



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

REMERCIEMENTS

Remercier toutes les personnes, qui m'ont aidé à réaliser ces travaux de recherche, au cours de ces trois dernières années, me paraît difficile. En effet, la majorité du personnel technique et administratif, ainsi que la plupart des enseignants-chercheurs et des doctorants de l'ENSTIB, m'ont soutenu de près ou de loin pour mener à bien ce projet. Je me limiterai donc à citer les personnes qui ont le plus contribué à ces résultats.

La première personne que j'aimerais remercier est mon co-encadrant Jean-François BOCQUET, sans qui cette thèse n'aurait pas été possible. En effet, il est l'inventeur des assemblages précontraints pour les matériaux fibreux tels qu'ils sont décrits dans ce document. De plus, il a participé à chaque étape de l'avancement de ces travaux, en s'investissant parfois plus que de raison.

Je tiens également à remercier Pr. Pascal TRIBOULOT, encadrant de ma thèse, qui s'est investi pour trouver la bourse ministérielle qui a permis le financement de ces travaux.

La réalisation des assemblages testés au cours de ma thèse, ainsi que les montages pour caractériser les matériaux ont été réalisés avec l'appui de toute l'équipe technique de l'ENSTIB que je remercie. Je remercie particulièrement Stéphane AUBERT qui a en plus largement contribué à la mise en place des essais mécaniques.

La caractérisation du bois en compression transversale a été réalisée avec la participation de Cyril BEAULIEU. La caractérisation du bois en sollicitation mixte compression transversale – traction longitudinale a été effectuée à partir des travaux de Louis FREDERIC-LINGLET et Romain BREVART et le montage usinage conçu par Alain RENAUD. Laurent COUTAGNE a également participé à cette caractérisation ainsi qu'aux observations anatomiques du bois en compression transversale. Sur ce dernier point, je tiens à remercier tout particulièrement Marie-Christine TRIBOULOT qui a réalisé toutes les photographies au microscope électronique à balayage du bois densifié et qui m'a énormément aidé sur la compréhension du matériaux bois dans cette sollicitation mixte.

Iman TAVAKOLI a très largement contribué à mise en place du modèle par éléments finis décrit au chapitre 4.

Charles BARTHAM m'a expliqué le fonctionnement des réseaux de neurones et l'algorithme d'évolution différentielle qui ont permis la phase d'optimisation de l'assemblage pour le bambou.

Je tiens également à remercier Denise CHOFFLE, Annie MOREL et Béatrice AUGIER pour leur patience et leur aide pour mes recherches bibliographiques ainsi que sa rédaction.

Je remercie Renaud BLONDEAU-PATISSIER et l'entreprise Finnforest pour le Kerto® fourni.

Je remercie également Pr. Hans Joachim BLASS pour son écoute et ses conseils notamment au sujet de la prise en compte des frottements au niveau du montage permettant la mesure de l'influence de la compression transversale sur la résistance en traction longitudinale du matériau bois. Je remercie également Hamid BOUCHAIR pour son écoute et ses conseils sur la modélisation du bois par éléments finis. Je remercie également ses deux personnes pour avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse.

Sur un plan plus personnel, je tiens à signaler qu'au cours de ces trois ans de thèse, la plupart de mes collègues de travail sont devenus des amis, je pense particulièrement à Jean-François Bocquet, Stéphane Aubert, Iman Tavakoli, Cyril Beaulieu, Charles Barthram... Leur soutien dans les moments difficiles, nos conversations mais également les franches parties de rigolade passées ensemble ont donné une dimension agréable à ces trois dernières années. Dans ce sens je tiens également à remercier Ludovic RECH et Marion NOEL pour leur bonne humeur et l'aide quotidienne qu'ils m'ont apporté.

Je voudrais remercier ma famille qui m'a toujours soutenu et aidé et ce depuis le début de ma scolarité et je n'oublie pas également ma belle-famille.

J'aimerais enfin dédier cette thèse à Aurore qui est devenue ma femme et qui m'a toujours soutenu et encouragé.

SOMMAIRE

CHAPITRE 1. APPLICATION DU PRINCIPE DE LA PRECONTRAINTE POUR LE BOIS..... 8

1.	PLACE DE LA PRECONTRAINTE DANS LA CONSTRUCTION.....	9
1.1.	<i>Exemple des assemblages métalliques</i>	9
1.2.	<i>Les assemblages précontraints pour le matériau bois</i>	12
1.3.	<i>Les assemblages utilisés dans la construction bois</i>	14
1.3.1.	Les assemblages de type tiges.....	14
1.3.2.	Les assemblages collés hautes performances.....	19
1.3.3.	Comparaison mécanique des assemblages bois avec les assemblages précontraints en acier	22
2.	DESCRIPTION ANATOMIQUE DU BOIS ET LES CONSEQUENCES SUR SES PROPRIETES MECANIQUES.....	23
2.1.	<i>Description multi-échelle du bois</i>	23
2.2.	<i>Comportement mécanique du bois</i>	27
2.2.1.	Comportement fragile du bois en traction	27
2.2.2.	Comportement élasto-plastique du bois en compression	28
2.2.3.	Comportement fragile du bois en cisaillement pur	35
3.	LE BAMBOU : UNE HERBE D'ACIER UTILISEE DANS LA CONSTRUCTION.....	38
3.1.	<i>Le bambou : une herbe insolite</i>	39
3.1.1.	Description générale de la plante	39
3.1.2.	Anatomie de la plante	41
3.1.3.	Répartition des organes dans la paroi de la plante	43
3.1.4.	Propriétés mécaniques de la tige de bambou	46
3.2.	<i>Assemblages pour le bambou</i>	47
3.2.1.	Assemblages de la famille I.....	49
3.2.2.	Assemblages de la famille II	58
3.2.3.	Assemblages de la famille III	61
4.	APPLICATION DU PRINCIPE DE LA PRECONTRAINTE SUR DES CHAUMES DE BAMBOU	66
4.1.	<i>Essais préliminaires :</i>	66
4.2.	<i>Principe et géométrie des assemblages testés</i>	69
4.3.	<i>Description d'un essai « type » d'un assemblage précontraint pour le bambou</i>	70
4.4.	<i>Résultats obtenus lors des essais sur les assemblages précontraints pour le bambou</i>	74
4.5.	<i>Analyse des résultats obtenus</i>	77
4.5.1.	Analyse de la rupture	77
4.5.2.	Analyse de la raideur	77
4.5.3.	Analyse plus fine du glissement des assemblages.....	79
4.5.4.	Remarques supplémentaires sur les assemblages précontraints pour le bambou.....	79
5.	APPLICATION DU PRINCIPE DE LA PRECONTRAINTE SUR DES AVIVES DE BOIS.....	81
5.1.	<i>Augmentation de la résistance du bois en compression transversale : densification du matériau</i> ..	81
5.2.	<i>Principe et géométrie des assemblages testés</i>	84
5.3.	<i>Description d'un essai « type » d'un assemblage précontraint pour le bois</i>	86
5.4.	<i>Résultats obtenus lors des essais sur les assemblages précontraints pour le bois</i>	90
5.5.	<i>Analyse des résultats obtenus</i>	95
5.5.1.	Analyse de la phase de densification	95
5.5.2.	Analyse de la rupture	96
5.5.3.	Analyse de la raideur et des déplacements.....	98
6.	CONCLUSION SUR LES ASSEMBLAGES PRECONTRAINTS	99

CHAPITRE 2. CARACTERISATION DU BOIS ET DU BAMBOU EN COMPRESSION

TRANSVERSALE 100

1.	PROTOCOLLES EXPERIMENTAUX.....	101
1.1.	<i>Protocole expérimental pour le matériau bois</i>	101
1.1.1.	Etat de l'art pour caractériser le bois en compression transversale	101
1.1.2.	Matériels et méthode.....	102

1.1.3.	Validation du protocole expérimental.....	105
1.2.	<i>Protocole expérimental pour le matériau bambou</i>	107
2.	RESULTATS ET ANALYSES POUR LE BOIS.....	110
2.1.	<i>Allure générale du comportement du bois en compression transversale</i>	110
2.2.	<i>Détermination de la loi de comportement du bois de Picea abies en compression transversale</i>	113
2.2.1.	Détermination du module d'élasticité K_1	114
2.2.2.	Détermination de la limite élastique K_2	114
2.2.3.	Détermination du module de flambement des parois des trachéides K_3	116
2.2.4.	Détermination du rayon de courbure r	117
2.2.5.	Détermination des coefficients α , γ et ϵ_d	119
2.3.	<i>Analyse de l'évolution du module d'élasticité du bois densifié</i>	122
3.	RESULTATS ET ANALYSES POUR LE BAMBOU.....	125
CHAPITRE 3. CARACTERISATION DU BOIS EN SOLLICITATION MIXTE : TRACTION		
LONGITUDINALE COMPRESSION TRANSVERSALE..... 128		
1.	CARACTERISATION MECANIQUE DU BOIS EN SOLLICITATION MIXTE : COMPRESSION TRANSVERSALE – TRACTION LONGITUDINALE.....	129
1.1.	<i>Protocole expérimental</i>	129
1.1.1.	Préparation des éprouvettes (Etape 1 à 3).....	131
1.1.2.	Densification des éprouvettes (Etape 4).....	132
1.1.3.	Maintien et mesure du taux de déformation de l'éprouvette (Etapas 5 et 6).....	134
1.1.4.	Test en traction de l'éprouvette sous contrainte de compression transversale (Etapas 7).....	136
1.1.5.	Mesure des efforts parasites de frottement (Etape 8).....	137
1.1.6.	Calcul de la résistance en traction longitudinale du bois contraint en compression transversale (Etape 9).....	137
1.2.	<i>Essais réalisés</i>	138
1.3.	<i>Résultats et analyse</i>	138
1.4.	<i>Critiques du protocole expérimental</i>	144
2.	CARACTERISATION MECANIQUE DU BOIS DENSIFIE MECANIQUEMENT A FROID EN TRACTION LONGITUDINALE.....	146
2.1.	<i>Protocole expérimental</i>	146
2.2.	<i>Influence de la cohésion interne sur la résistance du bois densifié en traction longitudinale</i>	150
2.3.	<i>Influence de l'effet de bord sur la résistance du bois densifié en traction longitudinale</i>	151
2.4.	<i>Influence de l'angle de compression avec les cernes (α) sur la résistance du bois densifié en traction longitudinale</i>	154
2.5.	<i>Influence de la densification sur le module d'élasticité du bois</i>	155
3.	OBSERVATIONS ANATOMIQUES DU BOIS LORS DE SA PHASE DE DENSIFICATION.....	157
3.1.	<i>Influence de la compression radiale sur le bois</i>	157
3.2.	<i>Influence de la compression tangentielle sur le bois</i>	158
3.3.	<i>Influence de la compression mixte sur le bois</i>	160
3.4.	<i>Conclusion quant à l'explication de l'apparition d'un taux de densification critique</i>	161
4.	CONCLUSIONS SUR LA RESISTANCE DU BOIS DANS LES ASSEMBLAGES PRECONTRAINTS TESTES.....	162
CHAPITRE 4. MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS DES ASSEMBLAGES		
PRECONTRAINTS POUR LES MATERIAUX FIBREUX..... 164		
1.	DESCRIPTION MULTI ECHELLE DES PRINCIPALES FAÇONS DE MODELISER LE BOIS ET CHOIX DU MODELE RETENU.....	165
1.1.	<i>Modélisation du bois à une échelle macroscopique</i>	167
1.1.1.	Généralités sur les critères de rupture.....	167
1.1.2.	Critères de rupture pour modéliser le bois.....	168
1.1.3.	Utilisation des modèles éléments finis par critère de rupture pour modéliser le comportement global du bois.....	171
1.1.4.	Conclusion sur l'utilisation des modèles éléments finis utilisant les fonctions de charge pour simuler les assemblages précontraints bois.....	178

1.1.5.	Discussion sur l'hypothèse de la continuité du matériau bois à l'échelle des assemblages	179
1.2.	<i>Modélisation du bois à une échelle cellulaire</i>	181
1.3.	<i>Modélisation du bois à une échelle mésoscopique</i>	182
1.4.	<i>Conclusion quant au modèle retenu pour simuler les assemblages précontraints</i>	185
2.	PRESENTATION DU MODELE MOUSSE D'ABAQUS®	186
2.1.	<i>Le domaine élastique</i>	186
2.2.	<i>La surface de charge du modèle mousse d'Abaqus®</i>	187
2.3.	<i>Évolution de la surface de charge dans le domaine plastique</i>	190
2.4.	<i>Identification des paramètres de la mousse pour la modélisation des matériaux fibreux dans la direction transversale</i>	191
2.5.	<i>Critiques de l'utilisation du modèle mousse pour simuler le comportement des matériaux fibreux dans la direction transversale</i>	193
3.	MODELISATION DES ASSEMBLAGES PRECONTRAINS POUR LES CHAUMES DE BAMBOU	194
3.1.	<i>Description du modèle</i>	194
3.1.1.	<i>Géométrie globale de la modélisation de la mise en place de la précontrainte dans les assemblages pour le bambou</i>	194
3.1.2.	<i>Description des différents matériaux constituant le maillage</i>	195
3.1.3.	<i>Description des conditions aux limites et des interactions entre les éléments</i>	197
3.1.4.	<i>Détermination de la taille des éléments du modèle</i>	198
3.2.	<i>Comparaison entre la réponse du système et les résultats expérimentaux pour un essai : l'essai 8</i> 200	
3.2.1.	<i>Réponse globale</i>	200
3.2.2.	<i>Contraintes dans le matériau fibreux au niveau de l'assemblage</i>	204
3.3.	<i>Comparaison de l'ensemble des essais avec le modèle</i>	207
4.	MODELISATION DES ASSEMBLAGES PRECONTRAINS POUR LES AVIVES DE BOIS.....	209
4.1.	<i>Description du modèle bois</i>	209
4.2.	<i>Description des différentes étapes de la modélisation</i>	211
4.2.1.	<i>Description d'ensemble du modèle</i>	211
4.2.2.	<i>Phase de densification – suppression de la charge</i>	211
4.2.3.	<i>Phase de blocage des avivés dans le premier boîtier</i>	214
4.2.4.	<i>Phase de flexion des avivés</i>	215
4.2.5.	<i>Phase de traction du système</i>	216
4.3.	<i>Description de la taille des éléments de l'avivé de bois</i>	217
4.4.	<i>Comparaison entre la réponse du système et les résultats expérimentaux pour un essai : l'essai 1</i> 217	
4.4.1.	<i>Réponse globale</i>	217
4.4.2.	<i>Contraintes dans le matériau fibreux</i>	220
4.5.	<i>Comparaison de l'ensemble des essais avec le modèle</i>	222
5.	CONCLUSION SUR LA MODELISATION DES ASSEMBLAGES FIBREUX PAR UN MODELE MESOSCOPIQUE	225
CHAPITRE 5. AMELIORATION ET OPTIMISATION DES ASSEMBLAGES PRECONTRAINS		228
.....		
1.	OPTIMISATION DE L'ASSEMBLAGE PRECONTRAIT POUR UN CHAUME DE BAMBOU	229
1.1.	<i>Phase de calcul par éléments finis</i>	229
1.2.	<i>Phase d'interpolation</i>	231
1.2.1.	<i>Introduction aux réseaux de neurones</i>	231
1.2.2.	<i>Implémentation du réseau de neurones pour l'interpolation des données discrètes issues du MEF</i> 237	
1.3.	<i>Phase d'optimisation</i>	241
1.3.1.	<i>Choix de l'algorithme d'optimisation utilisé</i>	241
1.3.2.	<i>Principe de fonctionnement des algorithmes évolutionnistes</i>	245
1.3.3.	<i>Optimisation de l'assemblage précontraint pour les chaumes de bambou</i>	250
1.3.4.	<i>Perspectives et conclusion sur les assemblages précontraints pour les chaumes de bambou</i>	256
2.	AMELIORATION DE L'ASSEMBLAGE POUR LES AVIVES DE BOIS.....	257

