cause de la dispersion parfois importante des valeurs trouvées (>40%). Il serait intéressant de faire plus d'essais pour valider cette campagne.

4.4.2 Etude des résultats du contrainte à la rupture (tableau R.3 et R.4)

La résistance à la rupture est la plus élevée en moyenne pour les échantillons à base de cyprès. On peut faire les mêmes remarques que précédemment sur les couples bois-colle (*cf.* paragraphe 4.1.4.1).On note également que les panneaux à base de robinier ont un mauvais module à rupture vis-à-vis des autres mélanges. On peut émettre les mêmes réserves sur la pertinence des mesures.

4.4.3 Mode de rupture

On observe deux types de rupture :

- le premier a lieu aux interfaces entre les lamelles donc soit dans le joint de colle, soit entre la colle et le bois. La surface de rupture est reconnaissable par le fait que les lamelles sont entières et non dégradées (figure 4.8).

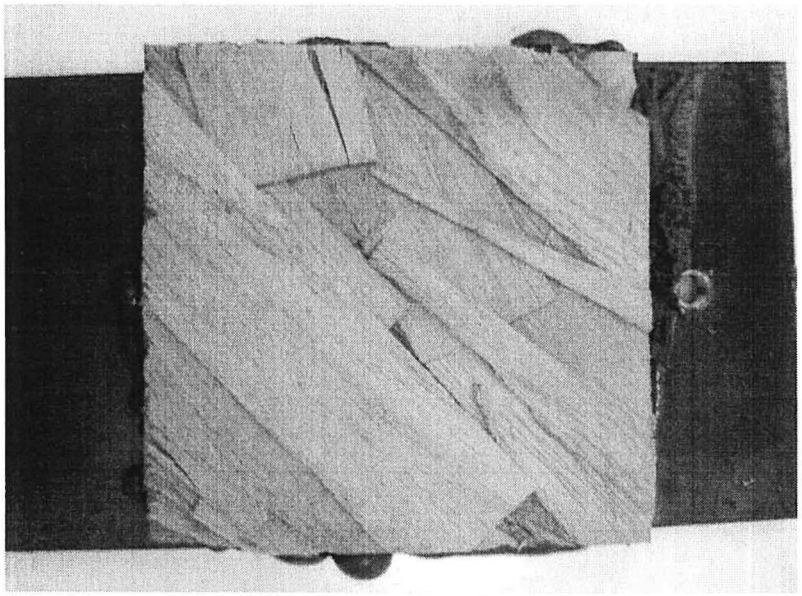


Figure 4.8. *Rupture au cisaillement entre lamelles sur un échantillon de robinier.*

- le second type de rupture a lieu en deux temps :
    - la première phase ressemble au premier mode de rupture, en ce sens qu'elle se produit dans l'interface entre deux lamelles. Ce qui la différencie du cas précédent, c'est que la rupture n'a pas lieu sur tout le joint entre lamelles. Il semblerait qu'il y ait un moment où le joint soit plus résistant et où il ne casse pas. On arrive à ce moment-là au second mode de rupture.
    - Ce sont les lamelles de bois qui sont alors sollicitées et la rupture a lieu dans le bois. On observe donc sur les faciès de rupture des zones où les lamelles sont intactes et des zones où le bois a été déchiré (figure 4.9).

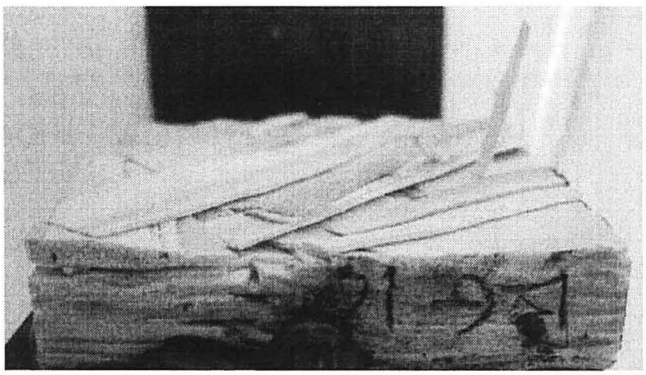


Figure 4.9. *Faciès de rupture dans la colle et le bois sur un échantillon de pin.*

Remarque :

- Dans tous les cas, on n'observe jamais de zones où la lamelle se serait déchirée dans son épaisseur.
- Les modes de rupture composés ont lieu en général pour les fortes valeurs de résistances au cisaillement (*e.g* échantillon de cyprès). Et le mode de rupture dans l'interface entre lamelles caractérise les faibles modules de rupture (*e.g* 100% robinier).

4.5 Conclusions de cette série d'essai

Au terme ce cette première série d'essais, on peut dire que les panneaux à base de robinier ne sont pas mécaniquement viables au regard des normes en vigueur [EN300, 1997]. De plus, ils sont très hétérogènes et leur densité varie beaucoup dans un panneau.
On remarque également que ces panneaux semblent s'être très mal collés et on a même parfois l'impression qu'il n'y a pas de collage entre les lamelles.
Au terme de cette première série d'essai, un type de panneau semble se démarquer : le mélange à base de 50% de cyprès collé avec une colle à base de lignine. Ce panneau présente non seulement des caractéristiques mécaniques très élevées par rapport aux autres panneaux, mais en plus, il pourrait être économiquement viable en ce sens qu'il est composé de bois peu onéreux et fortement répandus sur le territoire. Il resterait donc maintenant à caractériser sa durabilité.
On peut également commencer à percevoir la viabilité mécanique des colles : la colle à base de lignine semble plus résistante que celle à base de tanin pour les mélanges à base de cyprès.
On notera aussi que certaines modifications pourraient être apportée au montage de flexion 4 points, d'une part en utilisant des éprouvettes de plus grande longueur (*cf.* norme AFNOR EN789), et d'autre part en revoyant le système de guidage du comparateur par rapport au bâti de flexion (changement des glissières à billes, guidage plus long...).
On rappelle aussi que les valeurs mesurées demandent à être confirmées par d'autres séries d'essais afin d'avoir plus d'échantillons testés pour pouvoir valider ces conclusions.

CONCLUSION

Durant le temps qu'il m'était imparti pour réaliser mon stage de fin d'étude, j'ai pu, d'une part mettre en place une campagne d'essais pour caractériser le comportement mécanique d'un panneau OSB et d'autre part réaliser une première série d'essais sur environ deux cent éprouvettes. Au terme de mon stage, les perspectives, dans un futur proche, du projet sont les suivantes :

- Essayer de développer un modèle mécanique de l'OSB, connaissant les caractéristiques du bois massif. Pour cela, il faudra finir de déterminer les constantes élastiques du panneau (*cf.* annexe M) et étudier le lien qu'il y a entre propriétés mécaniques et densité de l'échantillon.
- Etudier l'influence de la densité sur les constantes mécaniques afin d'expliquer les fortes dispersions mesurées entre les valeurs de modules.
- Réaliser les essais sur les échantillons attaqués pour déterminer les mélanges naturellement durables et les grandeurs mécaniques les plus influencées par la dégradation causée par les termites. Ceci aura pour but, entre autres, de proposer une méthode simple, rapide et non destructive pour déterminer si un panneau est sain ou dégradé.
- Tester les autres séries d'échantillons afin de valider (ou non) les résultats de la première série d'essais.

Ce stage a été pour moi très enrichissant. Il m'a permis de toucher du doigt (et parfois de résoudre) de nombreux problèmes. J'ai pu me documenter et m'instruire sur un nombre important de méthodes de mesure et me confronter à la dure réalité des essais qui ne fonctionnent pas toujours comme on l'aurait espéré ! Le travail de compréhension et d'analyse des résultats donnés par un essai a été aussi très intéressant : comprendre pourquoi la courbe a une forme parabolique alors que logiquement elle devrait être linéaire, essayer de maîtriser au mieux ce que l'on est entrain de faire ou mesurer pour toujours rester objectif devant les résultats d'un essai…

J'ai aussi grandement apprécié l'ambiance de travail qu'il règne au sein de l'équipe et à l'atelier. Tout le monde est toujours disponible pour répondre à une question ou pour donner un coup de main pour installer, mettre au point, préparer une « manip ».

Je suis pleinement satisfait de mon stage qui, même s'il ne présente pas l'avantage d'avoir été réalisé en collaboration étroite avec le monde de l'industrie, a été extrêmement enrichissant d'un point de vu scientifique (je remercie encore une fois Olivier Arnould en particulier pour tout le temps passé avec moi pour me donner goût (en vain!), m'expliquer et développer le coté théorique des essais), mais également d'un point de vu personnel.

BIBLIOGRAPHIE

- ASCH G., *Les capteurs en instrumentation industrielle,* Paris : DUNOD, 1999.
- ARNOULD O., *Identification des modes de vieillissement d'un assemblage en nickel/cuivre électrodéposé,* Thèse de Doctorat de l'Université Paris IV-Pierre et Marie Curie, 2003.
- BALME M.M, *Evaluation des propriétés élastiques de trois essences de bois par diverses techniques,* Stage de 2ème année de l'Institut universitaire de Montpellier II, LMGC Montpellier, 2005.
- BORDONNE P.A., *Module dynamique et frottement intérieur dans le bois : mesures sur poutres flottantes en vibrations naturelles,* Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Nancy, 1989.
- BOS F., *Influence des conditions limites sur la caractérisation mécanique élastique et différée des contreplaqués en flexion*, Thèse de Doctorat de ??, Bordeaux, 1995.
- DIROL D., DEGLISE X., *Durabilité des bois*, Éditions Hermès Science, 2001.
- EN300 : *Panneaux de lamelles minces, longues et orientées (OSB) - Définitions, classification et exigences*, Éditions AFNOR, Paris, Mai 1997.
- EN310 : *Panneaux à base de bois - Détermination du module d'élasticité en flexion et de la résistance à la flexion*, Éditions AFNOR, Paris, Juin 1993.
- EN319 : *Panneaux de particules et panneaux de fibres - Détermination de la résistance à la traction perpendiculaire aux faces du panneau*, Éditions AFNOR, Paris, 1993.
- EN789 : *Structures en bois - Méthodes d'essai - Détermination des propriétés mécaniques des panneaux à base de bois,* Éditions AFNOR, Paris, Avril 2005.
- FARAJI F., *Etude de la durabilité d'un composite multicouche en mélange de placages de durabilités variables,* Thèse de Doctorat de l'ENGREF Montpellier, 2005.
- FRANÇOIS D., *Essais mécaniques et lois de comportement*, Éditions Hermès, 2001.
- GUITARD D., *Mécanique du matériau bois et composites,* Édition CEPADUES, 1987.
- JODIN P., *Le bois, matériau d'ingénierie*, Éditions A.RBO.LOR, 1994.
- NAVI P., HEGER F., *Comportement thermo-hydromécanique du bois*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2005.
- THOMAS W.H., *Poisson's ratios of an oriented strand board*, Wood sciences and Technologies, vol. 37, p. 259-268, 2003.
- VINCENT P., *Mise en place d'un dispositif expérimental pour la caractérisation du comportement viscoélastique thermoactivé du bois vert,* Stage de DEA d'Université Montpellier II, LMGC Montpellier, 2002.
- WATTRISSE B., CHRYSOCHOOS A., MURACCIOLE J-M., NÉMOZ-GAILLARD M., *Analysis of strain localization during tensile tests by digital image correlation*, Experimental Mechanics, p. 29-39, 2000.
- Site internet: www.cwc.ca, consulté en Mars 2006.

ANNEXES

A. Tableaux de composition des panneaux

Essence / Désignation du panneau	*Pin Sylvestre*	*Cyprès*	*Robinier*	*Colle*
ABC	0%	100%	0%	tanin
DEF	100%	0%	0%	lignine
GHI	0%	100%	0%	lignine
JKL	25%	75%	0%	lignine
MNO	50%	50%	0%	lignine
PQR	100%	0%	0%	tanin
STU	25%	75%	0%	tanin
VWX	50%	50%	0%	tanin
YZAB	0%	0%	100%	lignine
ACADAE	25%	0%	75%	lignine
AFAGAH	50%	0%	50%	lignine
AJAKAL	50%	0%	50%	tanin
AMANAO	25%	0%	75%	tanin
APAQAR	0%	0%	100%	tanin

Tableau A.1. *Composition des panneaux faits par l'ENSTIB.*

Essence / Désignation du panneau	*Pin Sylvestre*	*Cyprès*	*Robinier*
BDBEBF	0%	100%	0%
BGBHBJ	100%	0%	0%
BKBLBM	0%	0%	100%