2.1.	<i>Essais sur un nouveau matériau : le LVL</i>	257
2.2.	<i>Proposition d'un nouvel assemblage pour éviter l'apparition de rupture prématurée.....</i>	262
2.3.	<i>Conclusion et perspectives sur les assemblages précontraints pour les aivés de bois ou dérivés.</i>	267

INTRODUCTION GENERALE

Pour ériger des constructions, il est nécessaire de lier des éléments entre eux, quel que soit le matériau mis en œuvre. Cette phase de la construction s'appelle la phase d'assemblage. Les façons d'assembler sont propres à chaque matériau et constituent souvent une difficulté majeure pour l'homme de l'art qui se doit d'adapter les techniques standards pour assurer le passage des efforts aux configurations des édifices les plus complexes. Pour limiter leur impact sur le comportement des structures, les assemblages les plus performants sont conçus pour avoir une raideur initiale très importante (sans glissement initial) et une limite de résistance élevée et parfaitement maîtrisée. Au-delà de cette limite, les assemblages performants se doivent d'avoir en général un comportement plastique permettant une dissipation d'énergie importante lors de sollicitations de type sismique, par exemple, ce qui permet d'éviter les effondrements brutaux. Ces trois caractéristiques se retrouvent dans les assemblages précontraints largement utilisés dans les constructions métalliques. Le principe de ces assemblages est de faire transiter un effort entre deux éléments par frottement ce qui est permis par l'introduction d'un effort de compression perpendiculaire à l'effort à transmettre.

Dans le contexte actuel de lutte contre les gaz à effet de serre, le matériau bois reprend la place qui était la sienne en construction de part sa faible dépense énergétique pour sa mise en œuvre et le fait qu'il permette de piéger durablement du carbone. Les assemblages utilisés pour lier ce matériau montrent cependant, pour la plupart, un comportement souvent fragile et une limite de résistance variable et parfois difficile à garantir. La place à l'innovation est donc ouverte.

L'objectif de ce travail est d'examiner l'applicabilité du principe de la précontrainte sur le matériau bois et donc d'en montrer les limites et les avantages éventuels. Concrètement, il s'agit de réaliser des assemblages capables de faire transiter des efforts axiaux dans des avivés de bois par adhérence et de caractériser leur comportement.

Pour parvenir à ce résultat et trouver l'idée permettant d'appliquer ce principe, il est choisi de se baser sur des premiers travaux réalisés à l'ENSTIB au cours desquels de la précontrainte a été mise en œuvre sur un autre matériau fibreux naturel utilisé en construction : le bambou.

Pour faire transiter des efforts par frottement entre des éléments en matériau fibreux, il est nécessaire d'appliquer au matériau des efforts de compression transversaux importants. Au regard de la bibliographie, peu de travaux suffisamment orientés autour de ce sujet sont disponibles. Une étape importante de caractérisation à froid nécessitant la mise au point de protocoles particuliers est développée. Pour lever le doute sur l'influence d'un seuil de densification élevé sur

le comportement en traction du bois, pouvant remettre en cause le principe de précontrainte, une étude particulière est conduite jusqu'au niveau anatomique.

Dans le but de comprendre et simuler le fonctionnement des assemblages réalisés, une phase de modélisation par la méthode des éléments finis est entreprise. Après une étude bibliographique des modèles non linéaires disponibles à l'heure actuelle, il s'est avéré que peu de travaux ont été menés pour prendre en compte le comportement du bois loin dans son domaine plastique en compression transversale et que les modèles disponibles nécessitent une caractérisation fine et difficile de la matière : une approche plus pragmatique est alors retenue. Elle est la plus simple possible dans le but de se nourrir de manière quasi exclusive des caractérisations effectuées précédemment.

A l'issue de cette étape de modélisation, une démarche d'optimisation des assemblages est mise en place ce qui permet d'aboutir à une amélioration de ces derniers.

Ce travail présente donc de manière originale un nouveau principe d'assemblage bois destiné à être utilisé en structure ou dans l'ameublement. Des protocoles d'essais et une manière de modéliser simple et précise pour aborder une problématique au contour complexe et peu étudiée jusqu'à présent sont largement développés.

Chapitre 1.

Application du principe de la précontrainte pour le bois

L'objectif de ce chapitre est de rassembler les éléments bibliographiques portant sur la précontrainte dans les assemblages, de montrer les apports et les limites de cette technique. La précontrainte dans les assemblages métalliques en sert d'introduction, puis les spécificités dans le domaine du bois sont abordées.

1. PLACE DE LA PRECONTRAINTE DANS LA CONSTRUCTION

1.1. Exemple des assemblages métalliques

En structure, un assemblage permet de lier des composants c'est-à-dire qu'il permet le passage des efforts des éléments les uns aux autres. Les assemblages jouent un rôle primordial au sein d'une structure puisqu'ils permettent la fabrication de cette dernière en éléments séparables et transportables, l'ancrage du bâtiment dans les fondations et la liaison de différents types de matériaux. En plus de leurs rôles mécaniques, les assemblages doivent répondre à des critères esthétiques et financiers liés au bâtiment fabriqué. Ils ont un rôle fondamental dans la stabilité du bâtiment, en particulier dans les conditions extrêmes (séismes, feu...etc.).

Pour comprendre l'intérêt des assemblages précontraints, il est tout d'abord nécessaire de montrer comment ceux-ci prennent place parmi les différents types d'assemblages utilisés principalement dans les bâtiments métalliques. Deux familles d'assemblages se distinguent en construction : les assemblages cohésifs et les assemblages mécaniques.

Pour les assemblages cohésifs, deux types de procédés existent : le collage qui est peu utilisé en construction métallique et le soudage. Ce dernier procédé permet d'assembler des pièces par liaison intime de la matière par un apport extérieur, en général de métal fondu. Ce mode d'assemblage permet d'assurer la continuité de la matière et donc d'assurer une transmission optimale des efforts tout en restant discret et esthétique. Il ne permet pas un démontage aisé mais est facilement réalisable sur site.

Pour les assemblages mécaniques, quatre procédés principaux peuvent être distingués : les rivets posés à chaud, les rivets posés à froid (boulons sertis), les goujons et les boulons. Le boulonnage est le moyen de fixation en construction métallique le plus répandu du fait de sa facilité de mise en œuvre, de sa fiabilité et de sa flexibilité. Un boulon est constitué d'une vis d'un écrou et éventuellement de rondelles.

Les boulons normaux (appelés également ordinaires) sont fabriqués en aciers doux ou mi durs et sont mis en œuvre avec un serrage non contrôlé. La reprise des efforts perpendiculaires à l'axe de la vis se fait par cisaillement de cette dernière après transmission des efforts par pression de contact dans l'épaisseur des pièces. Pour la mise en place des vis dans les perçages, un jeu est nécessaire ce qui implique l'apparition d'un glissement de l'assemblage au cours de son chargement.

Les boulons à serrage contrôlé ou boulons précontraints présentent le même aspect que les boulons normaux mais sont obtenus à partir d'acier à haute limite élastique. Leur filetage et leur graissage sont réalisés de telle manière à ce qu'ils puissent garantir un serrage important. Lors de la mise en œuvre, un couple de

serrage complété d'un angle de rotation impose un allongement contrôlé du boulon. L'allongement de la vis produit par équilibre un effort de serrage parallèle à l'axe de celle-ci et donc perpendiculairement au plan de contact des pièces (Figure 1). Ainsi, contrairement aux boulons normaux, la reprise des efforts perpendiculaires à l'axe de la vis se fait par frottement à l'interface des pièces assemblées, proportionnellement à l'effort de précontrainte. Sur la figure 1, les pièces ① et ② ne glissent pas tant que l'effort devant transiter entre ces pièces ne fait pas dévier la réaction d'appui par rapport à la verticale au-delà de l'angle d'adhérence φ qui forme le cône de frottement. Ce mode d'assemblage permet de transmettre des efforts perpendiculaires à l'axe du boulon sans jeu initial. Dans certaines conditions, à l'état limite ultime, le cisaillement de la vis peut également devenir une limite tout comme un boulon ordinaire.

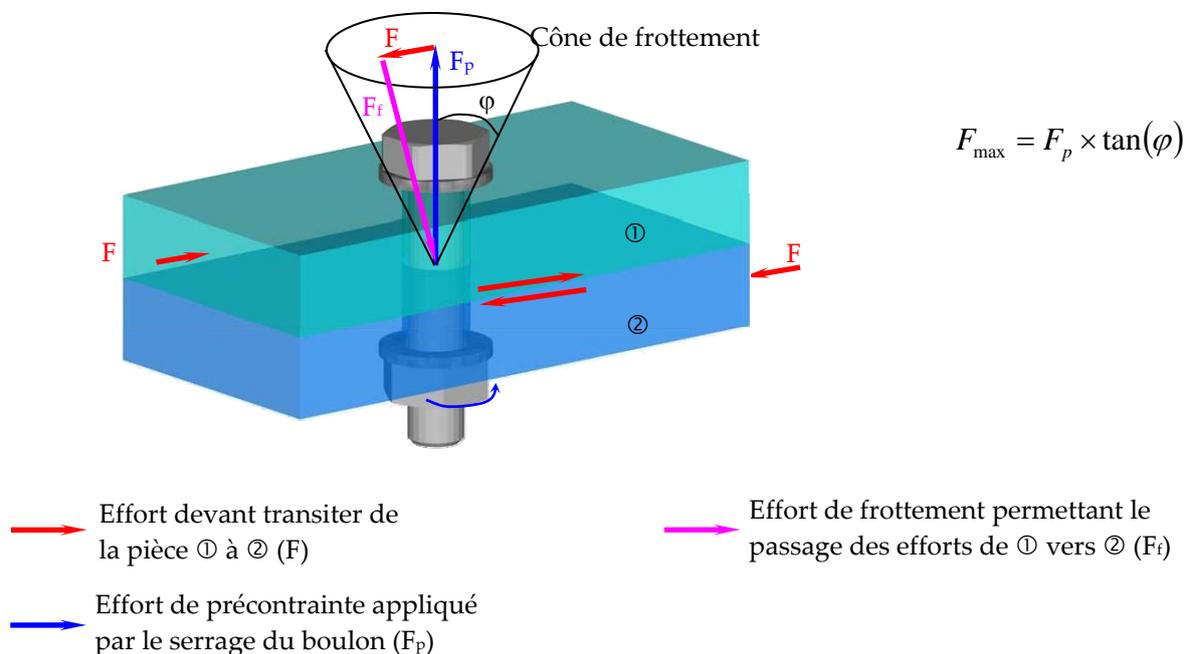


Figure 1 : Passage des efforts entre deux pièces pour un assemblage métallique utilisant des boulons précontraints

Pour comprendre le comportement des trois assemblages principaux utilisés en construction métallique (boulons ordinaires, boulons précontraints et soudage), il est possible de comparer leurs comportements dans le cas d'un joint de continuité par double éclissage. Cette comparaison est réalisée sur la figure 2 qui montre que les trois modes d'assemblages présentent des comportements très différents.

Le cordon de soudure dont le principe est une liaison par fusion de l'acier, permet de retrouver le comportement de la matière comme s'il n'y avait pas d'assemblage : l'ensemble présente alors un comportement très rigide (sans glissement) au début de la sollicitation puis un comportement plastique lié à l'acier.

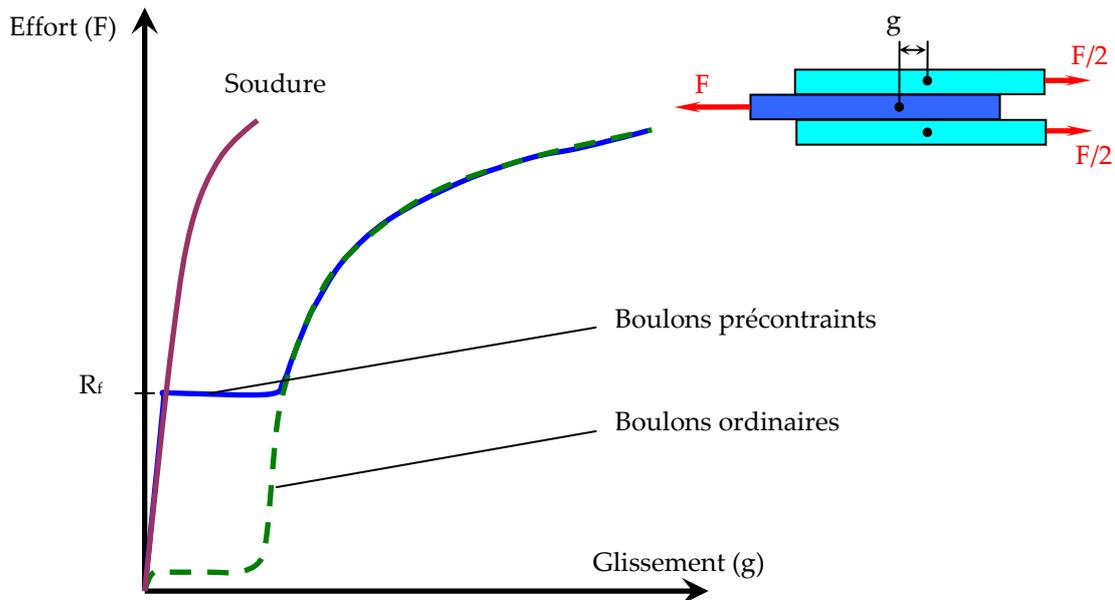


Figure 2 : Comportement schématique de trois joints de continuité en métal liés par trois types d'assemblages : un cordon de soudure, des boulons ordinaires et des boulons précontraints à une force R_f (d'après Hirtz et.al. [HIR 2006])

Les boulons ordinaires sont montés avec jeux : leur comportement commence alors par un glissement généralement limité réglementairement. Une fois le boulon en contact avec les plaques sollicitées, l'effort transite par le cisaillement du boulon.

Pour les boulons précontraints, il n'y a pas de glissement initial. Tant que la charge appliquée est inférieure aux forces de frottements introduites par la précontrainte, le comportement de l'assemblage se rapproche de celui de l'assemblage par cordons de soudure même si les phénomènes mis en jeu ne sont pas les mêmes. Dans le cas des boulons précontraints, l'effort passe d'une pièce métallique à l'autre par frottement. Une fois que l'effort à faire transiter dépasse l'effort de frottement induit par la précontrainte, il y a glissement et le comportement devient quasi-identique à celui d'un boulon ordinaire : les efforts transitent par cisaillement du boulon.

De manière générale, les assemblages précontraints sont des assemblages qui permettent le transfert d'un effort F d'une pièce vers l'autre par frottement, ce dernier étant permis par un effort de compression (effort de précontrainte) perpendiculaire à l'effort F . Ce type d'assemblage est mécanique ce qui confère l'avantage d'être démontable et réalisable sur site. En outre, il offre trois spécificités par rapport aux autres assemblages :

- Sa raideur initiale est grande et s'approche de celle du matériau lui-même,
- Sa résistance est maîtrisée par l'effort de précontrainte introduit,

- Une fois cet effort de précontrainte dépassé, la ductilité de l'assemblage est importante ce qui permet une dissipation de l'énergie lors de sollicitations sismiques par exemple.

En construction métallique, les assemblages précontraints présentent des avantages certains par rapport aux autres types d'assemblages. La question du transfert de cette technologie au matériau bois peut alors se poser.

1.2. Les assemblages précontraints pour le matériau bois

Le bois est un matériau naturel issu de l'usinage de troncs d'arbres ce qui lui confère des propriétés physiques et mécaniques différentes dans les trois directions de l'espace : le bois est dit orthotrope. Il est possible de différencier trois directions : la direction longitudinale parallèle à l'axe du tronc, la direction radiale perpendiculaire à la tangente aux cernes d'accroissement de l'arbre et la direction tangentielle (Figure 3).

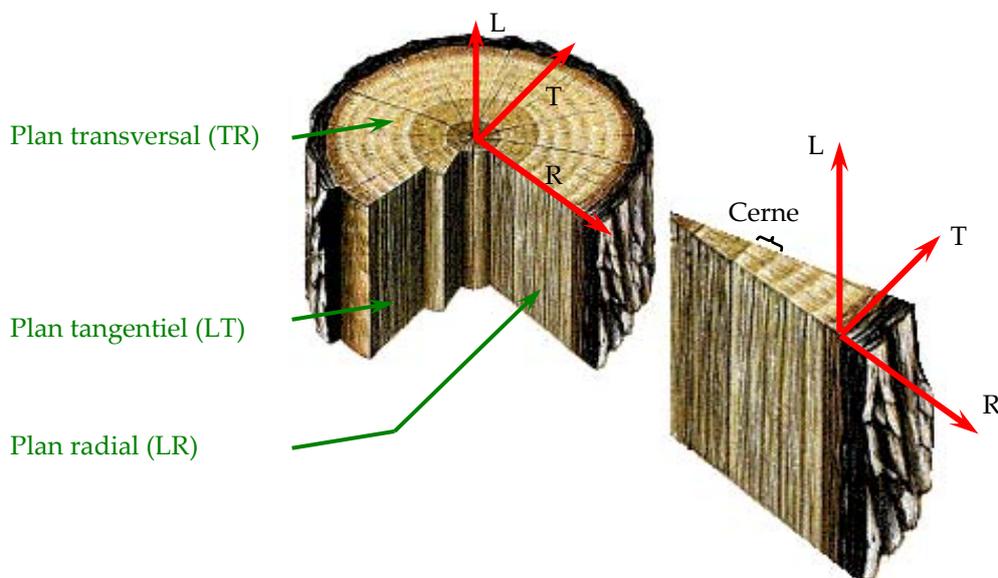


Figure 3 : Les différents plans d'orthotropie du matériau bois [Référence inconnue]

Les éléments structuraux réalisés à partir des troncs d'arbre sont la plupart du temps des volumes parallélépipédiques c'est-à-dire que leurs longueurs est au moins quatre fois plus grande que les dimensions transversales. En structure, la dimension la plus grande est la direction longitudinale. Cette dernière possède les propriétés mécaniques en traction et en compression bien plus élevées par rapport aux directions transverses comme l'indique le tableau 1 au niveau des modules d'élasticité. Le même constat peut être fait au niveau des résistances.

Caractéristique	Feuillus	Résineux
Module longitudinal (MPa)	14400	13100
Module radial (MPa)	1810	1000
Module tangentiel (MPa)	1030	636

Tableau 1 : Comparaison entre les modules d'élasticité du bois dans ses trois directions d'orthotropie [TRO 2001]

Pour transposer directement le principe de précontrainte des boulons en construction métallique pour le matériau bois, c'est-à-dire si les pièces ① et ② de la figure 1 étaient en bois, il serait nécessaire d'appliquer un effort de compression sous la tête des boulons très important sur le matériau dans la direction radiale ou tangentielle. Or, la limite élastique du bois en compression dans ces directions est très faible ce qui paraît limiter rapidement l'intensité de l'effort normal sur les deux avivés de bois et donc l'effort transmissible par frottement.

Dans la bibliographie, des assemblages précontraints en bois au sens strict n'ont pas été trouvés. Cependant, des structures bois utilisant la précontrainte comme moyen de liaison ont été réalisées. Pour illustrer ce genre de structure, il est possible de se référer aux brevets de Accorsi et.al. [ACC 1992] ou celui de Ray [RAY 1998] présentés sur la figure 4. Dans les deux cas, une succession d'éléments en bois sont liés entre eux par frottement grâce à une ou plusieurs barres de précontrainte. Dans ces deux exemples, il n'y a pas réellement d'assemblage précontraint : c'est la structure elle-même qui est précontrainte.

Les assemblages précontraints sont des liaisons dont les efforts transitent par frottement ce qui est permis par un effort de compression important. Ce type d'assemblage n'existe pas dans la bibliographie pour le matériau bois. Cependant, existe-t-il des assemblages qui introduisent dans le matériau des efforts de compression transversaux permettant le passage d'une partie des efforts à faire transiter longitudinalement ? Pour répondre à cette question, un récapitulatif rapide des assemblages bois utilisés en construction est réalisé et une application du principe de précontrainte sur ceux-ci est proposée.

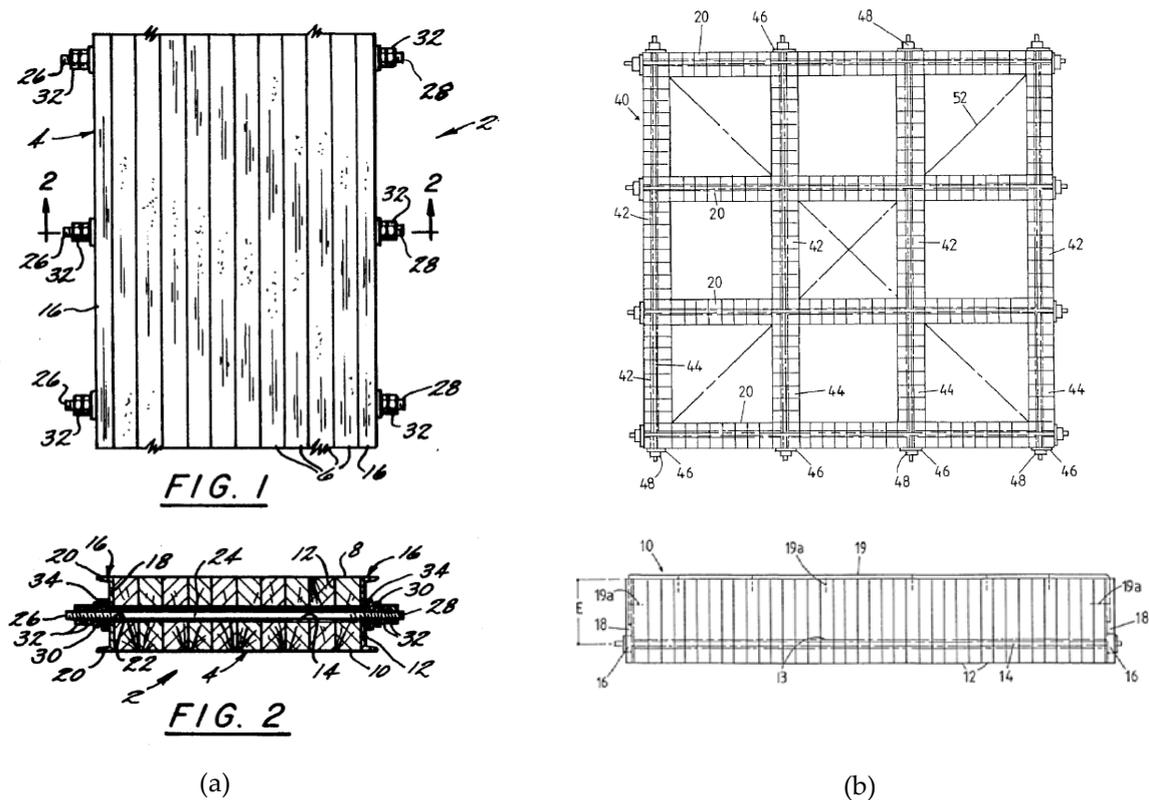


Figure 4 : Deux exemples de structures précontraintes en bois
 (a) Brevet de Accorsi et.al. [ACC 1992] et (b) Brevet de Ray [RAY 1998]

1.3. Les assemblages utilisés dans la construction bois

Dans la plupart des structures, les assemblages bois doivent transmettre des efforts de traction ou de compression d'une pièce de bois vers une autre pièce (de bois ou d'acier) avec ou sans angle par rapport à la direction longitudinale. Ce paragraphe passe en revue les principaux assemblages utilisés dans la construction bois. Ces connecteurs sont divisés en deux catégories : les assemblages traditionnels à base de tiges non collées et des assemblages hautes performances à base de tiges collées. Après analyse du comportement mécanique de chacun de ces assemblages, une application d'assemblage utilisant de la précontrainte dans chacune des deux catégories est proposée. Le comportement des assemblages utilisés en construction bois est ensuite comparé à celui des assemblages précontraints.

1.3.1. Les assemblages de type tiges

Dans le domaine de la construction bois, le terme assemblage par tiges métalliques rassemble les connecteurs constitués de broches, de boulons, de pointes ou de vis. La gamme de diamètres les plus fréquemment rencontrés pour ces tiges s'étend de 2 mm pour les clous à 30 mm pour les broches ou les boulons.

Les broches sont des tiges métalliques cylindriques de diamètre supérieur à 8 mm et de longueur variable liée à la géométrie de l'assemblage. Le bois (ou les plaques métalliques) constituant un assemblage broché est percé à un diamètre égal

ou inférieur d'un dixième de mm à celui de la tige qui est alors entrée en force. L'adhérence des broches dans le bois assure leur maintien en position mais n'est pas suffisante pour maintenir les différents éléments de l'assemblage lors de son montage et surtout lors des phases de chargement de la structure. Pour garantir le fonctionnement de l'assemblage, il est nécessaire d'ajouter aux broches un ou plusieurs boulons ou de remplacer les broches classiques par des broches boulonnées munies à leur extrémité d'écrous et de rondelles.

Les boulons ordinaires de charpentes sont toujours couplés à des rondelles spéciales par leurs dimensions (épaisseur et diamètre). Le perçage des pièces de bois est réalisé avec un jeu. Le fonctionnement de l'assemblage est garanti par le boulon lui-même mais le jeu diamétral augmente le glissement initial et diminue la rigidité par rapport aux assemblages brochés.

Pour expliquer le passage des efforts au niveau d'un assemblage de type broche ou boulon, il est choisi ici de se baser sur un exemple. L'assemblage choisi est constitué d'un avivé de bois central lié à deux éléments latéraux en bois ou en acier par l'intermédiaire d'un organe de type broche ou boulon (Figure 5 (a)). La pièce de bois centrale est sollicitée uniquement par un effort de traction longitudinale qui est transféré aux pièces latérales par l'intermédiaire de l'organe. Lors de leur sollicitation (Figure 5 (b)), l'organe et la pièce centrale sont isolés pour analyser les efforts mis en jeu (Figure 5 (c) et (d)).

L'organe métallique transfère les efforts de la pièce centrale aux pièces latérales par cisaillement. Il impose au bois un effort de compression longitudinale localisé. Cet effort est accompagné par des efforts de cisaillement de part et d'autre de la zone comprimée. Ainsi, alors que la pièce centrale est globalement sollicitée en traction longitudinale, l'assemblage par tige impose des efforts de compression et de cisaillement localisés.

Les clous ou les vis sont des organes plus élancés que les broches ou les boulons et sont enfoncés en force dans le bois (un pré-perçage est possible pour de gros diamètre et/ou du bois dur). Le comportement de ces tiges par rapport aux broches ou aux boulons est différent et ce pour deux raisons. Tout d'abord le fait d'avoir un diamètre inférieur à 8 mm provoque une sollicitation de la structure du bois à une échelle plus petite ce qui induit des comportements différents. De plus, le fait d'être enfoncé dans le bois en force provoque une étreinte latérale du clou par le bois. Ce phénomène augmente l'effort d'adhérence qui est une caractéristique fondamentale de ce type d'assemblage.