Tableau A.2. *Composition des panneaux faits par Isoroy.*

B. Plan de découpe d'un panneau

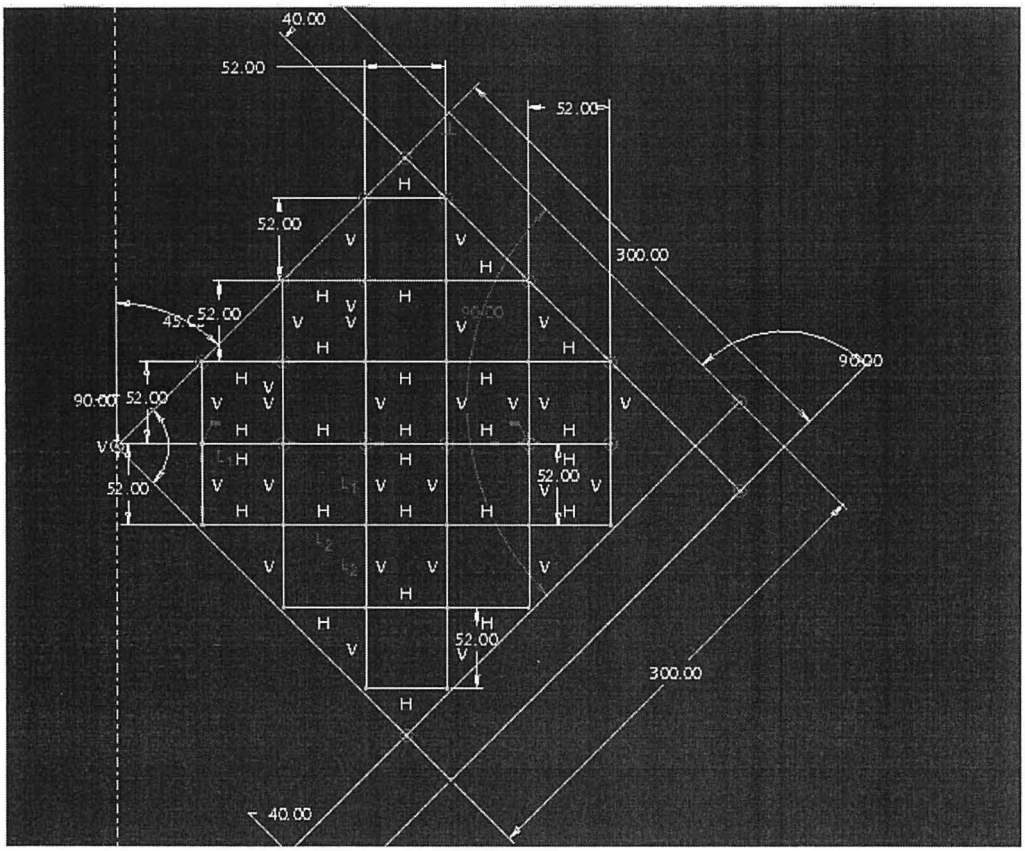
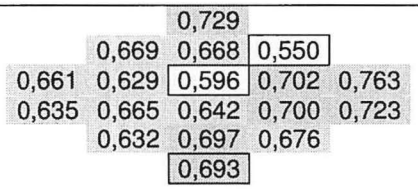
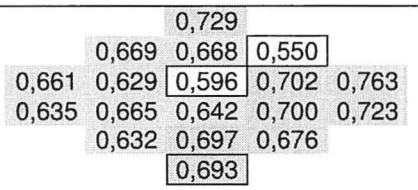
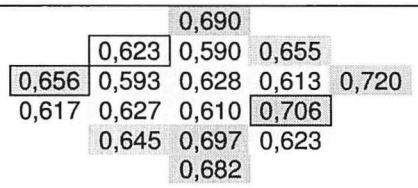
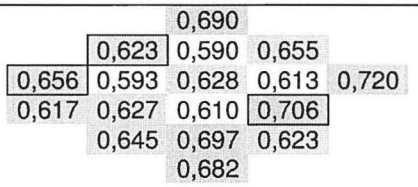
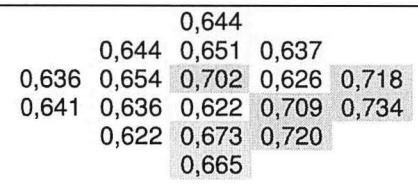
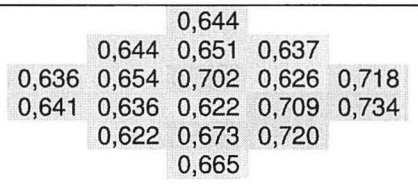


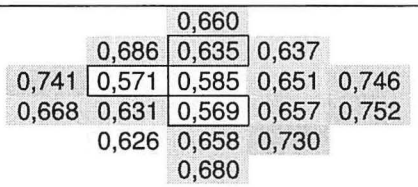
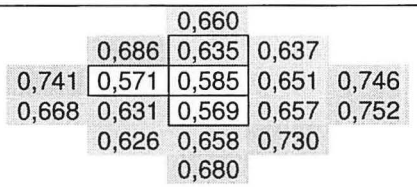
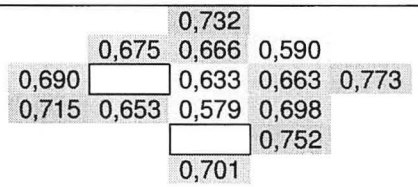
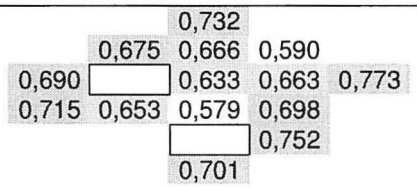
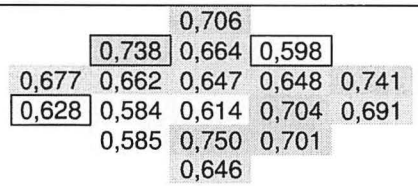
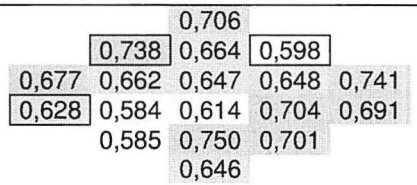
Figure B.1. *Plan de découpe d'un panneau.*

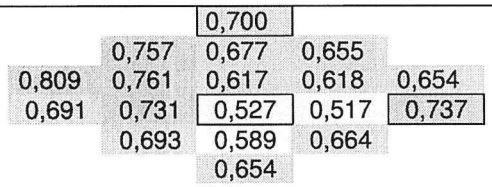
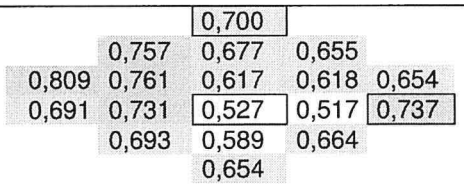
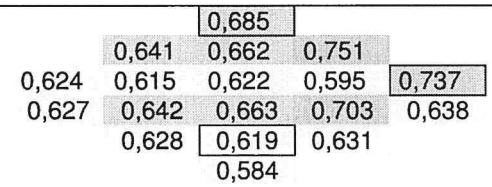
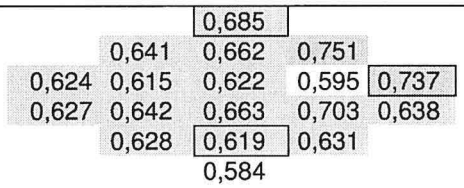
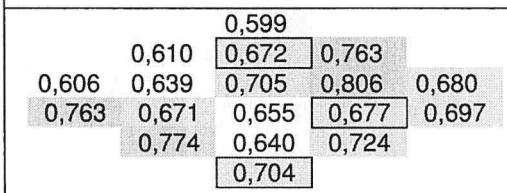
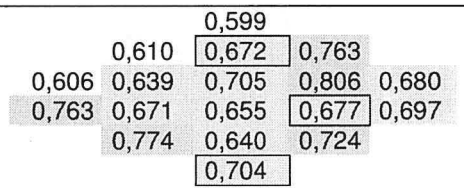
C. Classification des échantillons par densité

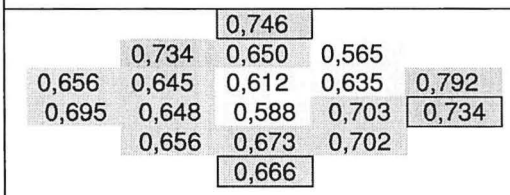
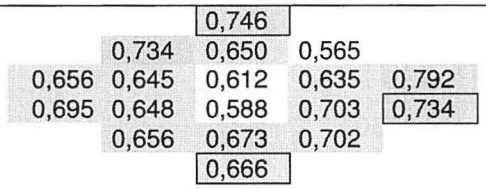
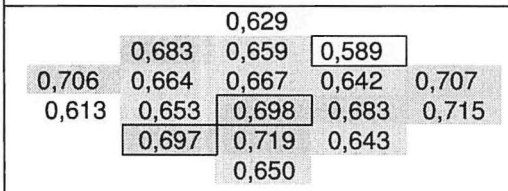
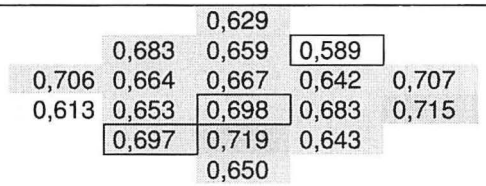
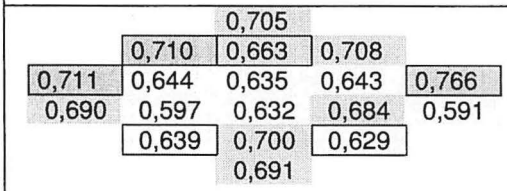
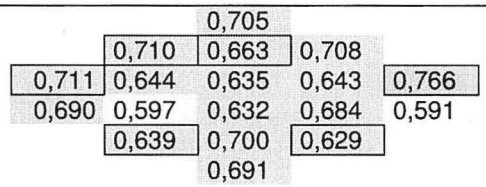
Les tableaux suivants présentent la répartition de densité au sein d'un panneau (la densité par panneau est calculée sur un seul panneau et la densité par type de panneau est calculée sur tous les panneaux ayant le même mélange de bois). La couleur verte représente les faibles densités, la bleue les moyennes et l'orange les fortes. Les panneaux fabriqués par Isoroy sont marqués 'Isoroy' et les autres sont ceux réalisés par l'ENSTIB.

Densité par panneau	Densité par type de panneau	Panneau
0,629 0,568 0,712 0,701 0,627 0,652 0,652 0,702 0,687 0,651 0,671 0,576 0,585 0,670 0,670 0,658 0,570 0,700 densité mini 0,568 densité inter 0,616 0,664 densité maxi 0,712	0,629 0,568 0,712 0,701 0,627 0,652 0,652 0,702 0,687 0,651 0,671 0,576 0,585 0,670 0,670 0,658 0,570 0,700 densité mini 0,558 densité inter 0,615 0,672 densité maxi 0,729	BD Isoroy cyprès
0,715 0,578 0,646 0,692 0,729 0,641 0,558 0,621 0,645 0,659 0,601 0,631 0,616 0,671 0,655 0,589 0,645 0,625 densité mini 0,558 densité inter 0,615 0,672 densité maxi 0,729	0,715 0,578 0,646 0,692 0,729 0,641 0,558 0,621 0,645 0,659 0,601 0,631 0,616 0,671 0,655 0,589 0,645 0,625 densité mini 0,558 densité inter 0,615 0,672 densité maxi 0,729	BE Isoroy cyprès
0,728 0,590 0,618 0,718 0,597 0,694 0,692 0,571 0,664 0,695 0,605 0,616 0,558 0,624 0,694 0,570 0,660 0,614 densité mini 0,558 densité inter 0,614 0,671 densité maxi 0,728	0,728 0,590 0,618 0,718 0,597 0,694 0,692 0,571 0,664 0,695 0,605 0,616 0,558 0,624 0,694 0,570 0,660 0,614 densité mini 0,558 densité inter 0,615 0,672 densité maxi 0,729	BF Isoroy cyprès

Densité par panneau	Densité par type de panneau	Panneau
 densité mini 0,550 densité inter 0,621 0,692 densité maxi 0,763	 densité mini 0,550 densité inter 0,615 0,672 densité maxi 0,773	G lignine cyprès
 densité mini 0,590 densité inter 0,633 0,676 densité maxi 0,720	 densité mini 0,550 densité inter 0,615 0,672 densité maxi 0,773	H lignine cyprès
 densité mini 0,622 densité inter 0,659 0,697 densité maxi 0,734	 densité mini 0,550 densité inter 0,615 0,672 densité maxi 0,773	I lignine cyprès

Densité par panneau	Densité par type de panneau	Panneau
 densité mini 0,569 densité inter 0,630 0,691 densité maxi 0,752	 densité mini 0,550 densité inter 0,615 0,672 densité maxi 0,773	A tanin cyprès
 densité mini 0,579 densité inter 0,644 0,709 densité maxi 0,773	 densité mini 0,550 densité inter 0,615 0,672 densité maxi 0,773	B tanin cyprès
 densité mini 0,584 densité inter 0,640 0,695 densité maxi 0,750	 densité mini 0,550 densité inter 0,615 0,672 densité maxi 0,773	C tanin cyprès

Densité par panneau	Densité par type de panneau	Panneau
 densité mini 0,517 densité inter 0,614 densité maxi 0,712 0,809	 densité mini 0,517 densité inter 0,614 densité maxi 0,712 0,809	BG Isoroy pin
 densité mini 0,584 densité inter 0,639 densité maxi 0,695 0,751	 densité mini 0,517 densité inter 0,614 densité maxi 0,712 0,809	BH Isoroy pin
 densité mini 0,599 densité inter 0,668 densité maxi 0,737 0,806	 densité mini 0,517 densité inter 0,614 densité maxi 0,712 0,809	BJ Isoroy pin

Densité par panneau	Densité par type de panneau	Panneau
 densité mini 0,565 densité inter 0,641 0,716 densité maxi 0,792	 densité mini 0,565 densité inter 0,614 0,712 densité maxi 0,793	E lignine pin
 densité mini 0,589 densité inter 0,632 0,675 densité maxi 0,719	 densité mini 0,565 densité inter 0,614 0,712 densité maxi 0,793	D lignine pin
 densité mini 0,591 densité inter 0,650 0,708 densité maxi 0,766	 densité mini 0,565 densité inter 0,614 0,712 densité maxi 0,793	F lignine pin

Densité par panneau	Densité par type de panneau	Panneau
0,746 0,731 0,644 0,615 0,665 0,626 0,601 0,743 0,760 0,590 0,730 0,663 0,713 0,686 0,641 0,581 0,666 0,760 densité mini 0,581 densité inter 0,641 0,700 densité maxi 0,760	0,746 0,731 0,644 0,615 0,665 0,626 0,601 0,743 0,760 0,590 0,730 0,663 0,713 0,686 0,641 0,581 0,666 0,760 densité mini 0,565 densité inter 0,614 0,712 densité maxi 0,793	P tanin pin
0,690 0,760 0,686 0,601 0,736 0,589 0,588 0,612 0,793 0,676 0,577 0,674 0,751 0,772 0,674 0,711 0,693 0,775 densité mini 0,577 densité inter 0,649 0,721 densité maxi 0,793	0,690 0,760 0,686 0,601 0,736 0,589 0,588 0,612 0,793 0,676 0,577 0,674 0,751 0,772 0,674 0,711 0,693 0,775 densité mini 0,565 densité inter 0,614 0,712 densité maxi 0,793	Q tanin pin
0,704 0,741 0,717 0,608 0,759 0,724 0,704 0,666 0,743 0,656 0,673 0,696 0,702 0,771 0,719 0,745 0,689 0,733 densité mini 0,608 densité inter 0,662 0,717 densité maxi 0,771	0,704 0,741 0,717 0,608 0,759 0,724 0,704 0,666 0,743 0,656 0,673 0,696 0,702 0,771 0,719 0,745 0,689 0,733 densité mini 0,565 densité inter 0,614 0,712 densité maxi 0,793	R tanin pin