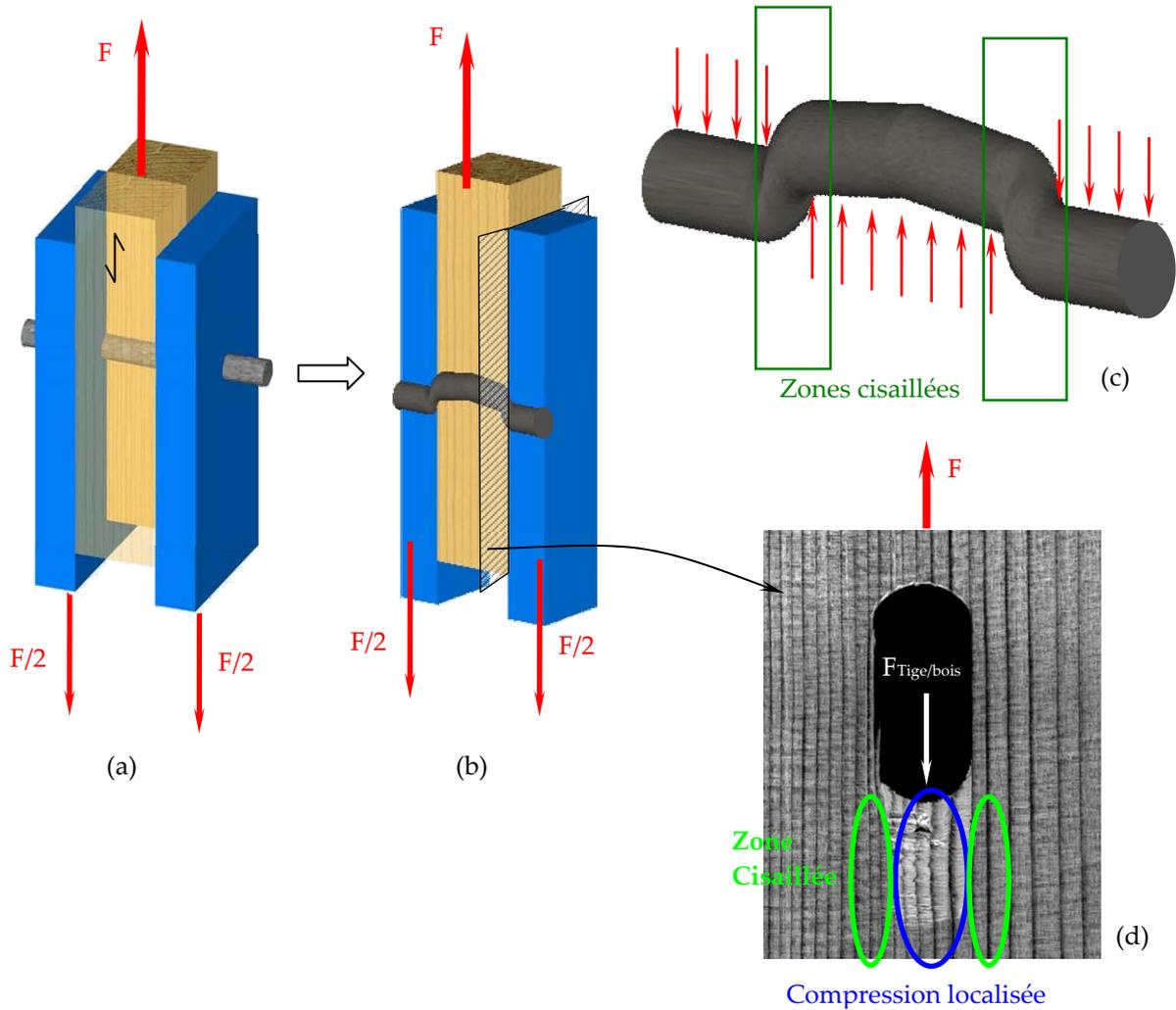


Figure 5 : Passage des efforts dans un assemblage de type tige

Afin d'appréhender le comportement de ces différents organes, la figure 6 [STE 1995] compare leur loi de comportement en se basant sur un joint de continuité à double cisaillement semblable à celui présenté pour les assemblages aciers sur la figure 2.

Sur la figure 6, les assemblages de type tige sont comparés à un assemblage collé. Lorsque le joint de colle est correctement réalisé, l'assemblage casse au niveau du bois dans la direction sollicitée : dans le cas de l'exemple choisi, la rupture a lieu en traction longitudinale ce qui explique le comportement fragile de l'assemblage. Ce type d'assemblage permet donc de mobiliser toute la capacité résistante du matériau bois ainsi que toute sa raideur. En construction, il n'est pas utilisé en tant qu'assemblage, du fait des difficultés de contrôle de ses qualités sur chantier.

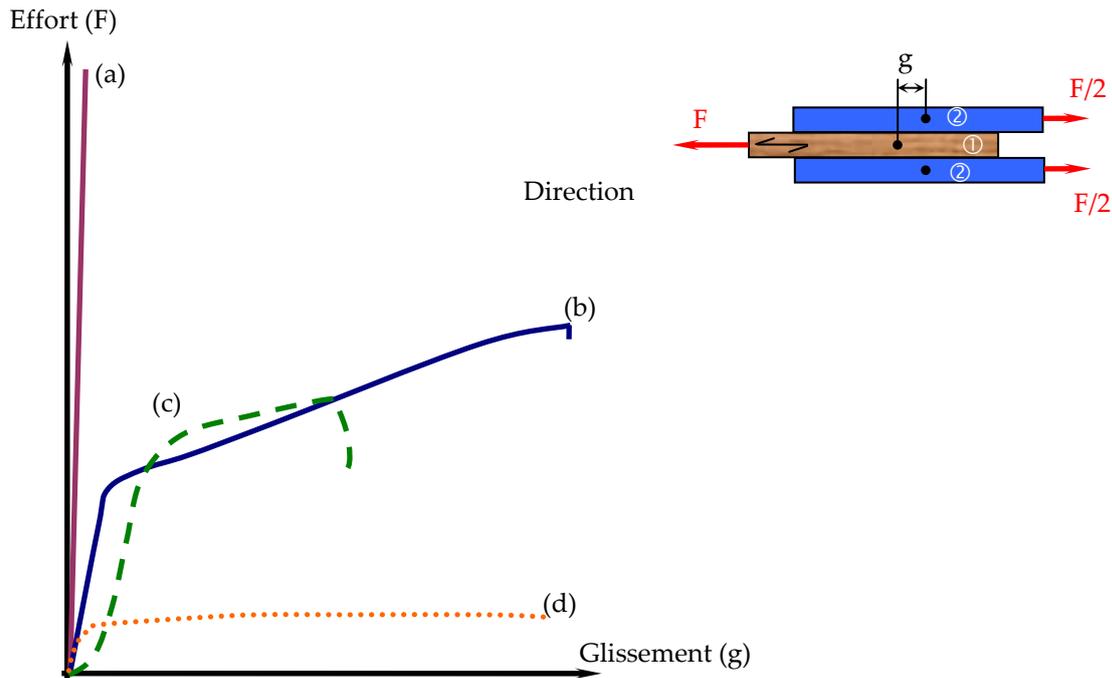


Figure 6 : Comparaison de différents assemblages bois (d'après [STE 1995]) :

(a) assemblage collé ($12,5 \text{ mm}^2$), (b) assemblage broché (broche de 14 mm)

(c) assemblage boulonné (boulon de 14 mm), (d) assemblage cloué (clou de 4,4 mm)

Le comportement des assemblages de type tige se décompose en quatre phases successives. Tout d'abord une phase de mise en place qui est plus ou moins importante suivant le type d'organe. Pour les assemblages de type broches ou clous cette phase est peu marquée car les organes sont introduits en force dans le bois. Elle est beaucoup plus importante pour les boulons à cause du jeu diamétral initial. A cette première phase fait suite une étape pseudo linéaire qui correspond à la zone de fonctionnement en service de l'assemblage dans la structure. Une fois mobilisée la résistance du bois et/ou la capacité plastique des tiges, une zone non linéaire apparaît. Elle s'explique par le matage du bois en compression et/ou la progression de la plastification au cœur de la section de l'organe métallique. Plusieurs rotules plastiques peuvent ainsi se développer le long d'un organe jusqu'à l'apparition d'un mécanisme de ruine plastique. Ces différents modes de « plastification » dépendent des dimensions des éléments et de la qualité des matériaux en présence. Finalement la rupture fragile de l'assemblage survient.

Des essais ont été réalisés sur des joints de continuité brochés avec (en utilisant les notations de la figure 6) comme pièce ①, un avivé de bois et comme pièces ②, deux plaques métalliques. Ce type de joint de continuité a pour fonction de faire transiter des efforts de traction longitudinale. Cependant le mode de rupture observé n'est pas une rupture en traction longitudinale mais une rupture en traction transversale (Figure 7). Ceci s'explique par le fait que l'effort de traction longitudinale dans la pièce ① transite dans les plaques métalliques par l'intermédiaire des broches qui imposent des efforts localisés de compression et de

cisaillement ce qui induit l'apparition d'efforts parasites de traction transversale. Or, les capacités résistantes du bois dans la direction transversale sont plus faibles que celles dans la direction longitudinale : il y a ruine prématurée de l'assemblage.

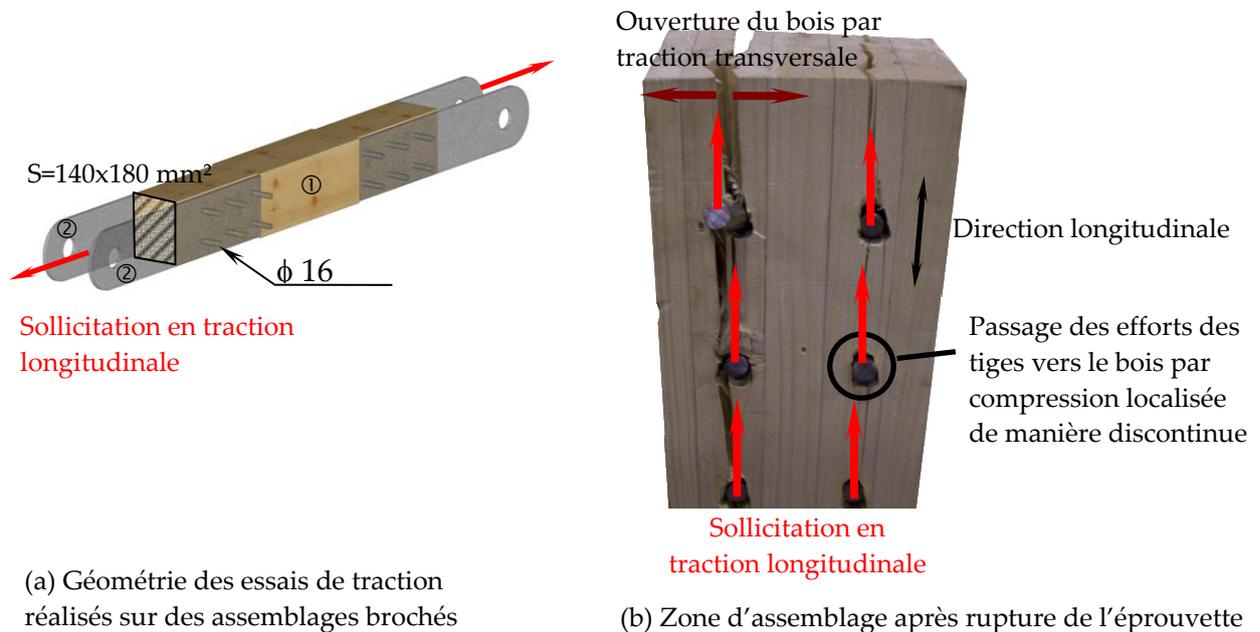


Figure 7 : Essai réalisé sur un assemblage broché en double cisaillement

Pour introduire des efforts de précontrainte dans un assemblage broché, Bocquet [BOC 1999] propose de faire transiter les efforts de traction avec un angle par rapport au fil du bois. Cet angle permet de resserrer l'assemblage sur lui-même en injectant dans le bois des efforts de compression transversale. Ce système est illustré sur la figure 8. L'avivé de bois utilisé a une section de $150 \times 40 \text{ mm}^2$ et une longueur de 700 mm.

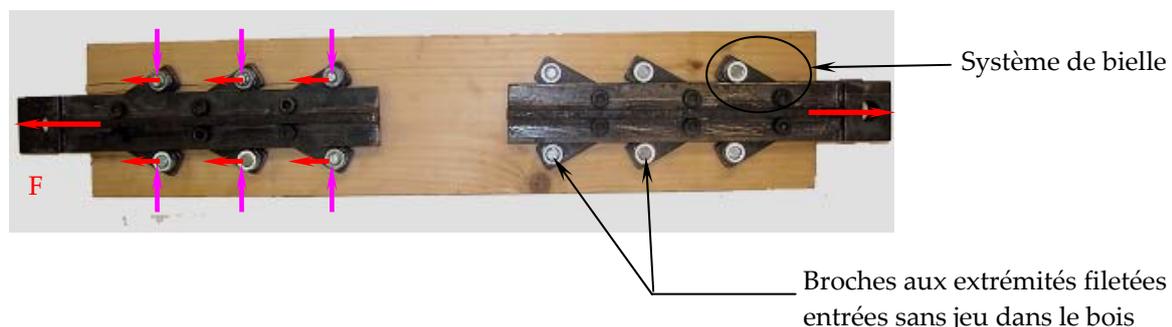


Figure 8 : Dispositif expérimental permettant d'injecter de la précontrainte dans un assemblage broché

Le système permettant de transmettre l'effort de traction F est constitué, pour chaque extrémité, de deux plaques métalliques (une de part et d'autre de l'avivé) munies de six bielles. Ce dispositif permet d'injecter dans l'avivé des efforts de

traction longitudinale et de compression transversale. Cet assemblage permet de rendre le système plus ductile au moment de la rupture. Il est possible de comparer un assemblage broché « classique » à cet assemblage broché avec précontrainte (Figure 9). Dans le cas de l'assemblage avec précontrainte, la force à rupture est plus faible mais la rupture n'est pas fragile et permet de dissiper de l'énergie dans le cas de sollicitations de type sismique.