Densité par panneau	Densité par type de panneau	Panneau
0,770 0,641 0,709 0,708 0,000 0,589 0,780 0,752 0,821 0,670 0,613 0,663 0,753 0,697 0,666 0,650 0,823 densité mini 0,589 densité inter 0,667 0,745 densité maxi 0,823	0,770 0,641 0,709 0,708 0,000 0,589 0,780 0,752 0,821 0,670 0,613 0,663 0,753 0,697 0,666 0,650 0,823 densité mini 0,589 densité inter 0,668 0,747 densité maxi 0,827	BK Isoroy robinier
0,783 0,741 0,694 0,645 0,752 0,609 0,629 0,715 0,827 0,763 0,596 0,639 0,658 0,660 0,706 0,701 0,698 0,690 densité mini 0,596 densité inter 0,673 0,750 densité maxi 0,827	0,783 0,741 0,694 0,645 0,752 0,609 0,629 0,715 0,827 0,763 0,596 0,639 0,658 0,660 0,706 0,701 0,698 0,690 densité mini 0,589 densité inter 0,668 0,747 densité maxi 0,827	BL Isoroy robinier
0,690 0,637 0,627 0,738 0,685 0,643 0,622 0,700 0,760 0,694 0,633 0,669 0,670 0,731 0,627 0,621 0,621 0,663 densité mini 0,621 densité inter 0,667 0,714 densité maxi 0,760	0,690 0,637 0,627 0,738 0,685 0,643 0,622 0,700 0,760 0,694 0,633 0,669 0,670 0,731 0,627 0,621 0,621 0,663 densité mini 0,589 densité inter 0,668 0,747 densité maxi 0,827	BM Isoroy robinier

Densité par panneau	Densité par type de panneau	Panneau
0,689 0,688 0,649 0,598 0,637 0,645 0,581 0,633 0,691 0,724 0,577 0,624 0,619 0,693 0,597 0,630 0,621 0,692 densité mini 0,577 densité inter 0,626 0,675 densité maxi 0,724	0,689 0,688 0,649 0,598 0,637 0,645 0,581 0,633 0,691 0,724 0,577 0,624 0,619 0,693 0,597 0,630 0,621 0,692 densité mini 0,491 densité inter 0,578 0,664 densité maxi 0,751	AB lignine robinier
0,665 0,666 0,658 0,573 0,728 0,710 0,618 0,639 0,644 0,737 0,654 0,604 0,607 0,677 0,747 0,602 0,721 0,676 densité mini 0,573 densité inter 0,631 0,689 densité maxi 0,747	0,665 0,666 0,658 0,573 0,728 0,710 0,618 0,639 0,644 0,737 0,654 0,604 0,607 0,677 0,747 0,602 0,721 0,676 densité mini 0,491 densité inter 0,578 0,664 densité maxi 0,751	Y lignine robinier
0,709 0,653 0,720 0,628 0,683 0,677 0,579 0,638 0,682 0,719 0,582 0,657 0,596 0,729 densité mini 0,579 densité inter 0,629 0,679 densité maxi 0,729	0,709 0,653 0,720 0,628 0,683 0,677 0,579 0,638 0,682 0,719 0,582 0,657 0,596 0,729 densité mini 0,491 densité inter 0,578 0,664 densité maxi 0,751	Z lignine robinier

Densité par panneau	Densité par type de panneau	Panneau
0,566 0,639 0,552 0,614 0,596 0,630 0,668 0,616 0,663 0,659 0,715 0,707 0,645 0,532 0,627 0,706 densité mini 0,532 densité inter 0,593 0,654 densité maxi 0,715	0,566 0,639 0,552 0,614 0,596 0,630 0,668 0,616 0,663 0,659 0,715 0,707 0,645 0,532 0,627 0,706 densité mini 0,491 densité inter 0,578 0,664 densité maxi 0,751	AP tanin robinier
0,735 0,627 0,631 0,748 0,547 0,677 0,491 0,687 0,729 0,587 0,603 0,546 0,561 0,723 0,582 0,532 0,672 0,638 densité mini 0,491 densité inter 0,577 0,662 densité maxi 0,748	0,735 0,627 0,631 0,748 0,547 0,677 0,491 0,687 0,729 0,587 0,603 0,546 0,561 0,723 0,582 0,532 0,672 0,638 densité mini 0,491 densité inter 0,578 0,664 densité maxi 0,751	AQ tanin robinier
0,717 0,580 0,676 0,726 0,657 0,622 0,656 0,703 0,751 0,608 0,550 0,605 0,640 0,696 0,719 0,565 0,561 0,672 densité mini 0,550 densité inter 0,617 0,684 densité maxi 0,751	0,717 0,580 0,676 0,726 0,657 0,622 0,656 0,703 0,751 0,608 0,550 0,605 0,640 0,696 0,719 0,565 0,561 0,672 densité mini 0,491 densité inter 0,578 0,664 densité maxi 0,751	AR tanin robinier

Densité par panneau	Densité par type de panneau	Panneau
0,716 0,638 0,747 0,683 0,698 0,662 0,668 0,669 0,762 0,796 0,690 0,585 0,682 0,722 0,766 0,672 0,627 0,726 densité mini 0,585 densité inter 0,655 0,725 densité maxi 0,796	0,716 0,638 0,747 0,683 0,698 0,662 0,668 0,669 0,762 0,796 0,690 0,585 0,682 0,722 0,766 0,672 0,627 0,726 densité mini 0,559 densité inter 0,638 0,717 densité maxi 0,796	S tanin cyprès- 75%pin
0,675 0,663 0,626 0,654 0,729 0,625 0,681 0,684 0,707 0,722 0,661 0,681 0,738 0,675 0,698 0,784 0,698 0,702 densité mini 0,625 densité inter 0,678 0,731 densité maxi 0,784	0,675 0,663 0,626 0,654 0,729 0,625 0,681 0,684 0,707 0,722 0,661 0,681 0,738 0,675 0,698 0,784 0,698 0,702 densité mini 0,559 densité inter 0,638 0,717 densité maxi 0,796	T tanin cyprès- 75%pin
0,773 0,783 0,715 0,685 0,697 0,649 0,680 0,668 0,732 0,625 0,635 0,700 0,722 0,696 0,729 0,730 0,745 densité mini 0,625 densité inter 0,677 0,730 densité maxi 0,783	0,773 0,783 0,715 0,685 0,697 0,649 0,680 0,668 0,732 0,625 0,635 0,700 0,722 0,696 0,729 0,730 0,745 densité mini 0,559 densité inter 0,638 0,717 densité maxi 0,796	U tanin cyprès- 75%pin

Densité par panneau	Densité par type de panneau	Panneau
0,701 0,634 0,625 0,658 0,709 0,596 0,623 0,650 0,726 0,618 0,665 0,612 0,705 0,697 0,641 0,664 0,675 0,672 densité mini 0,596 densité inter 0,640 0,683 densité maxi 0,726	0,701 0,634 0,625 0,658 0,709 0,596 0,623 0,650 0,726 0,618 0,665 0,612 0,705 0,697 0,641 0,664 0,675 0,672 densité mini 0,559 densité inter 0,638 0,717 densité maxi 0,796	J lignine cyprès- 75%pin
0,720 0,685 0,642 0,677 0,638 0,628 0,667 0,615 0,659 0,584 0,589 0,633 0,641 0,667 0,627 0,664 0,672 0,630 densité mini 0,584 densité inter 0,629 0,674 densité maxi 0,720	0,720 0,685 0,642 0,677 0,638 0,628 0,667 0,615 0,659 0,584 0,589 0,633 0,641 0,667 0,627 0,664 0,672 0,630 densité mini 0,559 densité inter 0,638 0,717 densité maxi 0,796	K lignine cyprès- 75%pin
0,641 0,610 0,734 0,702 0,615 0,590 0,633 0,703 0,652 0,681 0,559 0,601 0,596 0,669 0,617 0,651 0,699 0,653 densité mini 0,559 densité inter 0,617 0,675 densité maxi 0,734	0,641 0,610 0,734 0,702 0,615 0,590 0,633 0,703 0,652 0,681 0,559 0,601 0,596 0,669 0,617 0,651 0,699 0,653 densité mini 0,559 densité inter 0,638 0,717 densité maxi 0,796	L lignine cyprès- 75%pin

Densité par panneau	Densité par type de panneau	Panneau
0,732 0,750 0,726 0,675 0,764 0,645 0,652 0,654 0,708 0,770 0,672 0,657 0,668 0,641 0,671 0,703 0,700 0,731 densité mini 0,641 densité inter 0,684 0,727 densité maxi 0,770	0,732 0,750 0,726 0,675 0,764 0,645 0,652 0,654 0,708 0,770 0,672 0,657 0,668 0,641 0,671 0,703 0,700 0,731 densité mini 0,537 densité inter 0,619 0,700 densité maxi 0,782	AK tanin robinier- 75%pin
0,678 0,689 0,638 0,601 0,691 0,753 0,580 0,687 0,654 0,729 0,681 0,651 0,614 0,684 0,586 0,683 0,626 0,677 densité mini 0,580 densité inter 0,637 0,695 densité maxi 0,753	0,678 0,689 0,638 0,601 0,691 0,753 0,580 0,687 0,654 0,729 0,681 0,651 0,614 0,684 0,586 0,683 0,626 0,677 densité mini 0,537 densité inter 0,619 0,700 densité maxi 0,782	AN tanin robinier- 75%pin
0,650 0,711 0,709 0,623 0,699 0,704 0,634 0,713 0,712 0,678 0,706 0,660 0,741 0,752 0,670 0,723 0,688 0,697 densité mini 0,623 densité inter 0,666 0,709 densité maxi 0,752	0,650 0,711 0,709 0,623 0,699 0,704 0,634 0,713 0,712 0,678 0,706 0,660 0,741 0,752 0,670 0,723 0,688 0,697 densité mini 0,537 densité inter 0,619 0,700 densité maxi 0,782	AO tanin robinier- 75%pin

Densité par panneau	Densité par type de panneau	Panneau
0,749 0,674 0,712 0,716 0,666 0,589 0,653 0,719 0,725 0,617 0,597 0,628 0,687 0,682 0,669 0,651 0,656 0,698 densité mini 0,589 densité inter 0,643 0,696 densité maxi 0,749	0,749 0,674 0,712 0,716 0,666 0,589 0,653 0,719 0,725 0,617 0,597 0,628 0,687 0,682 0,669 0,651 0,656 0,698 densité mini 0,537 densité inter 0,619 0,700 densité maxi 0,782	AC lignine robinier- 75%pin
0,647 0,672 0,637 0,640 0,648 0,658 0,609 0,625 0,716 0,617 0,661 0,639 0,694 0,653 0,678 0,736 0,726 0,699 densité mini 0,609 densité inter 0,651 0,693 densité maxi 0,736	0,647 0,672 0,637 0,640 0,648 0,658 0,609 0,625 0,716 0,617 0,661 0,639 0,694 0,653 0,678 0,736 0,726 0,699 densité mini 0,537 densité inter 0,619 0,700 densité maxi 0,782	AD lignine robinier- 75%pin
0,735 0,537 0,648 0,628 0,744 0,663 0,689 0,606 0,721 0,694 0,678 0,622 0,589 0,660 0,727 0,700 0,572 0,782 densité mini 0,537 densité inter 0,619 0,700 densité maxi 0,782	0,735 0,537 0,648 0,628 0,744 0,663 0,689 0,606 0,721 0,694 0,678 0,622 0,589 0,660 0,727 0,700 0,572 0,782 densité mini 0,537 densité inter 0,619 0,700 densité maxi 0,782	AE lignine robinier- 75%pin

Densité par panneau	Densité par type de panneau	Panneau
0.646 0.681 0.617 0.732 0.664 0.659 0.582 0.632 0.741 0.642 0.643 0.594 0.700 0.740 0.630 0.754 0.692 0.725 densité mini 0.582 densité inter 0.639 0.696 densité maxi 0.754	0.646 0.681 0.617 0.732 0.664 0.659 0.582 0.632 0.741 0.642 0.643 0.594 0.700 0.740 0.630 0.754 0.692 0.725 densité mini 0.557 densité inter 0.629 0.701 densité maxi 0.774	V tanin cyprès Pin 50%
0.691 0.707 0.609 0.653 0.774 0.618 0.661 0.588 0.737 0.644 0.634 0.603 0.724 0.717 0.679 0.724 0.731 0.715 densité mini 0.588 densité inter 0.650 0.712 densité maxi 0.774	0.691 0.707 0.609 0.653 0.774 0.618 0.661 0.588 0.737 0.644 0.634 0.603 0.724 0.717 0.679 0.724 0.731 0.715 densité mini 0.557 densité inter 0.629 0.701 densité maxi 0.774	W tanin cyprès Pin 50%
0.749 0.678 0.732 0.657 0.705 0.729 0.663 0.637 0.631 0.761 0.606 0.668 0.583 0.650 0.670 0.690 0.665 0.644 densité mini 0.583 densité inter 0.643 0.702 densité maxi 0.761	0.749 0.678 0.732 0.657 0.705 0.729 0.663 0.637 0.631 0.761 0.606 0.668 0.583 0.650 0.670 0.690 0.665 0.644 densité mini 0.557 densité inter 0.629 0.701 densité maxi 0.774	X tanin cyprès Pin 50%

Densité par panneau	Densité par type de panneau	Panneau
0.682 0.655 0.601 0.649 0.636 0.642 0.620 0.591 0.640 0.634 0.643 0.597 0.636 0.623 0.621 0.680 0.604 0.702 densité mini 0.591 densité inter 0.628 0.665 densité maxi 0.702	0.682 0.655 0.601 0.649 0.636 0.642 0.620 0.591 0.640 0.634 0.643 0.597 0.636 0.623 0.621 0.680 0.604 0.702 densité mini 0.557 densité inter 0.629 0.701 densité maxi 0.774	M lignine cyprès Pin 50%
0.622 0.637 0.638 0.606 0.675 0.647 0.610 0.583 0.682 0.601 0.599 0.557 0.680 0.719 0.577 0.700 0.696 0.667 densité mini 0.557 densité inter 0.611 0.665 densité maxi 0.719	0.622 0.637 0.638 0.606 0.675 0.647 0.610 0.583 0.682 0.601 0.599 0.557 0.680 0.719 0.577 0.700 0.696 0.667 densité mini 0.557 densité inter 0.629 0.701 densité maxi 0.774	N lignine cyprès Pin 50%
0.656 0.627 0.664 0.700 0.692 0.650 0.595 0.624 0.703 0.731 0.629 0.666 0.590 0.640 0.679 0.633 0.643 0.661 densité mini 0.590 densité inter 0.637 0.684 densité maxi 0.731	0.656 0.627 0.664 0.700 0.692 0.650 0.595 0.624 0.703 0.731 0.629 0.666 0.590 0.640 0.679 0.633 0.643 0.661 densité mini 0.557 densité inter 0.629 0.701 densité maxi 0.774	O lignine cyprès Pin 50%

Densité par panneau	Densité par type de panneau	Panneau
0,802 0,702 0,654 0,578 0,641 0,545 0,653 0,630 0,568 0,622 0,521 0,610 0,564 0,724 0,666 0,623 0,697 0,665 densité mini 0,521 densité inter 0,615 0,708 densité maxi 0,802	0,802 0,702 0,654 0,578 0,641 0,545 0,653 0,630 0,568 0,622 0,521 0,610 0,564 0,724 0,666 0,623 0,697 0,665 densité mini 0,521 densité inter 0,615 0,708 densité maxi 0,802	AF lignine robinier- 50%pin
0,658 0,614 0,649 0,632 0,679 0,682 0,634 0,722 0,715 0,632 0,564 0,611 0,641 0,702 0,714 0,703 0,655 0,703 densité mini 0,564 densité inter 0,617 0,669 densité maxi 0,722	0,658 0,614 0,649 0,632 0,679 0,682 0,634 0,722 0,715 0,632 0,564 0,611 0,641 0,702 0,714 0,703 0,655 0,703 densité mini 0,521 densité inter 0,615 0,708 densité maxi 0,802	AH lignine robinier- 50%pin
0,635 0,720 0,641 0,582 0,663 0,730 0,613 0,664 0,782 0,634 0,647 0,627 0,748 0,721 0,646 0,636 0,708 0,693 densité mini 0,582 densité inter 0,649 0,715 densité maxi 0,782	0,635 0,720 0,641 0,582 0,663 0,730 0,613 0,664 0,782 0,634 0,647 0,627 0,748 0,721 0,646 0,636 0,708 0,693 densité mini 0,521 densité inter 0,615 0,708 densité maxi 0,802	AG lignine robinier- 50%pin

Densité par panneau	Densité par type de panneau	Panneau
0,686 0,711 0,673 0,611 0,743 0,698 0,640 0,702 0,588 0,676 0,614 0,620 0,676 0,683 0,651 0,665 0,704 0,690 densité mini 0,588 densité inter 0,639 0,691 densité maxi 0,743	0,686 0,711 0,673 0,611 0,743 0,698 0,640 0,702 0,588 0,676 0,614 0,620 0,676 0,683 0,651 0,665 0,704 0,690 densité mini 0,521 densité inter 0,615 0,708 densité maxi 0,802	AJ tanin robinier- 50%pin
0,736 0,662 0,682 0,653 0,745 0,648 0,605 0,657 0,697 0,687 0,654 0,698 0,658 0,680 0,649 0,789 0,671 0,779 densité mini 0,605 densité inter 0,666 0,728 densité maxi 0,789	0,736 0,662 0,682 0,653 0,745 0,648 0,605 0,657 0,697 0,687 0,654 0,698 0,658 0,680 0,649 0,789 0,671 0,779 densité mini 0,521 densité inter 0,615 0,708 densité maxi 0,802	AL tanin robinier- 50%pin

D. Essai de traction perpendiculaire avec des profilés en 'I' :

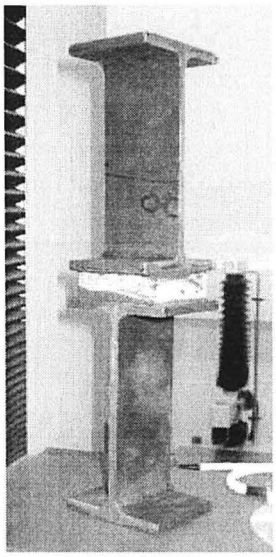


Figure D.1. *Eprouvette collée sur des profilés en I.*

On a remplacé les plaques métalliques par des profilés en 'I' (figure D.1). Avec ces profilés, les phénomènes de flexion sont bien moins présents que avec les plaques et par conséquent le champ de contrainte devrait être plus homogène. Comme le montre la simulation numérique, on obtient une répartition plus uniforme des contraintes (figure D.2) : la variation des contraintes σ_{yy} sur une section moyenne est de l'ordre de 1MPa avec les profilés en 'I' alors qu'avec les plaques métalliques, la variation est d'environ 1,8MPa pour une contrainte moyenne de 1,3MPa.

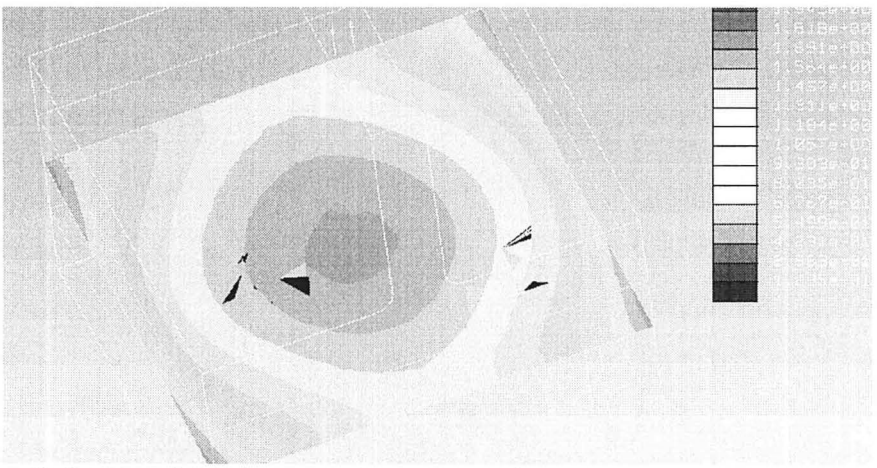


Figure D.2. Répartition des contraintes de traction σ_{yy} sur une section moyenne de l'éprouvette sollicitée par l'intermédiaire de profilé en 'I'.

E. Mesure de déformation [Asch, 1999]

Pour calculer les modules d'élasticité des échantillons d'OSB, il fallait que nous puissions mesurer correctement l'allongement sous charge des éprouvettes pour pouvoir en déduire leur déformation moyenne. Nous avons essayé d'utiliser différents dispositifs de mesure, chacun avec leurs avantages et leurs inconvénients.

a. Mesure par l'intermédiaire des capteurs de déplacement de la machine de traction

La première solution consiste à utiliser directement le capteur de déplacement de la traverse mobile de la machine de traction : dans notre cas on utilise une machine MTS électromécanique avec son logiciel de commande sur PC. Les résultats donnés par cette méthode ont l'avantage d'être immédiats en ce sens qu'ils sont affichés directement par le logiciel informatique qui pilote la machine. Cependant, lorsque l'on mesure les déplacements avec ce système, on ne mesure pas uniquement la déformation de l'échantillon mais aussi de la machine, des mors, du montage, du capteur de force,... Il faudra donc pouvoir quantifier les déplacements dus à la machine pour déterminer si ils sont négligeables ou pas devant les déplacements dus à l'échantillon. Si ce n'est pas le cas, il faudra soustraire les déplacements de la machine aux déplacements totaux mesurés, pour obtenir l'allongement de l'échantillon. En pratique, on verra que ceci peut poser des problèmes de justesse de mesure. Pour notre machine, le capteur a une précision de mesure de déplacement de 1µm. Dans notre cas, l'échantillon faisant environ 15mm d'épaisseur, la précision de mesure du capteur est théoriquement d'environ 10^{-4} en déformation si l'on ne tient pas compte des imprécisions pouvant venir de la cinématique de la machine.

b. Mesure par comparateur (capteur de déplacement)

Ici, on utilise un comparateur (de préférence interfaçable avec un ordinateur) pour mesurer le déplacement et en déduire la déformation moyenne de l'échantillon. La justesse des valeurs obtenues par le comparateur dépend de la localisation des points entre lesquels la déformation moyenne est estimée : plus on mesure le déplacement près de l'échantillon et plus la valeur sera précise. S'il n'est pas possible de mesurer uniquement la déformée de l'échantillon, il faudra encore une fois tenir compte de la déformation des pièces intermédiaires, moins nombreuses, entre l'échantillon et les points de mesure du comparateur. Cette méthode est relativement simple à mettre en œuvre. De plus le matériel utilisé est peu onéreux et très courant dans les laboratoires.
La précision de nos comparateurs est de 1µm en déplacement. Dans notre cas, l'échantillon faisant environ 15mm d'épaisseur, la précision de mesure du comparateur est de environ 10^{-4} en déformation.

c. Mesure par des jauges de déformations

Le principe consiste à venir coller sur au moins deux faces opposées de l'éprouvette des jauges de déformations afin de mesurer la déformation moyenne de l'éprouvette sous la jauge au cours de l'essai. Cette solution offre une très bonne précision en mesure de déformation : 10^{-6}. Cependant, le panneau OSB étant un matériau très hétérogène, pour obtenir des résultats exploitables il faudrait que les jauges soient beaucoup plus grandes que l'épaisseur des lamelles de bois (environ 1mm) constituants le matériau pour ne pas risquer de mesurer des phénomènes locaux dans le panneau. Etant donné que nos échantillons ne font que 12 à 15 mm d'épaisseur, si on utilisait des jauges de grande taille (au moins 10 fois supérieures à la taille de l'hétérogénéité donc environ de 12-13mm), elles viendraient trop près des bords de l'éprouvette et on mesurait des phénomènes de bord. Cette solution parait donc difficilement envisageable dans notre cas. De plus elle est relativement lourde à mettre en œuvre (collage des jauges sur les éprouvettes, câblages des jauges,...).

d. Mesure par caméra et traitement d'image [Wattrisse, 2000]

On peut mesurer le champ de déformation d'une face de l'éprouvette par l'intermédiaire d'une caméra. Il faut placer des repères visibles par la caméra sur l'éprouvette afin de pouvoir analyser, par traitement d'image sur PC, le déplacement relatif de chacun de ces repères et d'en déduire les composantes du tenseur de déformation (en surface) moyen entre ces points au cours de l'essai. Le schéma de principe est présenté en figure E.1.

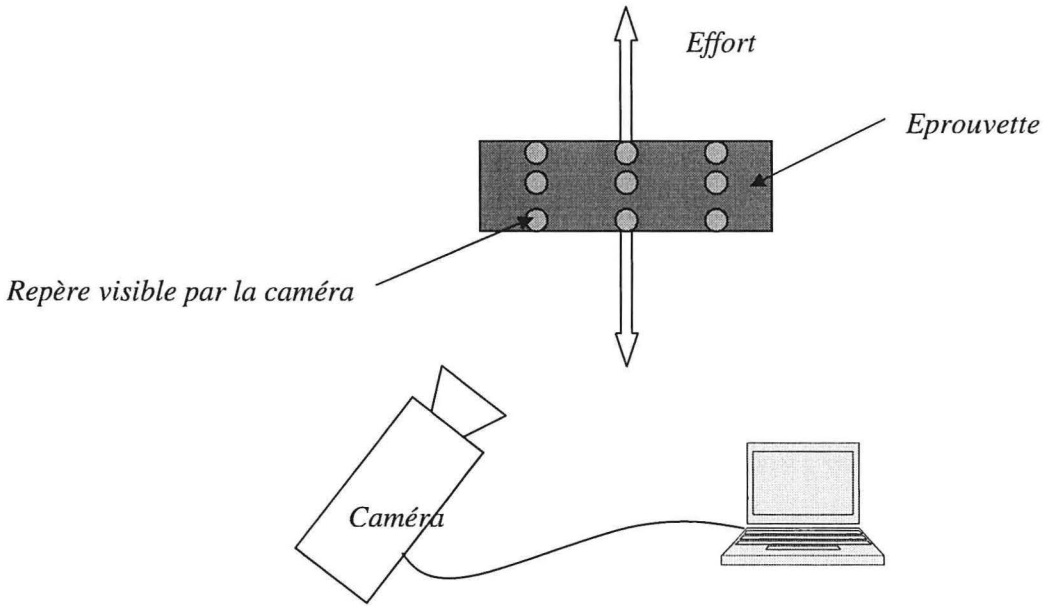


Figure EE.1.Schéma de principe.

Ce procédé utilise un matériel coûteux, « difficile » et long à mettre en place (utilisation de logiciels spécifiques, dépouillement des résultats...). Aussi, le travail pour obtenir les résultats d'un essai est assez lourd. De plus, cette méthode marche bien pour les grands déplacements mais moins pour les petits déplacements ou faibles déformations (ce qui est notre cas en élasticité). On a une précision classiquement de l'ordre de 10^{-4} en déformation comme pour le comparateur.

F. Essai sur échantillon de bois massif

a. Essai sur échantillon de bois massif avec plaques caoutchouc

On a intercalé une plaque de caoutchouc de même surface que l'éprouvette entre celle-ci et les plateaux. Cette plaque devrait permettre de « combler » les écarts entre la surface du plateau et celle de l'éprouvette, d'assurer un meilleur contact et ainsi de répartir plus uniformément les contraintes sur la surface.

On réalise donc un essai avec une éprouvette de pin sylvestre plus les plaques (figure F.1), ainsi qu'un essai avec uniquement les plaques caoutchouc et une éprouvette considérée infiniment rigide comparée aux éprouvettes en bois (un plat en acier) entre les deux plaques caoutchouc. Ce dernier essai devrait permettre d'estimer la déformation du nouveau système de compression en fonction de la charge.