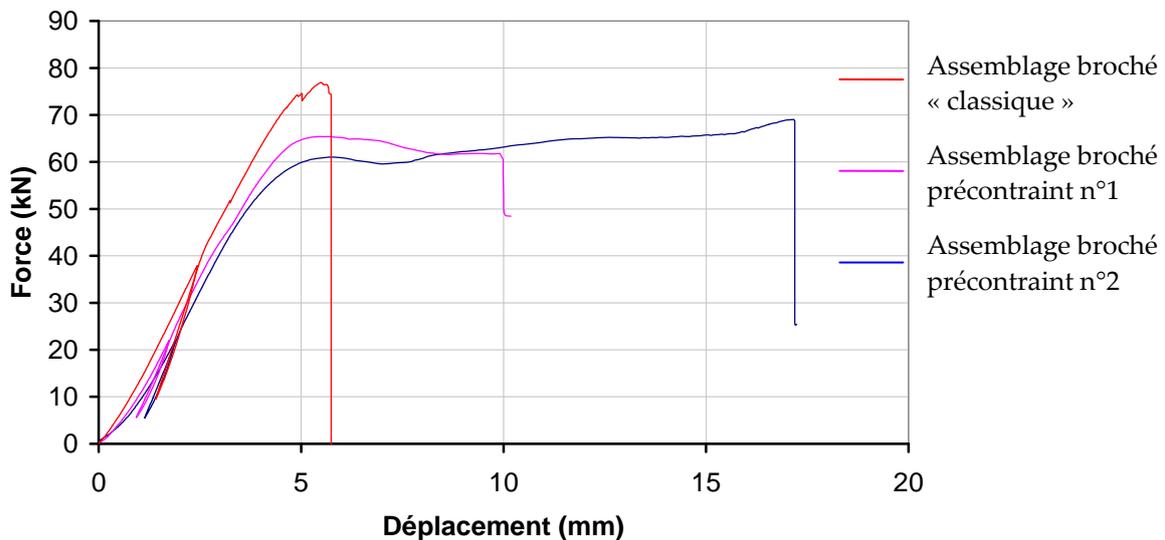


Figure 9 : Comparaison du comportement entre un assemblage broché « classique » et précontraint

1.3.2. Les assemblages collés hautes performances

Avec les progrès des colles et la maîtrise toujours plus accrue de la qualité des matériaux comme le bois lamellé-collé, les tiges collées en acier se sont développées dans la construction bois. Ainsi, dans les années 1980, sont apparues des liaisons entre des poutres de bois ainsi que des renforcements des structures par l'intermédiaire de tiges collées. En France, une entreprise possède un avis technique sur ce type d'assemblage : il s'agit du procédé Résix® détenu par l'entreprise Simonin Frères [AT 2008].

En 2005, des joints de continuité utilisant la technologie des tiges collées Résix® ont été testés à l'ENSTIB (Campus Fibres d'Epinal). Ces essais ainsi que leur exploitation sont décrits dans [TOU 2006]. Les deux poutres, d'une longueur de 3570 mm, assemblées par ce type de connecteur sont testées en flexion quatre points injectant dans la zone d'assemblage un moment pur. Les assemblages testés sont constitués de deux rangées de huit tiges filetées en acier 8.8 de 16 mm de diamètre et ancrées de 600 mm. Ces tiges sont placées à l'extrémité des poutres dans des perçages de 22 mm, soit un jeu au diamètre de 6 mm (Figure 10).

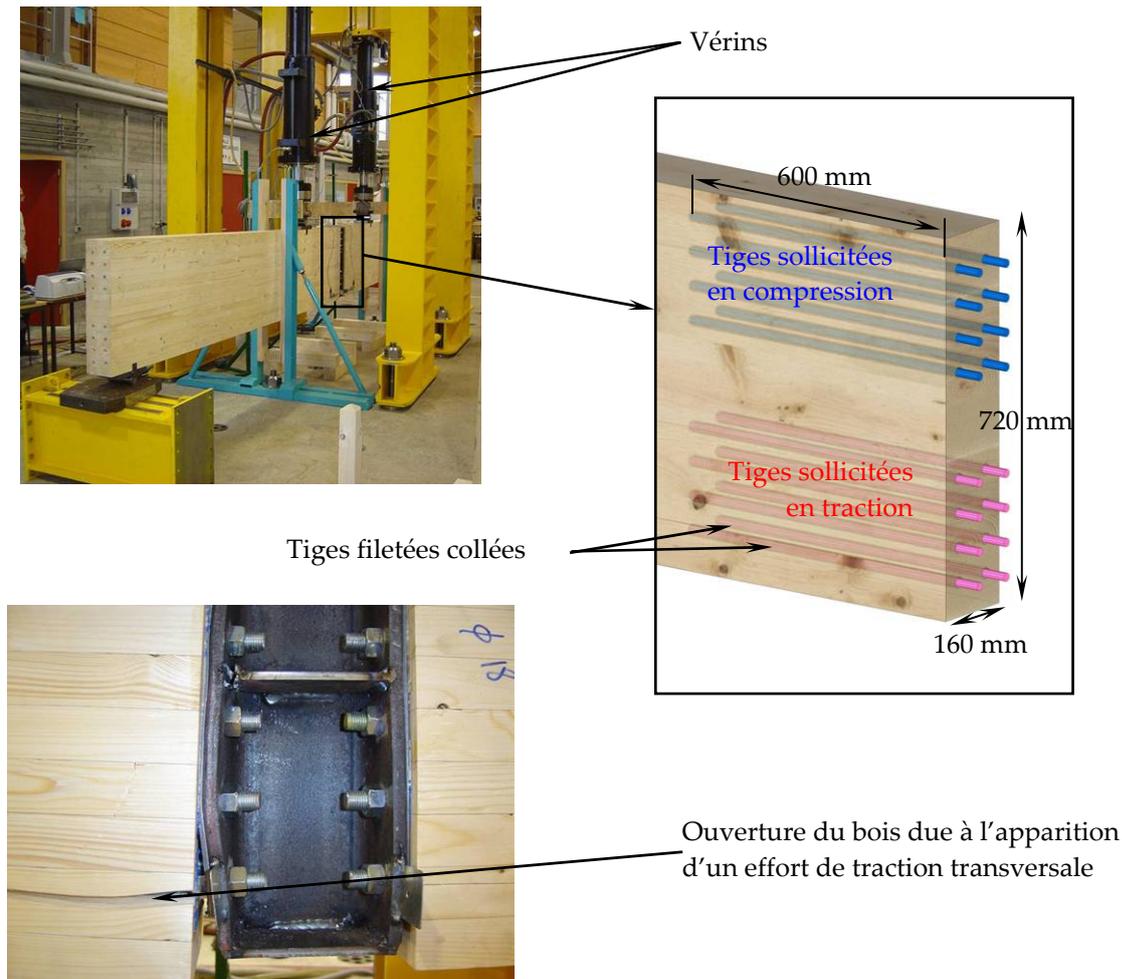


Figure 10 : Test d'un joint de continuité utilisant la technologie des tiges collées en moment pur et mode de rupture observé

Au niveau de l'assemblage, le moment est constant et l'effort tranchant est nul (flexion quatre points). L'âme métallique liant les deux poutres étant très rigide, les tiges inférieures sont sollicitées en traction et les tiges supérieures en compression : le bois ne devrait donc subir que des efforts longitudinaux. Or, la figure 10 montre que les assemblages de ce type cassent en traction transversale au niveau des tiges les plus sollicitées en traction longitudinale.

Le passage de l'effort des tiges vers le bois est progressif : l'effort de compression et de traction dans le bois au niveau de la zone d'assemblage et donc le moment dans le bois au niveau de la zone d'assemblage n'est pas constant. Alors que le moment global dans la poutre reconstituée est constant dans la zone d'assemblage, il n'est pas constant dans le bois. Cette variation de moment dans le bois entraîne l'apparition d'un effort tranchant ce qui implique la ruine prématurée de l'assemblage par ouverture du bois.

Pour augmenter la résistance du bois en traction transversale, l'entreprise Simonin Frères le renforce en collant des tiges perpendiculairement au sens du fil (fretage de l'assemblage). Dans ce cas, la résistance de l'assemblage est augmentée

de 30% et les ruptures observées sont la plupart du temps des ruptures de bloc autour des quatre ou six tiges les plus sollicitées en traction. Dans ce cas, l'assemblage va jusqu'à la capacité résistante du bois en traction longitudinale. Le comportement de l'assemblage est quasiment linéaire jusqu'à rupture : la raideur initiale est importante mais il y a peu de dissipation d'énergie possible en cas de sollicitation dynamique de type sismique à part si des pièces métalliques sont prévues à cet effet. L'assemblage monopolisant en traction et en cisaillement le volume de bois du bloc autour des tiges, il permet de s'approcher des capacités résistantes du matériau.

Pour ajouter un effet de précontrainte à ce type d'assemblage, il est possible d'introduire des tiges collées à un angle autre que 90° par rapport aux autres tiges filetées.

Le système breveté Bertsche® permet le transfert d'efforts de traction longitudinale par l'intermédiaire d'éléments collés. Parmi ces éléments, des tiges collées dans les deux directions transversales du bois permettent de diffuser le cisaillement sur plusieurs plans et donc de monopoliser un maximum la résistance du matériau.

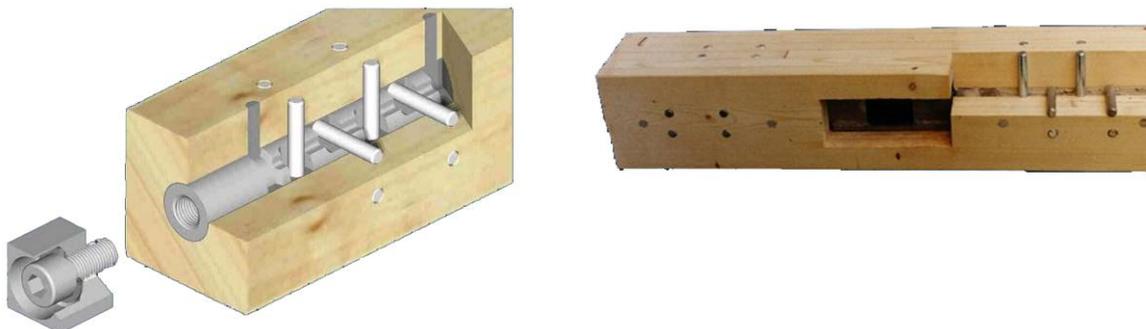


Figure 11 : Assemblage utilisant le système Bertsche® ([BER 2009])

Le fait de fretter les assemblages introduit de la précontrainte dans le système. Blaß et Blejtka [BLA 2008] ont travaillé sur du frettage pour des assemblages brochés. La figure 12 présente le principe sur un assemblage constitué de deux broches. Lorsque ce système est sollicité en traction longitudinale par la force F , les vis en se déformant resserrent le système sur lui-même par injection d'efforts de compression transversale. Ce dispositif repousse la rupture fragile du système qui devient alors plus ductile.

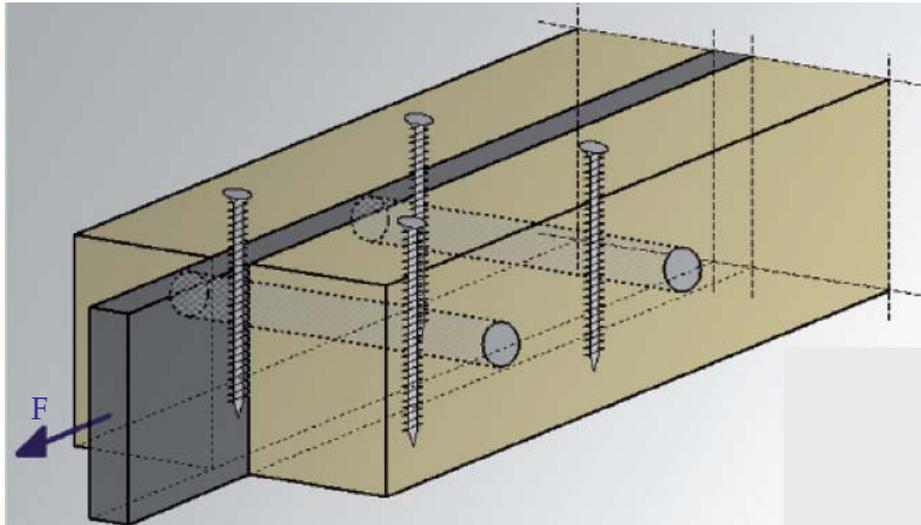


Figure 12 : Dispositif de frettage d'un assemblage broché [BLA 2008]

1.3.3. Comparaison mécanique des assemblages bois avec les assemblages précontraints en acier

Le premier point fort qui caractérise les assemblages précontraints par rapport aux autres assemblages est leur forte raideur initiale. Pour les assemblages de type tige, ce premier point est difficile à assurer. Ceci s'explique par une phase de mise en place plus ou moins importante notamment pour les assemblages boulonnés. De plus, ce type d'assemblage étant discontinu il met en jeu peu de matière (surface projetée des tiges sur le bois). La raideur des assemblages utilisant des tiges collées, est plus importante. En effet, la raideur rotationnelle des joints de continuité réalisés en tiges collées présentés sur la figure 10, est de l'ordre de $6,6 \cdot 10^4$ kN.m/rad. Malgré cette rigidité d'assemblage importante, une augmentation de la flèche de 25% par rapport au calcul de la poutre sans joint de continuité peut être observée.

La deuxième caractéristique des assemblages précontraints est de garantir un seuil de résistance (noté R_f sur la figure 2). Cette approche de seuil garanti n'est pas permise pour les assemblages bois actuels.

La possibilité de dissiper de l'énergie au-delà d'un certain seuil défini est la dernière caractéristique mécanique remarquable pour les assemblages précontraints. Ce phénomène est parfois possible pour les assemblages de type tige. Ce comportement non linéaire de ces assemblages au-delà d'un certain seuil (non garanti) s'explique par le matage du bois sous les tiges qui peuvent se déformer et donc entrer dans le domaine plastique ce qui permet de dissiper de l'énergie en cas de sollicitation de type sismique. En revanche, pour les assemblages collés, comme la rupture a lieu par bloc, le comportement est celui du bois en traction longitudinale ou en cisaillement soit un comportement fragile. Dans les deux catégories d'assemblages (traditionnels et hautes performances), le fait de fretter l'ensemble par les dispositifs décrits ci-dessus, permet d'augmenter cette phase plastique permettant la dissipation d'énergie.

Les difficultés de transcrire les assemblages précontraints de l'acier au bois sont liées aux propriétés mécaniques du matériau qui sont intimement liées à son anatomie. Aussi, pour aller plus loin dans l'application de la précontrainte dans les assemblages bois, la partie suivante décrit succinctement l'anatomie du matériau.

2. DESCRIPTION ANATOMIQUE DU BOIS ET LES CONSEQUENCES SUR SES PROPRIETES MECANIQUES

Dans ce paragraphe, comme dans toute la suite de ce document, il ne sera considéré que le bois de résineux qui est le plus répandu dans le domaine de la construction. Pour comprendre les phénomènes mécaniques qui ont lieu dans les assemblages bois, une description anatomique succincte du matériau est réalisée. Cette description permettra de mieux appréhender les propriétés mécaniques du bois.

2.1. Description multi-échelle du bois

Le bois est un tissu de l'arbre qui a deux rôles principaux : un rôle de conduction de la sève brute des racines vers les feuilles et un rôle de soutien mécanique. Il peut être utilisé par l'Homme comme matériau structural après usinage des grumes tirées des arbres. Ces derniers ont une croissance annuelle qui se traduit à l'échelle macroscopique, au niveau du bois, par l'apparition d'un cerne concentrique annuel. Dans les régions tempérées, il y a un arrêt de la période végétative au cours de l'hiver. L'arrêt du fonctionnement de l'assise génératrice des cellules du bois (cambium) se traduit par l'apparition de limites de cernes qui permet de distinguer un cerne par année. Ce phénomène explique en partie le caractère orthotrope du bois (Figure 3). Pour les résineux, suivant la rapidité de croissance de l'arbre, le cerne est plus ou moins large : pour un Epicéa, cette largeur peut aller de moins d'un millimètre pour les arbres à croissance lente à 8 mm [TRO 2001]. Ainsi, entre deux arbres différents, la largeur des cernes est très différente mais sur un même arbre, la largeur entre deux cernes peut varier également. Dans la direction longitudinale apparaît le fil du bois qui est plus ou moins rectiligne. A cette échelle macroscopique, le matériau bois est caractérisé par de nombreuses singularités et notamment les nœuds qui correspondent à l'implantation des branches sur le tronc d'arbre.

A l'échelle mésoscopique¹, il est possible de distinguer deux types de bois successifs au niveau de chaque cerne. Il existe un bois initial (ou bois de printemps) qui est formé au début de la période végétative et un bois final (ou bois d'été) formé plus tard dans la saison. Ces deux types de bois sont caractérisés par leur masse volumique très différente : pour du Douglas, Thoby [THO 1975] a mesuré des écarts allant de 250 à 850 kg/m³ entre le bois de printemps et le bois d'été au sein d'un même cerne. D'après Holmberg et al. [HOL 1999], cet écart passe de 300 kg/m³ à 1000 kg/m³ pour de l'Epicéa (Figure 13). Le passage entre le bois initial et final peut se faire de manière brutale (Douglas par exemple) ou progressive (Epicéa par exemple), dans ce cas, le bois entre le bois initial et final est appelé bois intermédiaire. De nombreuses études montrent que les propriétés mécaniques du bois sont fortement liées à leur masse volumique et que plus cette dernière est importante, plus la résistance mécanique du matériau, quelle que soit la direction choisie, est élevée [WAN 1950], [BOD 1982], [KOL 1968], [GIB 1997], [DIN 2000]. Ainsi, au sein d'un même cerne, les variations des propriétés mécaniques sont très importantes et sont liées principalement aux conditions de croissance de l'arbre. Si l'arbre a une croissance lente (forte concurrence de la végétation alentour ou climat froid), sa croissance est lente et ces cernes sont fins. Or pour une espèce de résineux donnée, quelle que soit sa largeur de cerne donc quelle que soit sa rapidité de croissance, l'épaisseur du bois final est relativement fixe. Ainsi, plus l'épaisseur d'un cerne est faible et plus la part de bois d'été est forte donc plus la résistance mécanique du bois est grande.

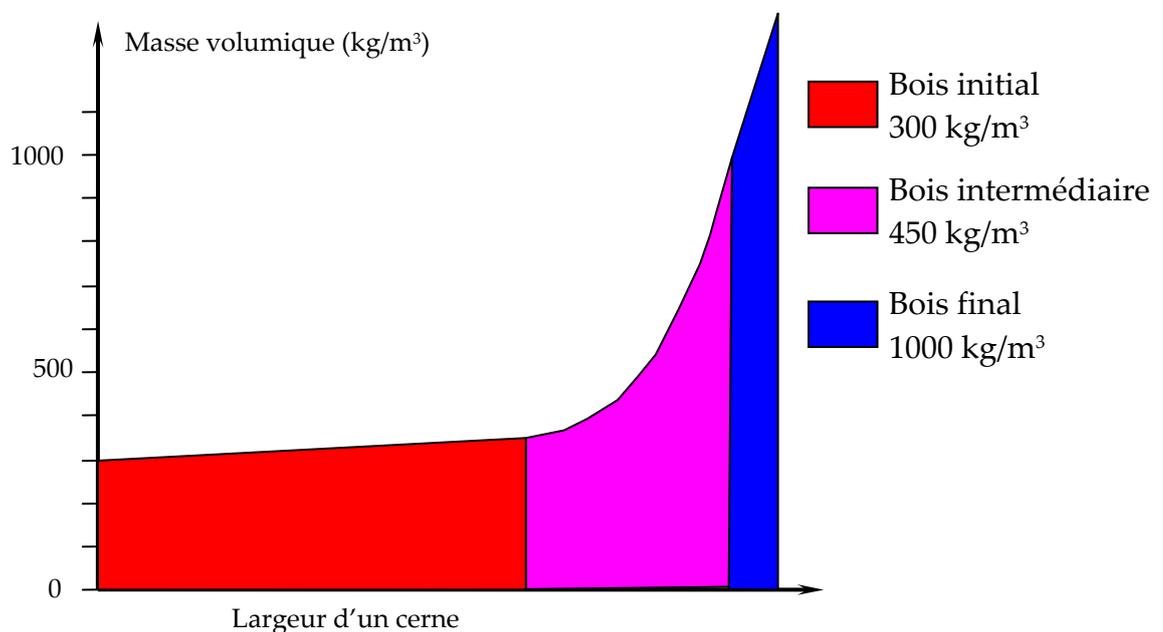


Figure 13 : Distribution de la densité du bois d'Epicéa le long d'un cerne [HOL 1999]

¹ L'échelle mésoscopique est une échelle intermédiaire entre l'échelle microscopique, qui caractérise les atomes ou les molécules, et l'échelle macroscopique du monde quotidien.

A l'échelle des cellules (observation au microscope électronique à balayage), le plan ligneux du bois est observable et trois types de tissus sont distingués : les trachéides, le parenchyme et les rayons ligneux [TRO 2001].

Plus de 90% des cellules du bois de résineux sont des trachéides. Ces cellules jouent à elles seules les deux rôles principaux du bois pour l'arbre : le transport de la sève brute et un rôle mécanique. Ce sont des éléments allongés dans la direction longitudinale de 1 à 8 mm de long aplatis et effilés à leurs extrémités. Au niveau du bois initial, les trachéides ont une section presque carrée d'environ 30 μ m de côté et ont une paroi mince et un lumen large (Figure 14 (a) ①) alors que dans le bois final elles ont une section rectangulaire d'environ 30 μ m dans la direction tangentielle et 10 μ m dans la direction radiale avec des parois épaisses et un lumen réduit (Figure 14 (a) ②). Cette variation des trachéides entre le bois initial et final est une adaptation à la conduction de la sève à la reprise de la période végétative et au soutien de l'arbre en fin de cette même période. Le fait que les lumens du bois final soient plus réduits que ceux du bois initial explique la variation de masse volumique (et donc de résistance mécanique) entre les deux types de bois. Les faces des trachéides (principalement la face radiale) possèdent de nombreuses ponctuations aréolées (Figure 14 (a) ④) qui permettent le transfert de la sève de cellule à cellule. Dans le bois, les trachéides sont arrangées en rangs superposés dans la direction longitudinale. Les différents rangs de trachéides s'empilent les uns sur les autres par superposition de leurs extrémités effilées. Cette superposition des trachéides permet grâce à une concentration importante de ponctuations aréolées au niveau de leurs extrémités le transport de la sève brute sur toute la hauteur de l'arbre. Les trachéides ne possèdent plus de protoplasme (intérieur de la cellule vide) et leur paroi sont lignifiées : elles assurent donc leurs fonctions dans la plante en étant mortes.

Les cellules du parenchyme sont vivantes et ont un rôle de stockage de réserve et d'élaboration de substances comme les tanins. Le parenchyme peut être longitudinal ou radial. Dans le deuxième cas, il porte le nom de rayon ligneux et deux cas existent : les rayons ligneux homogènes qui correspondent à du parenchyme radial seul (Figure 14 (a) ⑥) et les rayons ligneux hétérogènes qui sont du parenchyme radial associé à des trachéides radiales assurant la conduction de la sève dans la direction radiale (Figure 14 (a) ⑤).

Enfin les canaux résinifères (Figure 14 (a) ⑦ et ⑧) sont des cavités tubulaires tapissées de cellules sécrétrices de résine. Ils peuvent faire partie du plan ligneux (cas du Pin, de l'Épicéa, du Mélèze, du Douglas) ou être traumatiques (cas du Sapin, du Cèdre, du Séquoia, du Cyprès, du Tsuga).

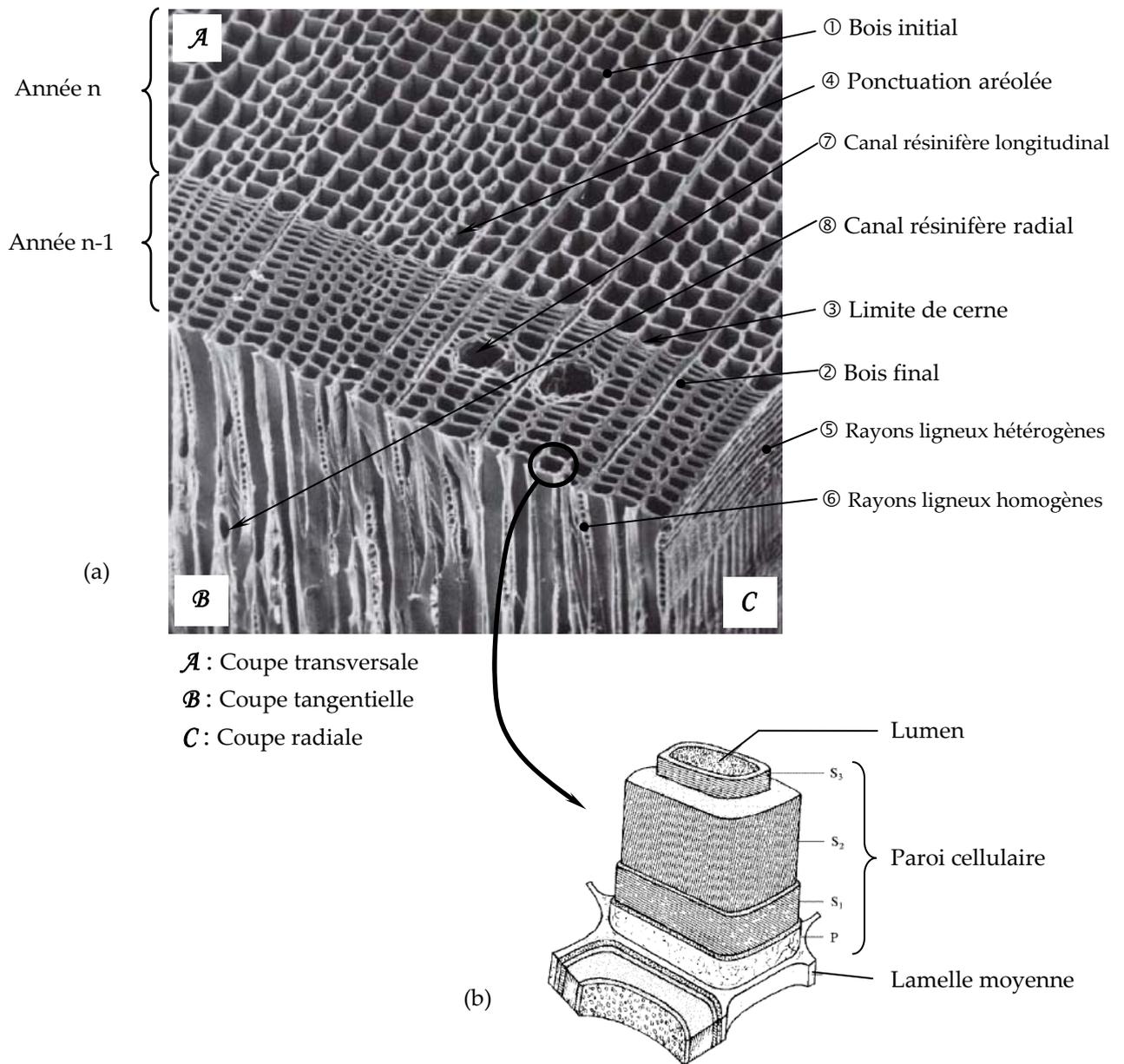


Figure 14 : Constitution du bois de résineux :

(a) Plan ligneux du bois de résineux (zoom : x 190) [SAI 1982]

(b) Schématisation d'une cellule de trachéide d'un résineux d'après Core et al. [COR 1979]

D'un point de vue mécanique, les trachéides ont un rôle prépondérant sur les autres tissus. Ce sont des cellules lignifiées creuses qui présentent trois couches concentriques qui vont de l'extérieur vers l'intérieur : une couche intercellulaire soude les trachéides entre elles (1,5 μ m de large), une paroi primaire tapisse la couche intercellulaire (0,1 μ m de large) et une paroi secondaire (Figure 14 (b)). Cette dernière couche est la partie la plus résistante des trachéides, elle est aussi la plus épaisse. Elle est constituée de trois couches concentriques (appelées S1, S2 et S3) essentiellement constituées de microfibrilles de cellulose qui leur confère leur résistance et dont l'orientation dépend de la couche considérée. Les couches S1 et S3 représentent 10% de l'épaisseur totale de la paroi et leurs microfibrilles ont un angle compris entre 60

et 90° par rapport à la direction longitudinale du bois. La couche S2 représente 75 à 85% de l'épaisseur totale de la paroi et leurs microfibrilles ont un angle de 5 à 30° avec la direction longitudinale du bois [KEL 1994]. Ainsi, l'orthotropie du matériau bois s'explique non seulement par son plan ligneux c'est-à-dire la forme et la disposition des cellules qui la constitue mais également par l'orientation des microfibrilles constituant la paroi des trachéides du bois. Ces microfibrilles apportant la résistance du matériau, leur orientation et la part prépondérante de la couche S2 dans la paroi, explique le fait que le bois soit plus résistant dans sa direction longitudinale.