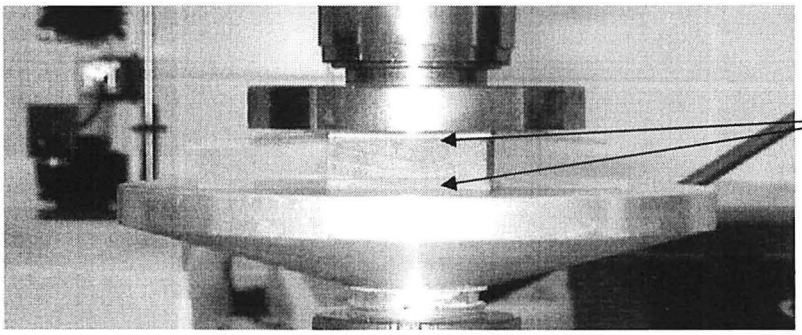


Figure F.1. *Essai avec les plaques en caoutchouc sur un échantillon en pin sylvestre*

Les essais réalisés ainsi ne sont pas concluants et donnent des résultats inexploitables.
En effet en plaçant ces plaques en caoutchouc, dont la raideur $K_{caoutchouc}$ est faible devant celle du bois $K_{échantillon}$ et de la machine $K_{machine}$, on est venu rajouter une raideur en série à notre système. La raideur totale K_t est donc devenue:

$$\frac{1}{K_t} = \frac{1}{K_{machine}} + \frac{1}{K_{échantllion}} + \frac{1}{K_{caoutchouc}}.$$

On voit ainsi que si la raideur des plaques en caoutchouc est faible devant les autres raideurs, alors $\frac{1}{K_{caoutchouc}}$ devient grand devant leurs inverses. L'influence des autres raideurs devient trop faible devant la raideur du caoutchouc et la mesure de la rigidité totale est trop influencée par la rigidité du caoutchouc pour donner des résultats exploitables sur la rigidité de l'échantillon. C'est pourquoi, les résultats obtenus ne sont pas concluants.

b. Mesure de déformation avec comparateurs

Afin d'améliorer les mesures de module d'élasticité, on a essayé de changer la méthode de mesure des déplacements. On réalise nos mesures grâce à deux comparateurs électroniques disposés de part et d'autre de l'échantillon (figure F.2).

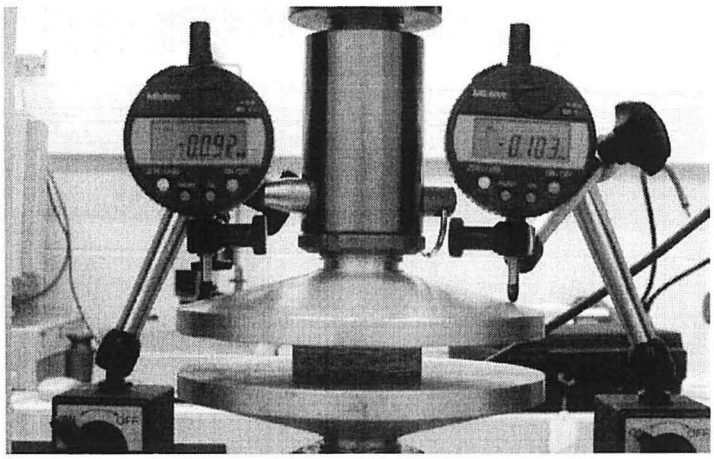


Figure FF.2.Mesure à l'aide de deux comparateurs.

On utilise deux comparateurs pour avoir une valeur du déplacement plus précise. En effet, le plateau supérieur étant rotulé, un seul comparateur mesurerait non seulement la déformation de l'échantillon mais aussi les effets de rotulage du plateau. En se servant de deux comparateurs placés à l'opposé l'un de l'autre, on peut faire une moyenne des valeurs données par les deux comparateurs et ainsi obtenir la déformation moyenne de l'échantillon dans le plan des deux comparateurs. On notera que l'idéal aurait été de placer trois comparateurs à 120° pour supprimer le risque de rotulage sur les deux axes du plateau, mais l'espace autour de l'échantillon n'était pas suffisant pour disposer les trois comparateurs dont nous disposions.

On réalise les essais avec une vitesse de déplacement de 0,5µm/s et on obtient sensiblement les mêmes courbes de compression qu'avec le capteur de la machine corrigé, comme illustré sur la figure F.3.

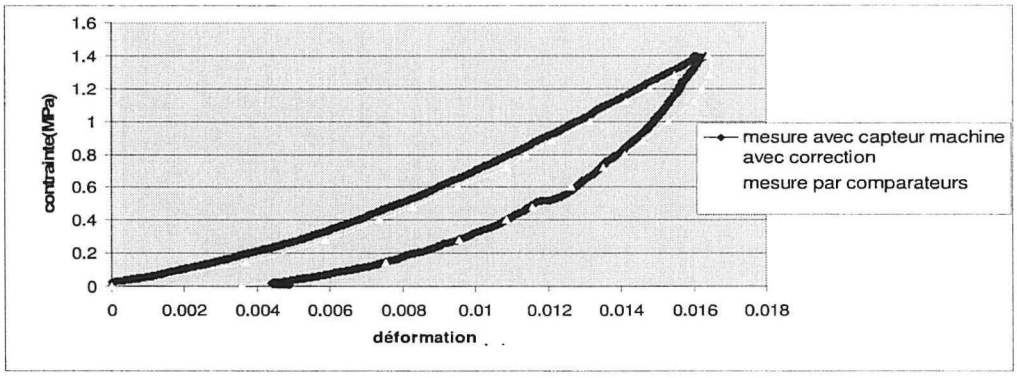


Figure FF.3.Courbes de compression par mesure avec capteur machine corrigé et comparateurs sur un échantillon d'OSB du commerce.

G. Calcul d'erreur pour la mesure des modules d'élasticité

On a $\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta \sigma}{\sigma} + \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}$.

Or $\sigma = \frac{F}{S}$ et $\varepsilon = \frac{\Delta e}{e}$

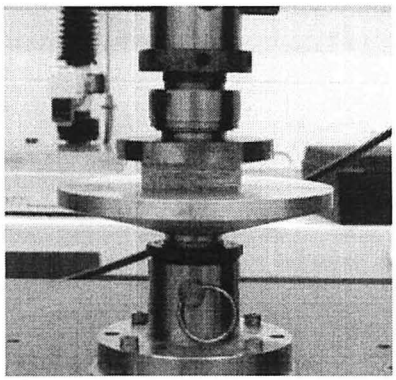
On obtient alors :

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta F}{F} + 2\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta e}{e} + \frac{\Delta \delta L}{\delta L}$$

Où 'a' est le coté de l'éprouvette, 'e' son épaisseur et 'δL' le déplacement mesuré par le capteur.

Avec les instruments de mesure utilisés (pied à coulisse, comparateur au micromètre, cellule de force de 5kN,...) et pour un échantillon de 50*50*15mm, on obtient une valeur de $\Delta E/E$ minimale de l'ordre de 5%.

H. Protocole : essai de compression sur éprouvettes de section 50x50 mm extraites de panneaux OSB



♥ **Matériel utilisé :**

Les essais sont réalisés sur la machine de traction MTS équipée de la cellule de 5KN. On utilise les mors rotulés pour palier à d'éventuels défauts de parallélisme entre les surfaces d'appuis de l'éprouvette.

♥ **Programme d'essai :**

Le programme utilisé est le programme « compressioncubeOSB » enregistré dans le fichier « mab » de l'ordinateur de commande.
Ce cycle d'essai comprend :

- une précharge de 10N correspondant à la mise en place de l'éprouvette et du dispositif d'essai.
- une montée en charge jusqu'à 2500N à vitesse constante de 2 µm/s.
- une décharge jusqu'à 10N à vitesse constante de 2µm/s.
- un retour à la position initiale de la traverse.

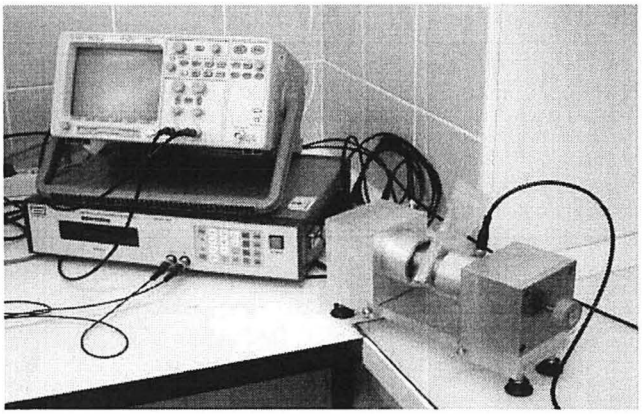
♥ **Essai :**

On prend soin de bien ébavurer les surfaces de contact et de rendre la surface d'appui la plus lisse et plane possible pour optimiser le contact entre les plateaux et l'éprouvette.
On dispose l'éprouvette le plus possible au centre des plateaux rotulés pour répartir au mieux les contraintes dans l'échantillon.
On peut à présent lancer l'essai.

♥ **Résultat :**

On obtient une courbe donnant les efforts de compression en fonction du déplacement de la traverse. Pour remonter au module de Young, il faut tracer une courbe donnant les contraintes en fonction de la déformation de l'échantillon. Pour cela, il faut ôter au déplacement mesuré celui dû à la machine. Après avoir réalisé un essai « plateau contre plateau», on peut déterminer de façon précise la déformation de l'échantillon pour chaque valeur de contrainte en corrigeant le déplacement de la machine par la fonction « regval » développée par Joseph Gril. Le déplacement ainsi obtenu est divisé par l'épaisseur moyenne de l'échantillon afin d'obtenir la déformation moyenne de celui-ci.
En s'intéressant à la courbe de décharge, on peut ainsi obtenir le module de Young de l'échantillon.

I. Protocole : essai non destructif en contact direct sur éprouvettes de 50x50 mm extraites de panneaux OSB



♥ **Matériel utilisé :**

Les essais sont réalisés avec le transducteur de 100kHz reliée à un générateur et à un oscilloscope.

♥ **Programme d'essai :**

Le générateur est réglé sur les paramètres suivants :

- Mode = trans
- PRF = 100Hz
- Puiss = 100µJ
- Amort = 15Ω
- Filtre PH = 1KHz
- Filtre PB = 5MHz
- Atten. Entrée = 0dB
- Atten. Sortie = 0dB
- Gain = 60dB
- Sensibilité = 105,9dB

♥ **Essai :**

On place l'éprouvette dans un film plastique d'épaisseur négligeable.
Avant de placer l'échantillon et son sachet entre les bornes de l'émetteur récepteur, on enduit le sachet de gel complant.

♥ **Résultat :**

On relève sur l'oscilloscope le temps de vol ; c'est-à-dire le temps entre le signal de synchronisation et le début de l'apparition du signal sur l'écran. Pratiquement, on mesure le temps entre le signal de synchronisation et le premier maximum atteint observé sur l'écran. On mesure ensuite la période du signal et on retranche, au temps mesuré, le quart de la période afin d'avoir précisément le début d'apparition du signal :

$$t_{vol} = t_1 + 0{,}25 * T \,. \qquad \text{(F.1)}$$

Connaissant l'épaisseur de l'échantillon, on peut déterminer la vitesse V_l de l'onde dans le bois ; et ensuite, à partir de la masse volumique ρ de l'échantillon, on peut calculer le module de Young de l'éprouvette testée :

$$E = V_l^2 * \rho \,. \qquad \text{(F.2)}$$

J. Calculs préliminaires aux essais.

- Calcul du module d'élasticité en flexion :

Sur la partie centrale de la poutre, nous avons de la flexion pure entre les deux points d'appuis supérieur de la poutre.

Ce moment a pour valeur : $M_f = \frac{F}{2} * l_2$ (F étant la force appliquée à l'éprouvette)

Le barreau de flexion testé est considéré comme une poutre. On utilise alors les formules de la théorie des poutres :

$$M_f = EI_z \frac{d^2 U_x}{dx^2}, \qquad \text{(G.1)}$$

Avec E le module élastique en flexion, I_z le moment quadratique et U_x la déformée de la poutre. En intégrant deux fois l'équation et avec les hypothèses de la figure J.1, on obtient :

$$U_x = \frac{M_f * l_1^2}{8EI_z}. \qquad \text{(G.2)}$$

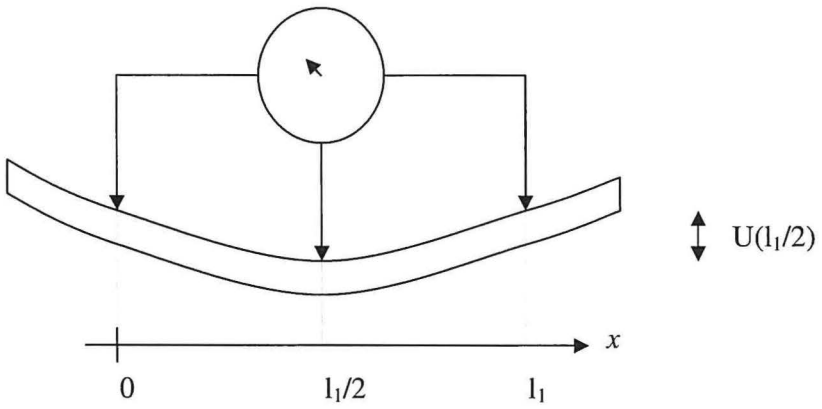


Figure J.1. *Mesure de la flèche ΔU sur la partie en flexion pure de la poutre.*

Le comparateur mesure la flèche maximale ΔU en $x = \frac{l_1}{2}$. On obtient donc en remplaçant x par $\frac{l_1}{2}$, M_f par sa valeur, l'expression du module d'élasticité de flexion :

$$E = \frac{\Delta F * l_1^2 * l_2}{16 * \Delta U * I_z}, \qquad \text{(G.3)}$$

avec $I_z = \frac{bh^3}{12}$, b étant la largeur de l'éprouvette et h sa hauteur.