2.2. Comportement mécanique du bois

Pour des conditions données (température et humidité relative de l'air), le comportement mécanique d'une éprouvette de bois varie suivant deux principaux critères : la direction dans laquelle le matériau est sollicité et le type de sollicitation. Ainsi, suivant le type de sollicitation pure imposé au bois, non seulement la résistance et le module d'élasticité varient mais le matériau peut présenter des comportements fragiles ou élasto-plastiques. Trois comportements sont alors distinguables : un comportement fragile en traction longitudinale ou transversale, un comportement « élasto-plastique » en compression. En cisaillement pur le comportement est fragile, en revanche il est fortement dépendant de l'état de compression transversale.

2.2.1. Comportement fragile du bois en traction

Dans la littérature, trois types de tractions sont envisagés : la traction longitudinale, la traction radiale et la traction tangentielle. Les deux dernières étant proches, elles sont souvent réunies sous le terme de traction transversale. Dans les trois cas, le bois se comporte comme un matériau fragile : une fois sa limite élastique atteinte, il y a rupture.

Pluinage [PLU 1992] cite Gautherin² et donne les résistances en traction dans les trois directions d'orthotropie du bois pour une essence de résineux (Pin sylvestre) : en traction longitudinale, la résistance mesurée est de 80 MPa, dans la direction tangentielle, elle vaut 5 MPa et dans la direction radiale, elle s'élève également à 5 MPa. Ainsi, en traction, le matériau bois est profondément anisotrope : en moyenne sa résistance est 16 fois plus élevée dans la direction longitudinale que transversale.

² Gautherin M.T. (1980), *Critère de contrainte limite du bois massif*, Thèse de Doctorat d'Etat, Paris

2.2.2. Comportement élasto-plastique du bois en compression

Plusieurs auteurs ont étudié le comportement du bois en compression. Gibson et Ashby [GIB 1997] modélisent ce matériau comme étant cellulaire et donnent sa limite élastique en compression dans les trois directions d'orthotropie en fonction de la masse volumique du bois (ρ), de la masse volumique de la matière ligneuse (ρ_{ML}), de la limite élastique de la matière ligneuse dans la direction longitudinale ($\sigma_{y,ML}$) et de coefficients (Tableau 2).

Direction d'orthotropie	Formule donnée par les auteurs	Ordre de grandeur de la limite élastique en compression pour un résineux de classe C24 ($\rho = 420 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{ML} = 1500 \text{ kg/m}^3$ et $\sigma_{y,ML} = 350 \text{ MPa}$)
Longitudinale	$0,34\sigma_{y,ML}\left(\frac{\rho}{\rho_{ML}}\right)$	33,32 MPa
Radiale	$0,20\sigma_{y,ML}\left(\frac{\rho}{\rho_{ML}}\right)^2$	5,49 MPa
Tangentielle	$0,14\sigma_{y,ML}\left(\frac{\rho}{\rho_{ML}}\right)^2$	3,84 MPa

Tableau 2 : Formules permettant le calcul de la limite élastique moyenne du bois dans les trois directions d'orthotropie d'après Gibson et Ashby [GIB 1997] et application de ces formules pour du résineux de type C24

Tout comme pour le comportement en traction, les limites élastiques du bois en compression dans les deux directions transversales sont proches. De plus, pour ce type de sollicitation, le bois est également très anisotrope : sa limite élastique dans la direction longitudinale est de l'ordre de 7 fois supérieure à celle dans la direction transversale.

Une fois cette limite élastique atteinte, le comportement du matériau bois passe dans le domaine non linéaire. A partir des travaux de Tabarsa et Chui [TAB 2000] et Bocquet [BOC 1997], une illustration schématique du comportement en compression pour du résineux au-delà de sa limite élastique dans les trois directions d'orthotropie est présentée sur la figure 15. Dans les trois directions d'orthotropie, ces trois courbes ont les mêmes allures et se découpent en trois zones distinctes : une zone élastique réversible (zone A), un plateau de densification au cours duquel la contrainte est plus ou moins stable (zone B) et une zone de densification au sens strict (zone C). Les phénomènes anatomiques mis en jeu dans les trois directions principales d'orthotropie sont différents.

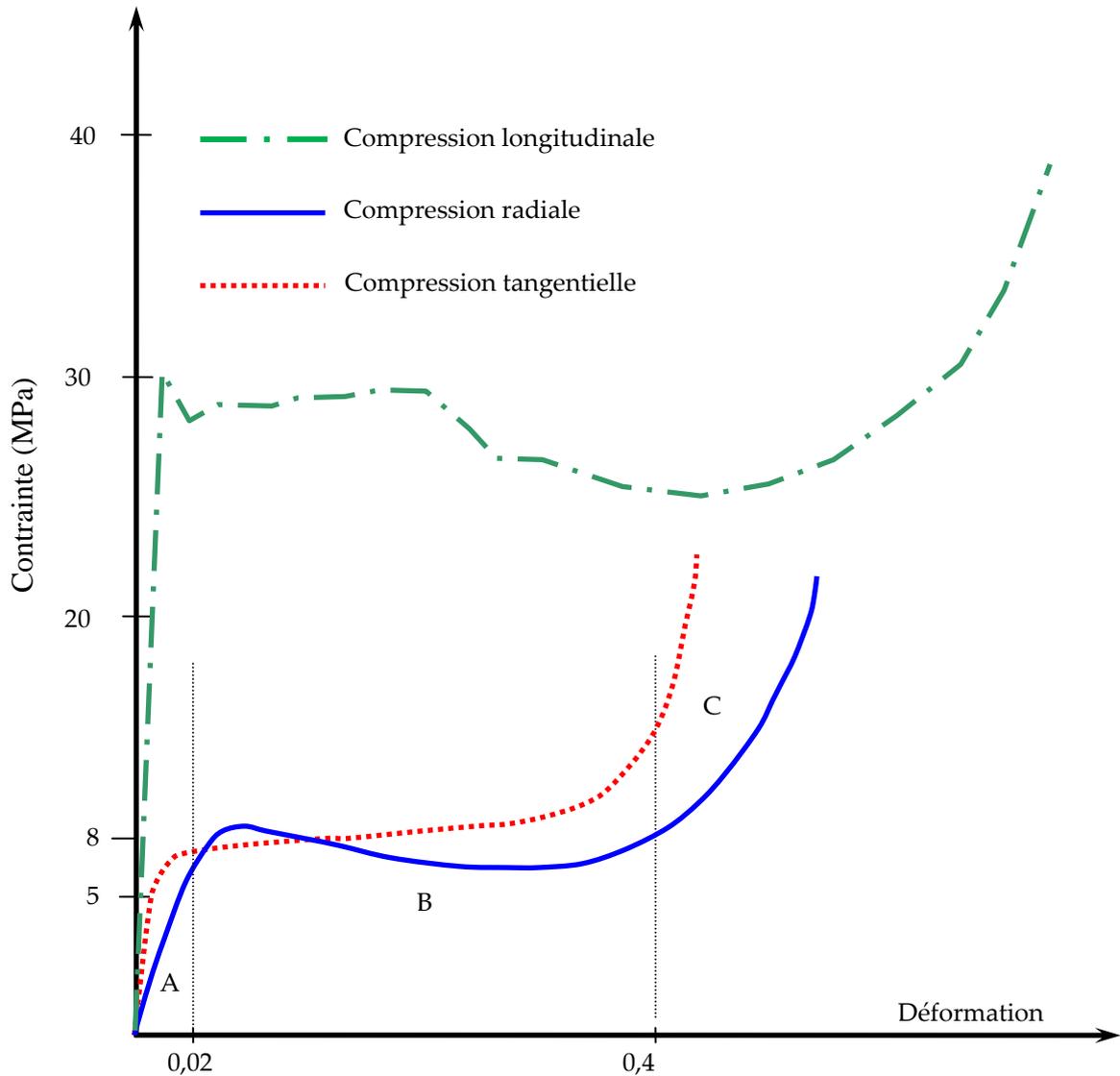


Figure 15 : Allure de la loi de comportement du bois de Picea Abies en compression dans les trois directions d'orthotropie (comportement radial et tangentiel d'après Tabarsa et Chui [TAB 2000] et comportement longitudinal d'après Bocquet [BOC 1997])

La faible résistance du matériau bois en compression transversale fait qu'il est difficile d'y appliquer directement le principe des boulons précontraints à savoir le passage d'efforts longitudinaux par frottement permis par l'application d'un effort de compression transversale important (paragraphe 1.3 de ce chapitre). Pour tenter de résoudre ce problème, il est nécessaire d'observer et d'analyser les phénomènes anatomiques qui ont lieu lors de la compression radiale, tangentielle et mixte (entre radiale et tangentielle) du bois. Pour ce faire, Coutagne [COU 2009] a réalisé un dispositif expérimental pouvant accueillir un cube de bois d'un cm^3 et le comprimer (Figure 16). Ces dimensions permettent la compression sous le stéréomicroscope Olympus SZW12. La surface observée est préalablement préparée au microtome. La compression de l'éprouvette est imposée manuellement par le déplacement d'une plaque épaisse permettant une compression uniforme sur toute la largeur de

l'échantillon. Ce déplacement est permis par un système vis écrou. La mesure du déplacement imposé par la plaque épaisse est permise par lecture directe sur du papier millimétré collé sur le montage au bord de l'espace accueillant l'éprouvette. La déformation est calculée en divisant ce déplacement mesuré par la hauteur de l'éprouvette. Cette déformation est appelée dans le cas de la compression du bois taux de densification.

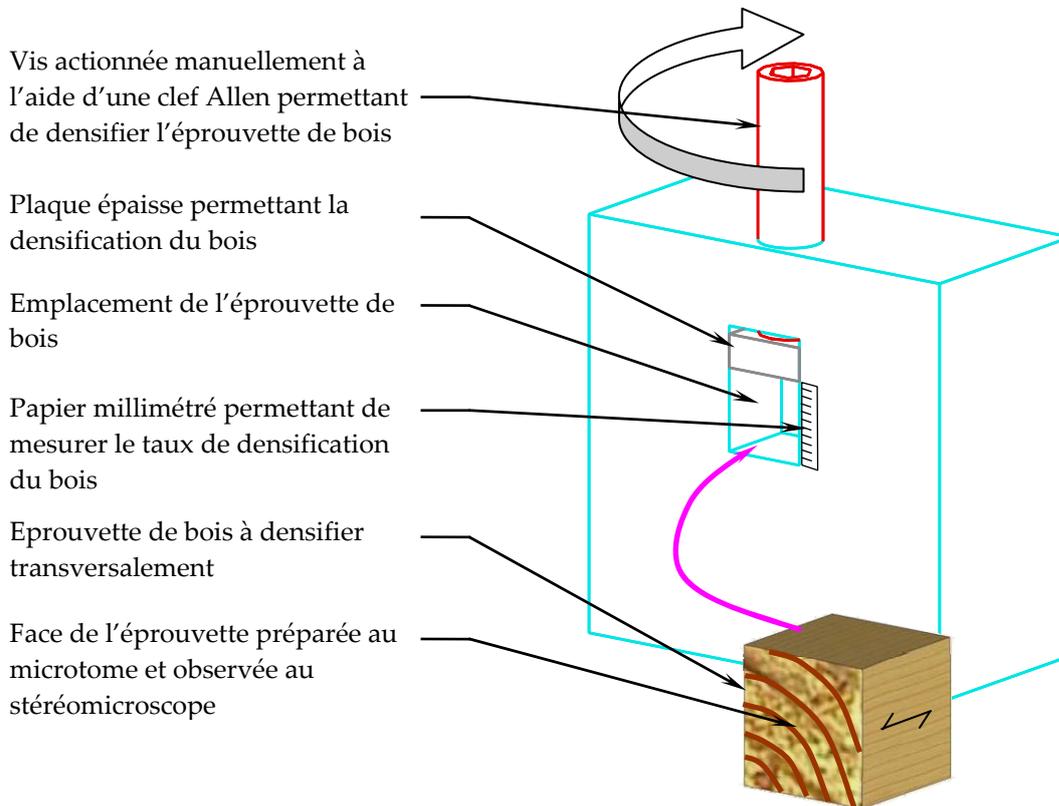


Figure 16 : Dispositif expérimental permettant de densifier une éprouvette de bois et d'observer cette densification au stéréomicroscope

Ce dispositif permet d'illustrer et de compléter les données bibliographiques sur les différentes étapes successives ayant lieu lors de la compression radiale, tangentielle et mixte du bois d'Epicéa

Une chronologie de la compression radiale est présentée sur la figure 17. Elle se divise en cinq étapes distinctes.