- Calcul de la contrainte à rupture en flexion :

On a :

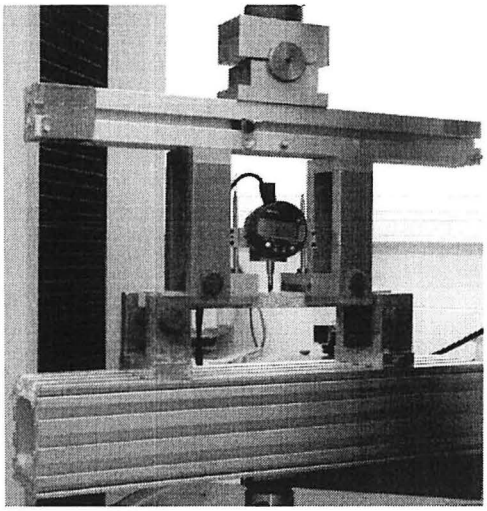
$$\sigma_{max} = \frac{M_{f\,max} * \frac{t}{2}}{\frac{bt^3}{12}} \quad , \tag{G.4}$$

avec t l'épaisseur du panneau et b la largeur de l'éprouvette. On a donc :

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max} l_2}{2W}, \tag{G.5}$$

avec $W = \frac{bt^2}{6}$.

K. Protocole : essai de flexion 4 points sur éprouvettes de 260*40*15mm extraites de panneaux OSB



♥ **Matériel utilisé :**

Les essais sont réalisés sur la machine de traction MTS équipée de la cellule de 5KN. On utilise le bâti de flexion 4 points et un comparateur *Mitutoyo* électronique, interfacé avec le logiciel de MTS, pour la mesure de la flèche.

♥ **Programme d'essai :**

Le programme utilisé est le programme « flexion4pts_OSB » enregistré dans le fichier « mab » de l'ordinateur de commande.
Ce cycle d'essai comprend :

- une précharge de 10N correspondant à la mise en place de l'éprouvette et du dispositif d'essai,
- une montée en charge jusqu'à rupture à vitesse constante. La vitesse est déterminée de manière à rompre l'éprouvette en (300±120)s,
- un retour à la position initiale de la traverse.

♥ **Essai :**

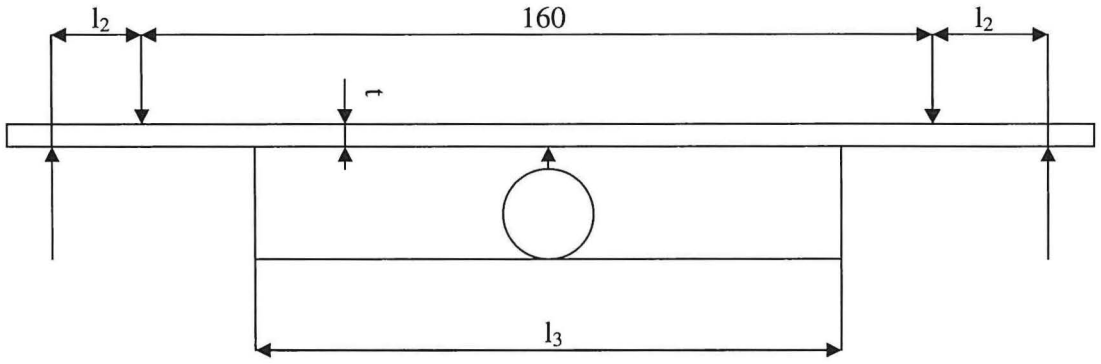
On prend soin de bien ébavurer l'éprouvette.
On place l'échantillon et on approche manuellement le dispositif d'essai. On lance ensuite le programme, et on met à zéro le comparateur après le cycle de précharge.

♥ **Résultat [EN789, 2005] :**

On obtient une courbe donnant les efforts de compression en fonction de la flèche mesurée par le comparateur. Avec la partie linéaire de cette courbe, on peut obtenir le module d'élasticité en flexion de l'éprouvette (équation (G.3)) :

$$E_m = \frac{(F_2 - F_1) * l_1^2 * l_2}{16 * (u_2 - u_1) * I}, \qquad \text{(H.1)}$$

avec | F_2-F_1 l'accroissement de la force sur une proportion linéaire du diagramme.
U_2-U_1 la variation du déplacement correspondant à F_2-F_1.
I le moment d'inertie $I = \frac{b * t^3}{12}$
l_2 et l_3 comme indiqué sur la figure suivante.

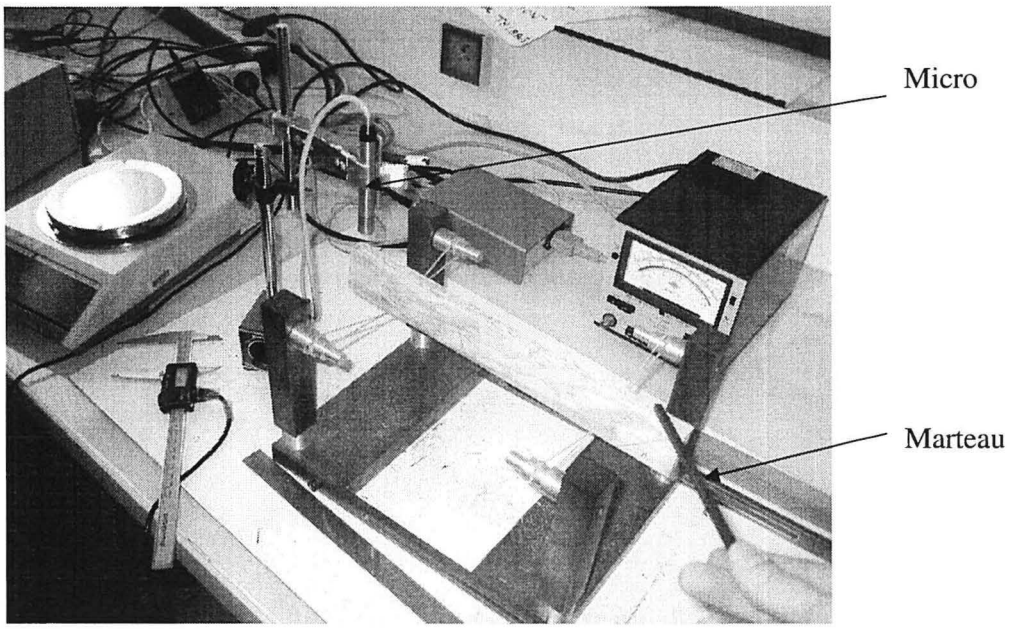


A partir de la valeur maximale, on peut déterminer la résistance à la flexion de l'éprouvette (équation (G.5)) :

$$R_{flex} = \frac{F_{max} * l_2}{2 * W}, \qquad \text{(H.2)}$$

avec W le moment statique, $W = \frac{b * t^2}{6}$.

L. Protocole : essai non destructif « Bing » sur éprouvettes de 260x40 mm extraites de panneaux OSB



♥ **Matériel utilisé :**

Les essais sont réalisés avec le matériel du CIRAD.

♥ **Programme d'essai :**

On utilise le logiciel *YOUNG* et un pied à coulisse interfacé avec l'ordinateur et le logiciel.

♥ **Essai et résultat:**

On place l'éprouvette sur les deux élastiques et le micro à un bout de l'échantillon. Après avoir lancé une acquisition, on donne un coup avec le marteau à l'autre bout de l'éprouvette.
Une fois l'acquisition terminée, on obtient une courbe donnant l'amplitude des vibrations de la poutre en fonction du temps. On clique sur le bouton FFT qui nous donne sa transformée de Fourier en fréquence.
En sélectionnant les pics de la courbe obtenue et en rentrant les dimensions et la masse de l'éprouvette, le logiciel calcul le module d'élasticité, et éventuellement de cisaillement, en flexion du barreau.

M.Calcul des modules en cisaillement [GUITARD, 1987]

- *Mesure des déplacements* :

Pour mesurer les déplacements de l'échantillon, on a intégré un comparateur électronique, relié à l'ordinateur de commande de la machine de traction MTS (figure M.1).

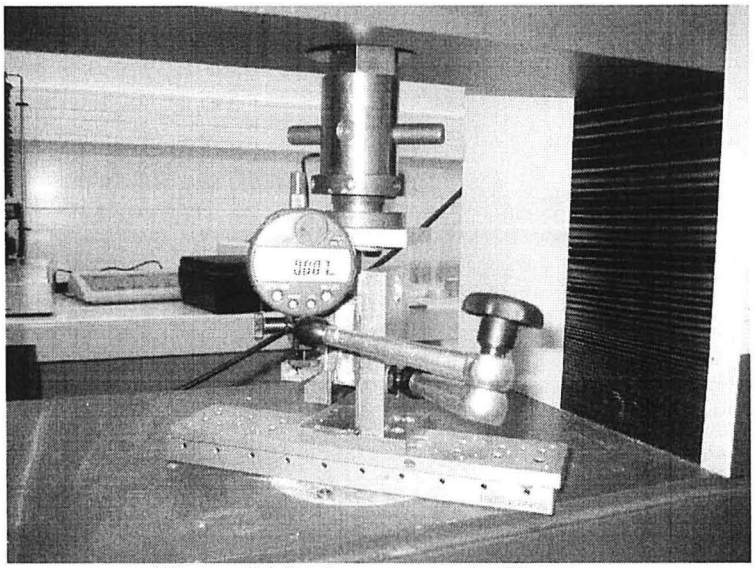


Figure M.1.*Montage de cisaillement.*

Le comparateur mesure les déplacements entre les deux supports en aluminium. Le déplacement mesuré correspond donc à celui de l'éprouvette et des plaques métalliques. Les premières courbes donnant le déplacement en fonction de l'effort extraites des essais, présentent une forme étonnante (figure M.2).

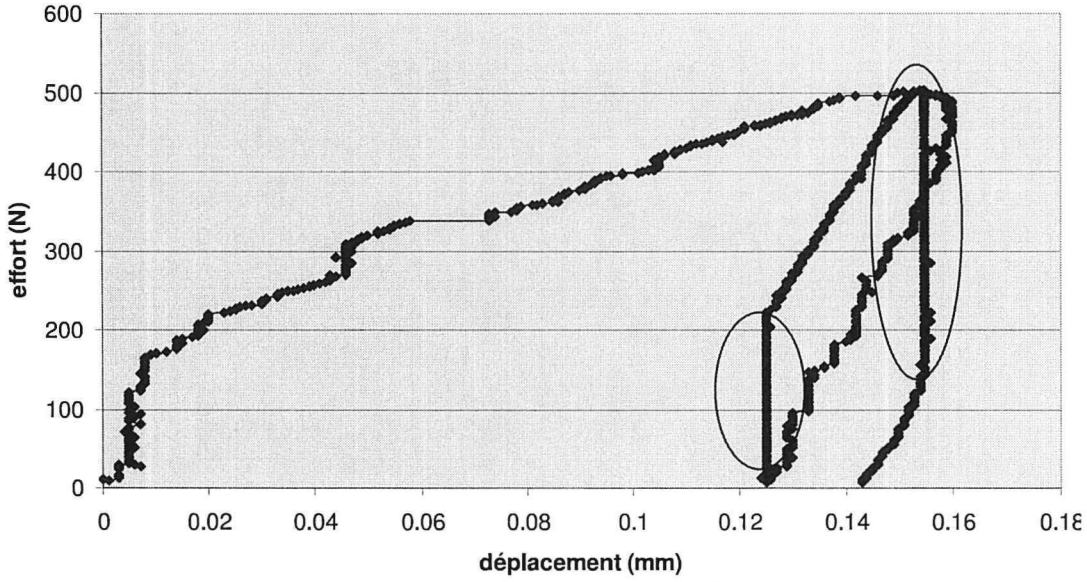


Figure M.2. *Première courbe de déplacement d'un essai de cisaillement roulant sur un échantillon d'OSB du commerce. Le cycle se compose de deux phases de charge/décharge jusqu'à 500N pour ne pas endommager l'échantillon (charge<10% de l'effort de rupture).*

Elles comportent une partie où le comparateur ne semble pas mesurer de déplacement alors que l'effort, lui, évolue. On a d'abord supposé que cela était dû à la viscosité du bois : bien que l'effort change de signe ou s'arrête d'évoluer, le bois continuerait toujours à se déformer dans le même sens. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons introduit des paliers entre les courbes de charge et de décharge où le déplacement de la traverse machine était bloqué. Pendant ces paliers, les efforts changent ; on observe bien un phénomène viscoélastique. Cependant, lorsque l'on reprend l'essai, le comparateur présente toujours cet intervalle de temps pendant lequel le déplacement ne semble pas évoluer. Ceci ne semble donc pas venir de la viscosité du bois. On a alors pensé que ce problème venait de frottements internes au comparateur. On a collé sur le montage (au plus près du comparateur) un vibreur (figure M.3).

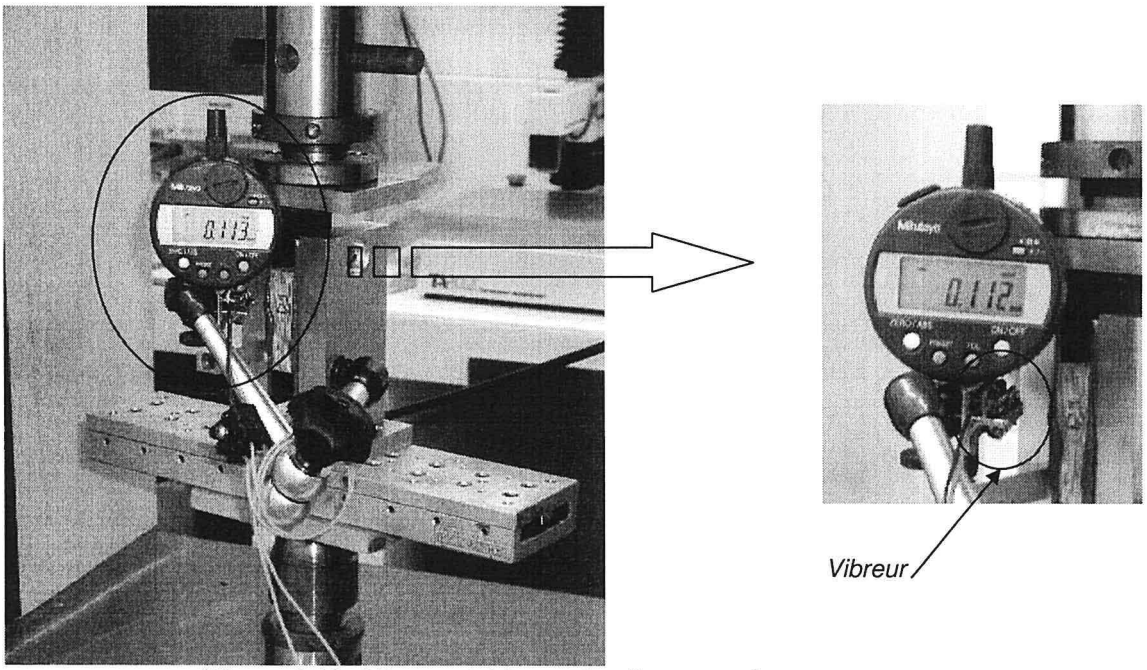


Figure M.3. *Mise en évidence du vibreur sur le comparateur.*

Les essais ont été repris et les courbes obtenues ne présente plus ce phénomène (figure M.4).

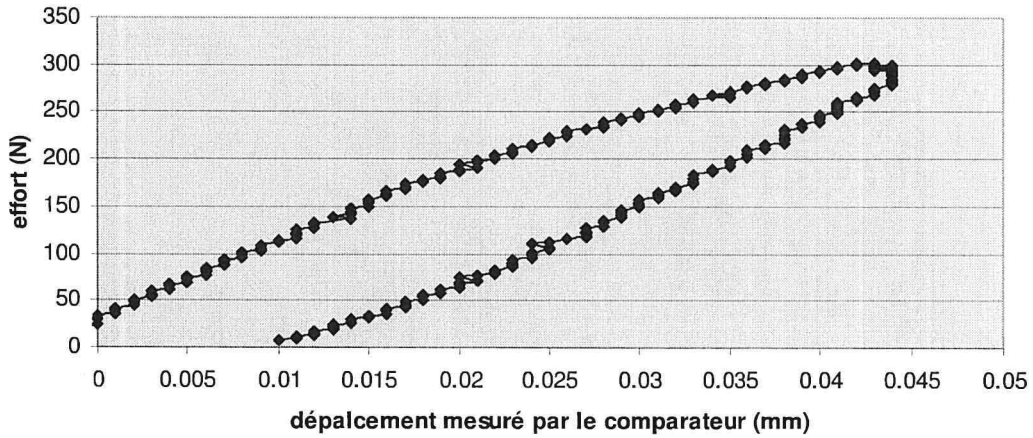


Figure M.4. *Courbe obtenue sur un échantillon d'OSB. Le comparateur est muni d'un vibreur pour supprimer les phénomènes de frottements internes. La charge maximale atteinte est 300N pour diminuer les dégradations causées par la monté en charge.*

On a ensuite essayé de calculer le module d'élasticité en cisaillement de l'échantillon. En analysant les courbes, on a remarqué sur la majorité d'entre elles 3 phases distinctes (figure M.5) :

- une première phase quasi linéaire jusqu'à environ 300 à 500 N,
- une seconde phase, séparée de la première par une rupture de pente. La pente observée est quasiment nulle. Il semblerait qu'il y ait un glissement des plaques métalliques sur les supports en aluminium (mis en évidence sur la figure M.6 où l'on avait décalé volontairement les plaques métalliques de 0,5mm par rapport au support).
- Une troisième phase distincte de la seconde par une autre rupture de pente (la pente ré augmente mais elle n'est pas la même que dans la première phase). Après réflexion, dans cette phase, les déplacements mesurés correspondraient à ceux de l'échantillon mais aussi à ceux produit par une déformation des plaques métalliques.

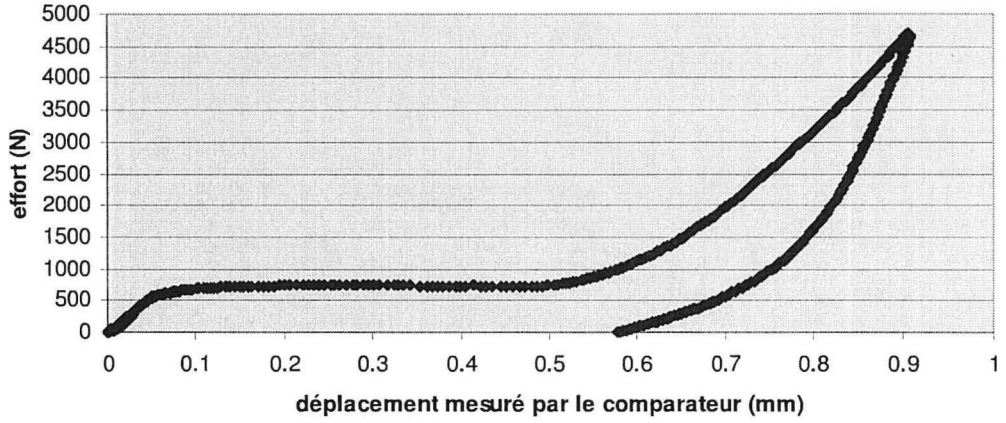


Figure M.5. *Courbe d'un essai de cisaillement complet (jusqu'à rupture) sur un échantillon d'OSB.*

La partie de la courbe semblant donc caractériser le comportement élastique du panneau OSB serait la première zone de la courbe. Pour calculer le module de cisaillement, on s'intéresse à cette partie de la courbe.

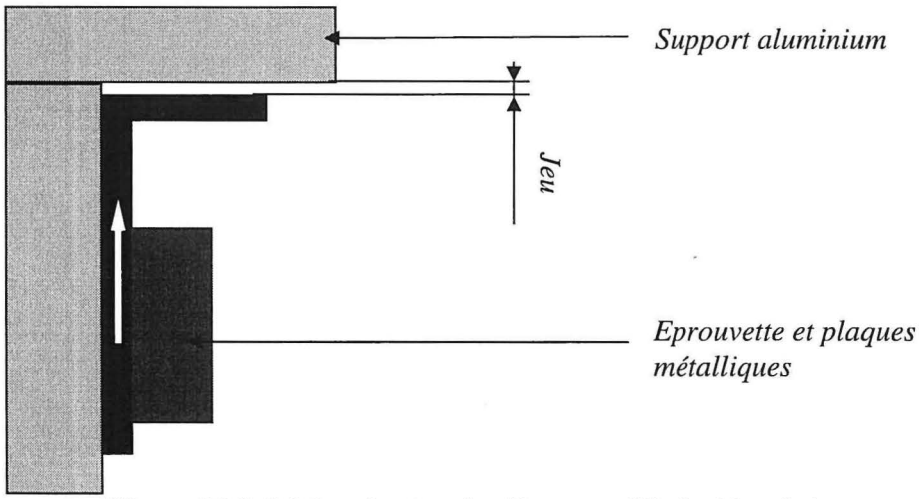


Figure M.6. *Schématisation du glissement (flèche blanche).*

- *Détermination du module de cisaillement*

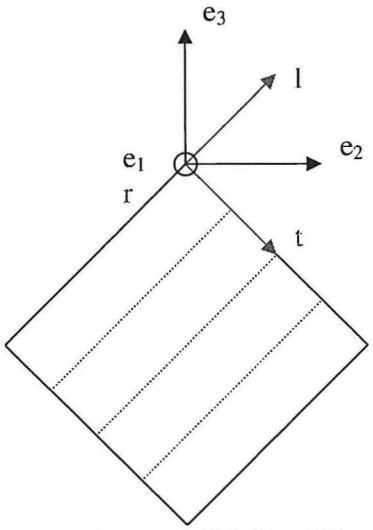


Figure M.6. *Repères sur une plaquette d'OSB taillée à 45° dans un panneau....*

Avec l'essai de cisaillement, on mesure un module qui est G_{31} dans le repère de l'essai (e_1, e_2, e_3) soit $G_{R,LT}$ dans le repère du panneau (r, t, l) si on pose R la direction hors plan de celui-ci (figure M.6).
On a, le module de cisaillement roulant [EN789, 2005]:

$$G_{31} = G_{r,lt} = \frac{(F_2 - F_1) * t}{(u_2 - u_1) * S}$$

avec
- 'F_2-F_1' l'accroissement de la force sur une proportion linéaire du diagramme.
- 'U_2-U_1' la variation du déplacement correspondant à F_2-F_1.
- ' t' l'épaisseur de l'éprouvette
- 'S' la surface de l'échantillon

Entre les deux repères il y a un angle de 45°. En revenant aux souplesses, on obtient :

$$S_{66}^{45°} = S_{66}\cos^2 45 + S_{55}\sin^2 45 = \frac{1}{2}(S_{66} + S_{55}). \qquad \text{(J.1)}$$

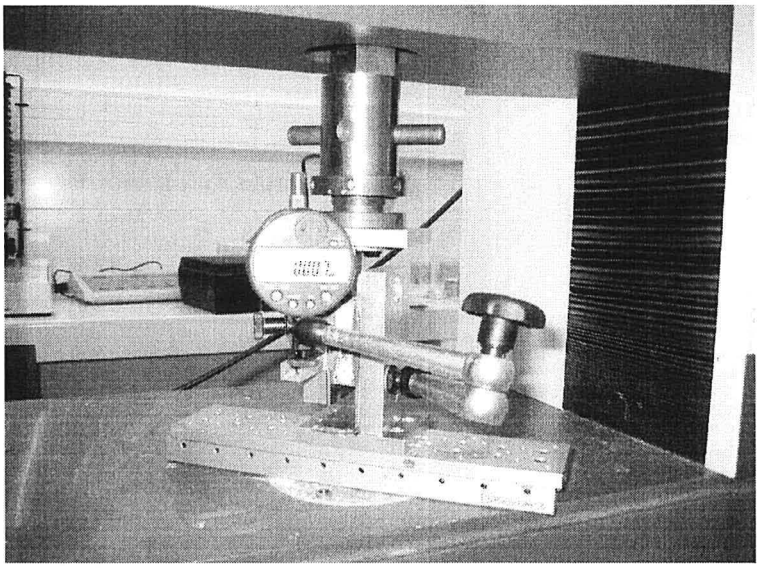
Soit :

$$\frac{1}{G_{R,LT}} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{G_{RT}} + \frac{1}{G_{RL}}\right). \qquad \text{(J.2)}$$

Ainsi connaissant l'un des deux modules (avec essai de « BING » par exemple), on peut retrouver le second par calcul.

CIRAD-Dist
Unité documentaire
Baillarguet

N. Protocole : essai de cisaillement roulant sur éprouvettes de 50x50 mm extraites de panneaux OSB



♥ **Matériel utilisé :**

Les essais sont réalisés sur la machine de traction MTS équipée de la cellule de 5KN. On utilise le système de cisaillement. Le socle doit être monté sur une rotule pour palier les éventuels défauts de positionnement de l'éprouvette sur le montage.
La mesure de déformation est réalisée via un comparateur mitutoyo interfacé avec le logiciel de la MTS.

♥ **Programme d'essai :**

Le programme utilisé est le programme « cisaillement_OSB » enregistré dans le fichier « mab » de l'ordinateur de commande.
Ce cycle d'essai comprend :

- une précharge de 10N correspondant à la mise en place de l'éprouvette et du dispositif d'essai.
- une montée en charge jusqu'à rupture à vitesse constante tel que la rupture soit atteinte en (300±120s.
- un retour à la position initiale de la traverse.

♥ **Essai :**

On colle les échantillons sur des plaques métalliques en "L" de 100*50*5mm avec une colle polyuréthane bi-composante. Pour cela, on utilise le montage de collage réalisé à cet effet (figure N.1).

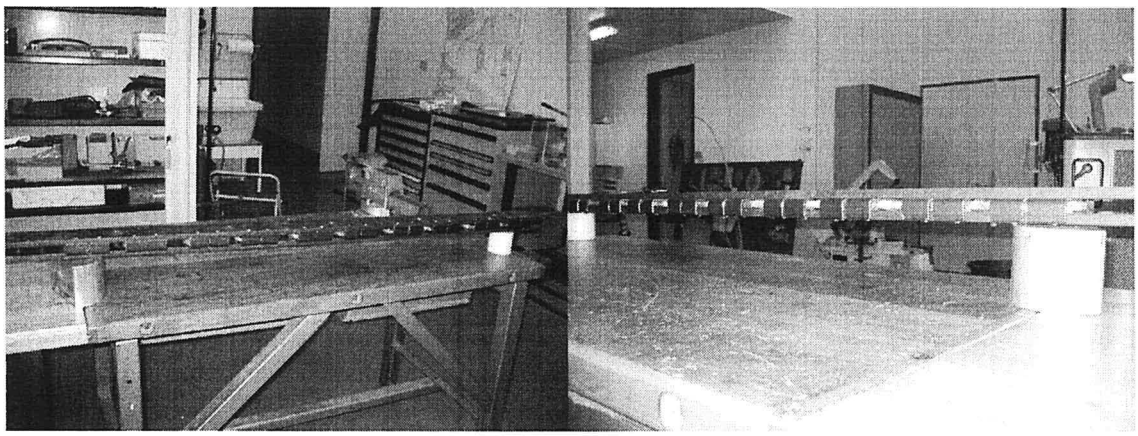


Figure N.1. *Montage de collage des plaques de cisaillement.*

Le séchage dure environ 48H à l'air ambiant. Ensuite, on prend soin de replacer l'échantillon en atmosphère contrôlée et d'attendre qu'il se stabilise à nouveau à 12% d'humidité.
Par la suite, on dispose l'éprouvette sur le système de cisaillement et on réalise l'essai.

♥ **Résultat :**

On peut extraire deux informations principales de cet essai :

- La résistance au cisaillement R_c :

$$R_c = \frac{F_{max}}{S}$$

avec 'S' la surface de l'échantillon.

- Le module de cisaillement roulant :

$$G_r = \frac{(F_2 - F_1) * t}{(u_2 - u_1) * S}$$

avec
- 'F_2-F_1' l'accroissement de la force sur une proportion linéaire du diagramme.
- 'U_2-U_1' la variation du déplacement correspondant à F_2-F_1.
- ' t' l'épaisseur de l'éprouvette
- 'S' la surface de l'échantillon

O. Résultats des essais de compression et de contact direct

Les tableaux suivants présentent les valeurs de module hors plan calculées par les deux méthodes.

			Module par échantillon (MPa)	
type de panneau	colle	échantillon	compression	contact direct
100% cyprès	tanin	A8	289	330
		B3	293	393
		C7	315	362
		C10	257	368
	lignine	G2	302	425
		H11	324	488
		H4	304	452
		I10	243	419
		I2	343	426
	Isoroy	BD12	305	402
		BE16	237	405
		BF9	267	339
100% pin	tanin	P13	150	228
		Q13	173	203
		R17	184	234
	lignine	D9	201	279
		E6	205	332
		F16	199	329
	Isoroy	BG9	246	342
		BH5	190	343
		BJ9	220	350
100% robinier	tanin	AP2	248	517
		AQ10	322	503
		AR17	235	466
	lignine	Y9	251	
		Z15	148	277
		AB11	211	
	Isoroy	BK11	180	224
		BL2	177	
		BM1	279	430

Tableau O.1. *Résumé des modules élastiques hors plan par échantillon (première partie).*

			module par échantillon (MPa)	
type de panneau	colle	échantillon	compression	contact direct
75% cyprès	tanin	S1	267	390
		T9	273	305
		U3	326	390
	lignine	J17	276	350
		K12	281	382
		L10	318	342
75% robinier	tanin	AN12	190	374
		AO5	223	321
	lignine	AC13	249	413
		AD11	239	329
		AE12	290	369
50% cyprès	tanin	V1	194	
		W11	212	336
		X9	209	296
	lignine	M5	241	330
		N9	225	327
		O3	238	298
50% robinier	tanin	AJ13	210	259
		AK11	205	291
		AL11	210	349
	lignine	AF13	237	360
		AG11	224	358
		AH10	249	330

Tableau O.2. *Résumé des modules élastiques hors plan par échantillon (deuxième partie).*

CIRAD-Dist
UNITE DOCUMENTATION

		module par mélange (MPa)				
type de panneau	colle	compression	écart min/max (%)	contact direct	écart min/max (%)	Différence compression/ contact direct (%)
	tanin	288	18	333	16	0.13
	lignine	303	24	443	14	0.32
100% cyprès	Isoroy	269	22	388	16	0.31
	tanin	169	18	238	10	0.29
	lignine	202	3	315	16	0.36
100% pin	Isoroy	219	23	311	2	0.30
	tanin	268	27	493	10	0.46
	lignine	203	41	332		0.39
100% robinier	Isoroy	212	37	331	48	0.36

Tableau O.3. *Résumé des modules élastiques hors plan et leur dispersion par type de panneau (première partie).*

		module par mélange (MPa)				
type de panneau	colle	compression	écart min/max (%)	contact direct	écart min/max (%)	Différence compression/ contact direct (%)
75% cyprès	tanin	289	18	344	22	0.16
	lignine	292	13	368	11	0.21
75% robinier	tanin	206	15	369	14	0.44
	lignine	260	18	400	20	0.35
50% cyprès	tanin	205	9	306	12	0.33
	lignine	235	7	319	10	0.26
50% robinier	tanin	208	2	298	26	0.30
	lignine	237	10	363	8	0.35

Tableau O.4. *Résumé des modules élastiques hors plan et leur dispersion par type de panneau (deuxième partie).*

P. Résultats des essais de traction perpendiculaire :

Les tableaux suivants donnent la contrainte à rupture en traction perpendiculaire. Les valeurs en rouge sont celles ne satisfaisant pas la norme AFNOR EN300 [1997].

mélange	colle	échantillon	résistance à la traction (Mpa)	résistance par type de panneau (Mpa)	dispersion en %
		A8	0.50		
		B3	0.66		
	tanin	C7	0.55	0.57	23
		G2	1.04		
		H11	0.64		
	lignine	I10	0.86	0.85	39
		BD1	0.78		
		BE3	0.77		
cyprès	Isoroy	BF3	0.14	0.56	82
		P			
		Q1	0.19		
	tanin	R8	0.25	0.22	25
		E6	0.24		
		D10	0.42		
	lignine	F		0.33	42
		BG9	cassé au montage		
		BH13	0.16		
pin	Isoroy	BJ16	0.20	0.18	23
		AP2	0.03		
		AQ10	0.23		
	tanin	AR17	0.34	0.20	92
		AB11	0.09		
		Y9	0.06		
	lignine	Z15	0.08	0.07	34
		BK11	0.12		
		BL2	0.27		
robinier	Isoroy	BM1	0.13	0.17	57

Tableau P.1. *Résumé des contraintes à rupture en traction perpendiculaire et leur dispersion (première partie).*

mélange	colle	échantillon	résistance à la traction (MPa)	résistance par type de panneau (MPa)	dispersion en %
50% cyprès	tanin	V13	0.37	0.43	24
		W11	0.49		
		X			
	lignine	M12	0.88	0.80	23
		N9	0.85		
		O3	0.68		
75% cyprès	tanin	S15	0.53	0.52	4
		T9	0.51		
		U3	0.52		
	lignine	J17	0.97	0.84	52
		K12	1.04		
		L10	0.50		
75% robinier	tanin	AM		0.02	
		AN12	0.02		
		AO			
	lignine	AC2	0.42	0.46	58
		AD11	0.68		
		AE6	0.29		
50% robinier	tanin	AF13	0.36	0.54	48
		AH10	0.56		
		AG8	0.69		
	lignine	AJ6	0.29	0.24	26
		AL11	0.21		
		AK11	0.21		

Tableau P.2. *Résumé des contraintes à rupture en traction perpendiculaire et leur dispersion (deuxième partie).*

Q. Résultats des essais de flexion et de « BING »

Les tableaux suivants présentent le résumé des valeurs de modules élastiques et des contraintes à rupture obtenues par les essais de flexion et de « BING ». Les valeurs surlignées sont celles ne satisfaisant pas la norme AFNOR EN300 [1997].

module par panneau et colle					
mélange	colle	direction	module flex4pts (MPa)	écart min/max flexion (%)	Résistance (MPa)
cyprès	tanin	longitudinale	9247	43	37
		transversale	3997	2	30
	lignine	longitudinale	8943	15	48
		transversale	4367	37	42
	Isoroy	longitudinale	9111	20	37
		transversale	3362	65	29
pin	tanin	longitudinale	5066	50	27
		transversale	2923	13	27
	lignine	longitudinale	12530	43	39
		transversale	3449	68	50
	Isoroy	longitudinale	8408	58	44
		transversale	2972	63	37
robinier	tanin	longitudinale	6173	81	20
		transversale	3842	56	23
	lignine	longitudinale	9274	48	27
		transversale	2887	62	24
	Isoroy	longitudinale	6440	24	23
		transversale	1885	58	15
50% cyprès	tanin	longitudinale	10703	31	36
		transversale	4906	38	44
	lignine	longitudinale	10583	11	50
		transversale	5087	48	41
75% cyprès	tanin	longitudinale	7042	27	38
		transversale	5318	53	38
	lignine	longitudinale	13033	47	58
		transversale	3602	80	46
75% robinier	tanin	longitudinale	11540	1	27
		transversale	5958	38	29
	lignine	longitudinale	10884	9	31
		transversale	3674	62	23
50% robinier	tanin	longitudinale	10850	46	31
		transversale	5765	7	48
	lignine	longitudinale	11246	25	28
		transversale	4009	84	29

Tableau Q.1. *Résumé des modules élastiques et des contraintes à rupture en flexion, et des dispersions, obtenus par l'essai de flexion 4 points.*

module par panneau et colle				
mélange	colle	direction	module bing (MPa)	écart min/max bing (%)
cyprès	tanin	longitudinale	8973	27
		transversale	4097	14
	lignine	longitudinale	9363	6
		transversale	4361	24
	lsoroy	longitudinale	8408	11
		transversale	3539	24
pin	tanin	longitudinale	8307	17
		transversale	3320	13
	lignine	longitudinale	11029	8
		transversale	5917	32
	lsoroy	longitudinale	10378	20
		transversale	3542	39
robinier	tanin	longitudinale	5050	62
		transversale	3497	19
	lignine	longitudinale	8155	54
		transversale	3525	49
	lsoroy	longitudinale	6186	59
		transversale	1721	50
50% cyprès	tanin	longitudinale	11727	24
		transversale	5054	30
	lignine	longitudinale	10923	8
		transversale	3973	17
75% cyprès	tanin	longitudinale	7998	12
		transversale	4886	27
	lignine	longitudinale	10603	23
		transversale	4678	14
75% robinier	tanin	longitudinale	8000	32
		transversale	4303	32
	lignine	longitudinale	8982	53
		transversale	3086	78
50% robinier	tanin	longitudinale	10531	55
		transversale	5004	18
	lignine	longitudinale	10349	13
		transversale	5033	29

Tableau Q.2. *Résumé des modules élastiques en flexion, et de leurs dispersions, obtenus par l'essai de « BING ».*

module par panneau et colle					
mélange	colle	direction	module Bing (MPa)	module flex4pts (MPa)	écart Bing/flexion (%)
	tanin	longitudinale	8973	9247	3
		transversale	4097	3997	-2
	lignine	longitudinale	9363	8943	-5
		transversale	4361	4367	0
	Isoroy	longitudinale	8408	9111	8
cyprès		transversale	3539	3362	-5
	tanin	longitudinale	8307	5066	-64
		transversale	3320	2923	-14
	lignine	longitudinale	11029	12530	12
		transversale	5917	3449	-72
	Isoroy	longitudinale	10378	8408	-23
pin		transversale	3542	2972	-19
	tanin	longitudinale	5050	6173	18
		transversale	3497	3842	9
	lignine	longitudinale	8155	9274	12
		transversale	3525	2887	-22
	Isoroy	longitudinale	6186	6440	4
robinier		transversale	1721	1885	9
	tanin	longitudinale	11727	10703	-10
		transversale	5054	4906	-3
	lignine	longitudinale	10923	10583	-3
50% cyprès		transversale	3973	5087	22
	tanin	longitudinale	7998	7042	-14
		transversale	4886	5318	8
	lignine	longitudinale	10603	13033	19
75% cyprès		transversale	4678	3602	-30
	tanin	longitudinale	8000	11540	31
		transversale	4303	5958	28
	lignine	longitudinale	8982	10884	17
75% robinier		transversale	3086	3674	16
	tanin	longitudinale	10531	10850	3
		transversale	5004	5765	13
	lignine	longitudinale	10349	11246	8
50% robinier		transversale	5033	4009	-26

Tableau Q.3. *Comparaison des modules élastiques en flexion obtenus par l'essai de flexion 4 points et l'essai de « BING ».*

R. Résultats des essais de cisaillement roulant

Les tableaux suivants donnent les valeurs du module élastique et de la contrainte à rupture en cisaillement.

mélange	colle	échantillon	module élastique (MPa)	module élastique par type de panneau (MPa)	écart min/max module (%)
		A11	45		
		B15	44		
	tanin	C10	78	56	44
		G6	171		
		H4	108		
	lignine	I2	36	105	79
		BD12	94		
		BE16	83		
cyprès	Isoroy	BF		88	12
		P13	41		
		Q13	52		
	tanin	R17	90	61	55
		E13	85		
		D9			
	lignine	F8	37	61	57
		BG10	45		
		BH5	81		
pin	Isoroy	BJ9	56	61	44
		AP11	74		
		AQ3	69		
	tanin	AR2		71	8
		AB7	52		
		Y16	76		
	lignine	Z7	48	58	37
		BK3			
		BL12			
robinier	Isoroy	BM16			

Tableau R.1. *Récapitulatif des modules élastiques en cisaillement roulant et des dispersions (première partie).*

mélange	colle	échantillon	module élastique (MPa)	module élastique par type de panneau (MPa)	écart min/max module (%)
50% cyprès	tanin	V1	28	45	56
		W7	41		
		X9	65		
	lignine	M5	71	74	64
		N10	41		
		O11	112		
75% cyprès	tanin	S1	50	75	57
		T10	56		
		U17	117		
	lignine	J5	71	95	47
		K9	81		
		L9	133		
75% robinier	tanin	AM		99	80
		AN3	34		
		AO13	164		
	lignine	AC13		65	49
		AD10	86		
		AE12	44		
50% robinier	tanin	AF		82	36
		AH1	63		
		AG11	100		
	lignine	AJ13	34	67	68
		AL2	58		
		AK7	108		

Tableau R.2. *Récapitulatif des modules élastiques en cisaillement roulant et des dispersions (deuxième partie).*

mélange	colle	échantillon	résistance au cisaillement (MPa)	résistance par type de panneau (MPa)	écart min/max résistance (%)
		A11	1.14		
		B15	1.38		
	tanin	C10	1.09	1.20	21
		G6	1.90		
		H4	1.89		
	lignine	I2	1.88	1.89	1
		BD12	1.90		
		BE16	1.08		
cyprès	Isoroy	BF		1.49	43
		P13	0.58		
		Q13	0.72		
	tanin	R17	1.14	0.81	49
		E13	1.40		
		D9			
	lignine	F8	1.31	1.36	7
		BG10	0.84		
		BH5	1.51		
pin	Isoroy	BJ9	1.46	1.27	44
		AP11	0.76		
		AQ3	0.63		
	tanin	AR2		0.69	17
		AB7	0.58		
		Y16	0.79		
	lignine	Z7	0.40	0.59	49
		BK3			
		BL12			
robinier	Isoroy	BM16			

Tableau R.3. *Récapitulatif des contraintes à rupture en cisaillement roulant et des dispersions (première partie).*

mélange	colle	échantillon	résistance au cisaillement (MPa)	résistance par type de panneau (MPa)	écart min/max résistance (%)
50% cyprès	tanin	V1	0.56	0.93	59
		W7	1.39		
		X9	0.82		
	lignine	M5	1.47	1.68	22
		N10	1.66		
		O11	1.89		
75% cyprès	tanin	S1	1.35	1.27	58
		T10	0.96		
		U17	1.51		
	lignine	J5	1.86	1.72	25
		K9	1.88		
		L9	1.41		
75% robinier	tanin	AM		0.68	5
		AN3	0.66		
		AO13	0.70		
	lignine	AC13	0.42	0.90	69
		AD10	1.36		
		AE12	0.93		
50% robinier	tanin	AF		1.20	19
		AH1	1.32		
		AG11	1.07		
	lignine	AJ13	1.19	0.90	23
		AL2	0.92		
		AK7	0.58		

Tableau R.4. *Récapitulatif des contraintes à rupture en cisaillement roulant et des dispersions (deuxième partie).*