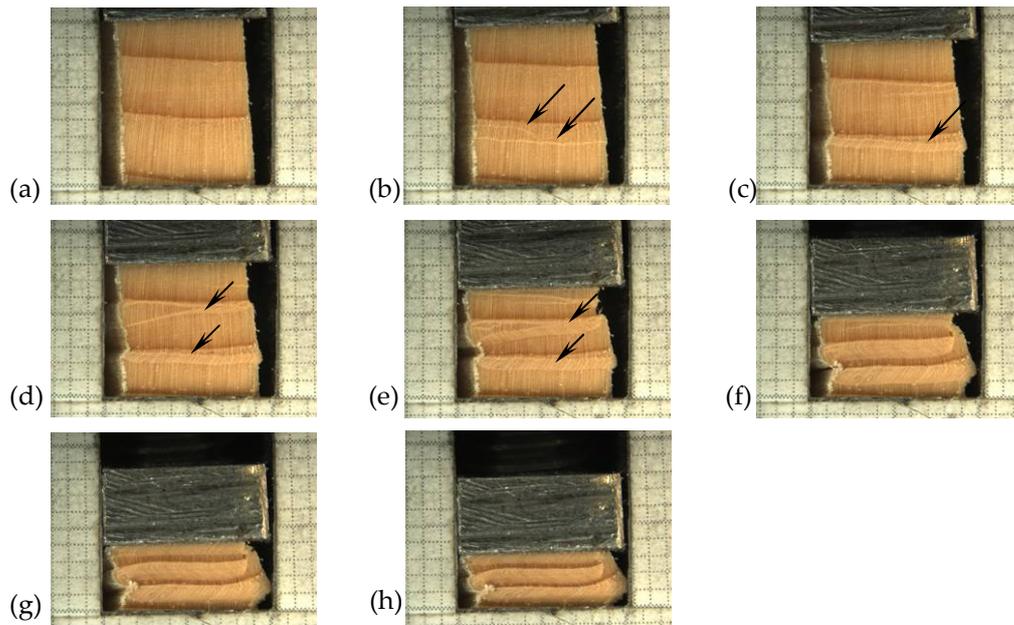


Figure 17 : Observations au stéréomicroscope (Olympus SZW12) de différents stades de la densification radiale d'une éprouvette en bois d'Épicéa (*Picea abies*)

La première étape correspond à la déformation élastique du matériau c'est-à-dire à la zone A de la figure 15. Les cellules fléchissent alors de manière élastique autour de leur lumen. La limite élastique est rapidement atteinte : autour de 5 MPa pour de l'Épicéa à température ambiante et à une humidité de 12%. Cette étape n'est pas visualisée sur la figure 17

La deuxième étape correspond à la rupture de l'éprouvette et au passage dans la zone non linéaire (zone B de la figure 15). La rupture a lieu au niveau des cellules du bois de printemps (Figure 17 (b)) car l'épaisseur de leur paroi est nettement plus faible que celle des cellules d'été (environ 2 μm par rapport à 10 μm). Elle se produit au niveau de la cellule la plus faible entre le cinquième et le dixième rang lorsque la compression se fait dans des conditions de température et d'humidité ambiantes (Ando et Onda [AND 1999 a], [AND 1999 b], Tabarsa et Chui [TAB 1999], [TAB 2000], [TAB 2001]).

La troisième étape est la propagation de cette rupture de rayon en rayon et correspond au plateau de densification c'est-à-dire à la zone B de la figure 15. La propagation de la rupture se fait de manière plus ou moins homogène au niveau du bois de printemps puis du bois intermédiaire et se matérialise sur la figure 17 (b) à (f) par l'apparition de bandes plus claires. Ce phénomène est également observé entre autre par Reiterer et Stanzl-Tschegg [REI 2001]. Ces bandes plus claires correspondent à des cellules du bois initial et intermédiaire ayant leur lumen qui se ferme par effondrement de leur paroi. Le mécanisme de propagation de la rupture des trachéides a été étudié entre autre par Heger [HEG 2004]. Lors de l'écrasement d'une cellule, les points de contact se multiplient ce qui permet la transmission de la contrainte aux cellules d'épaisseurs de parois plus importantes. Ainsi, lors de la compression du bois, la contrainte augmente progressivement dans les cellules ainsi

que le nombre de point de transmission de cette contrainte. Blomberg [BLO 2006] ajoute que le bois de printemps se comprime de 30% de sa taille initiale sans que le bois d'été ne soit affecté.

Une fois que toutes les cellules du bois initial et intermédiaire ont été écrasées (la multiplication des points de contact étant alors généralisée à toute cette zone), et que la contrainte est suffisamment importante, les parois des cellules du bois final commencent à être écrasées (Figure 17 (g)). Il s'agit de la quatrième étape : la contrainte augmente alors plus rapidement (zone C de la figure 15) car les cellules du bois d'été ont des parois plus épaisses et une porosité plus réduite que le bois de printemps.

A partir du moment où toutes les cellules sont déformées (Figure 17 (h)), la contrainte nécessaire pour continuer la densification augmente de façon exponentielle car c'est la paroi cellulaire qui doit être densifiée (Etape 5).

Pour la compression tangentielle, une chronologie des différentes étapes réalisées à partir du dispositif de la figure 16 est présentée sur la figure 18. Tout comme en compression radiale, il est possible de diviser la compression tangentielle en cinq étapes.

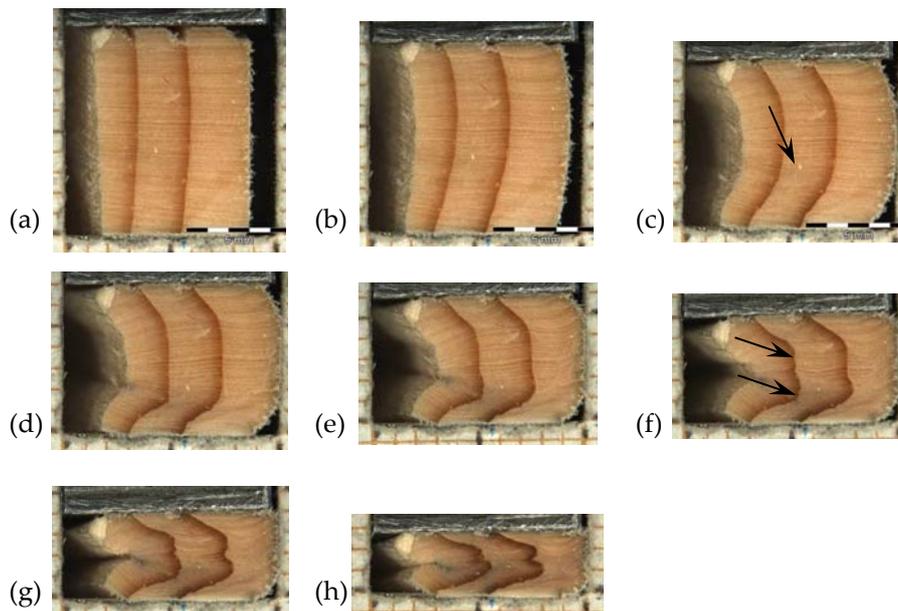


Figure 18 : Observations au stéréomicroscope (Olympus SZW12) de différents stades de la densification tangentielle d'une éprouvette en bois d'Épicéa (*Picea abies*)

Pour appréhender le comportement du bois en compression transversale, il est nécessaire de considérer le matériau comme une structure. Cette dernière se décompose en plusieurs rangées d'éléments rigides : le bois final de chacun des cernes reliés entre eux par des éléments moins rigides : le bois initial et intermédiaire.

Tant que la limite élastique du bois n'est pas dépassée (zone A de la figure 15), la structure est stable et au niveau cellulaire, les cellules fléchissent alors de manière élastique autour de leur lumen. Il s'agit de la première étape de la compression transversale.

La deuxième étape est le passage dans la zone non linéaire de la figure 15 donc la ruine de l'éprouvette. La structure est alors instable et le bois final flambe. Ce flambement s'accompagne de l'écrasement dans la direction radiale de trachéides du bois de printemps (Figure 18 (c)).

L'étape de propagation (Figure 18 (b) à (g)) est marquée par un réarrangement important de la matière ligneuse autour d'un ou plusieurs points de courbure au niveau du bois final (Figure 18 (f)). La matière se réarrange de telle manière que la compression tangentielle devient radiale avec le bois initial qui s'écrase sur lui même (Figure 18 (g)).

Tout comme en compression radiale, une fois que les vides cellulaires du bois initial ont disparu, la contrainte augmente puisque la compression se fait sur le bois final (passage de la zone B à la zone C de la figure 15). Pour finir, tous les vides cellulaires disparaissent et la contrainte augmente de manière exponentielle.

La compression mixte se divise également en ces cinq mêmes phases (Figure 19).

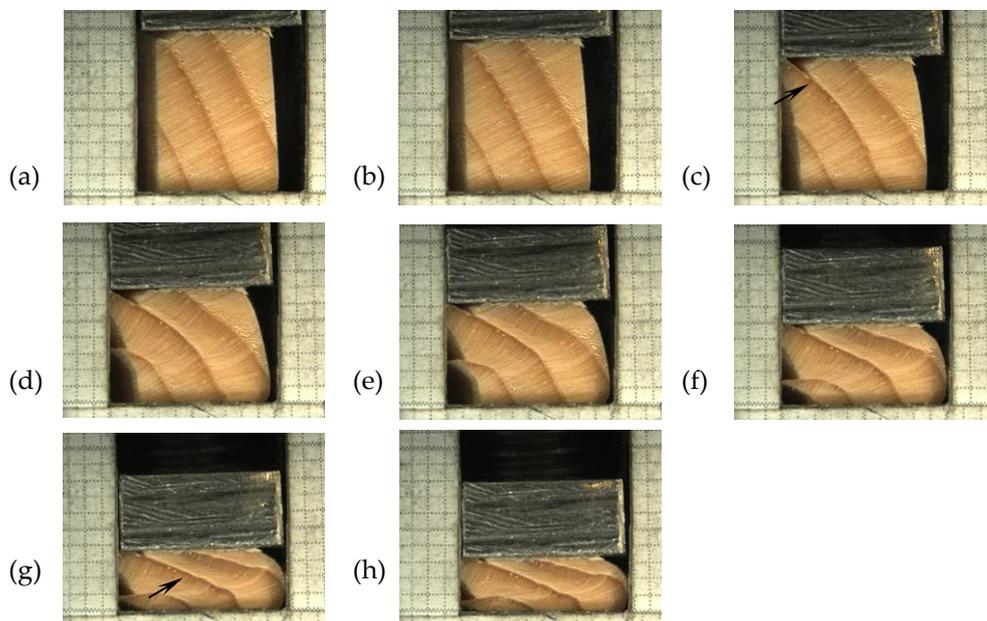


Figure 19 : Observations au stéréomicroscope (Olympus SZW12) de différents stades de la densification mixte d'une éprouvette en bois d'Epicéa (*Picea abies*)

Le passage de la phase élastique à la phase non linéaire peut se faire soit par flambement du bois final, soit par cisaillement du bois de printemps lors du glissement relatif de deux cernes (Figure 19 (c)). La phase de propagation se

caractérise par une rotation des cernes accompagnée d'un glissement de ces derniers les uns par rapport aux autres (Figure 19 (d),(e),(f)). Tout comme la compression tangentielle, le réarrangement de la matière ligneuse est tel que la compression devient radiale (Figure 19 (g)).

En compression longitudinale, les mécanismes mis en jeu sont très différents de ceux observés dans les directions transversales : ils sont illustrés sur la figure 20. Une fois la charge appliquée sur le bois suffisante pour dépasser la limite élastique, la rupture des lits de trachéides permet de combler les vides de la microstructure que forme le matériau. Gibson et Ashbi [GIB 1997] ont mis en évidence deux modes de rupture différents. Pour les bois de faible densité (densité inférieure à 0,3 comme le Balsa), les parties terminales des trachéides se rompent et s'emboîtent les unes dans les autres (Figure 20 (b)). Pour les bois plus denses, un autre mode de rupture apparaît : il s'agit de la rupture par bande de cisaillement où les parois des trachéides flambent sous la charge ce qui produit une instabilité globale dans un lit de trachéides (Figure 20 (c)). Ces instabilités par lit de trachéides expliquent le fait que le plateau de densification en compression longitudinale présente des décharges (correspondant à l'effondrement d'un lit de trachéide) et des recharges (Figure 15). Comme pour la compression transversale, l'effondrement de la matière en compression longitudinale peut être vu comme l'effondrement d'une structure.

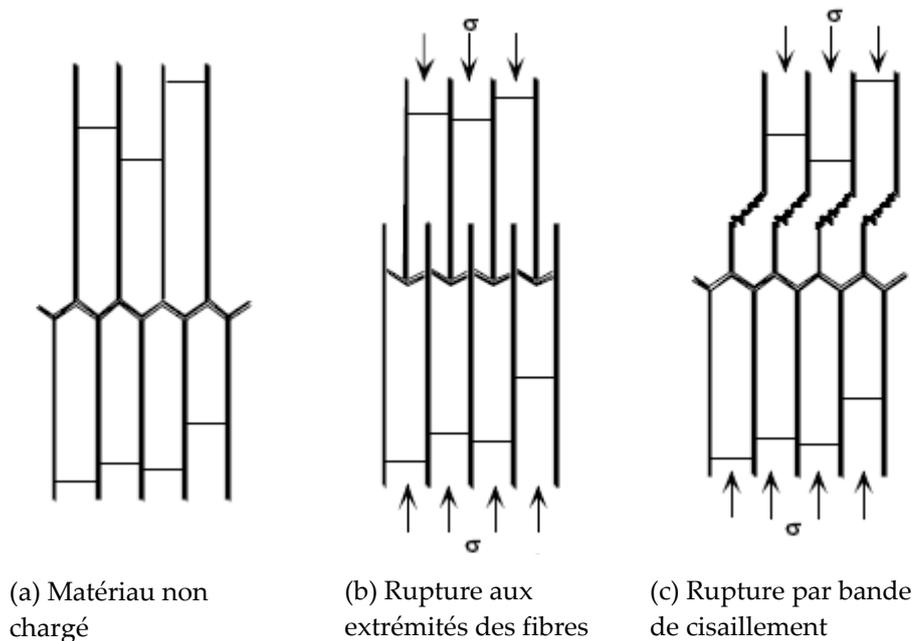


Figure 20 : Différents modes de ruptures des lits de trachéides en compression longitudinale du matériau bois [GIB 1997]

Pour les trois types de compression ainsi que leurs différentes combinaisons, le passage de la zone A à la zone B de la figure 15, est fréquemment appelé « seuil plastique ». Pour le bois, lorsque la limite élastique est dépassée, les parois cellulaires subissent un flambement ce qui endommage le matériau. Ceci a pour conséquence la diminution du module d'élasticité en charge-décharge. La plasticité n'est qu'apparente et s'accompagne d'endommagement. Aussi, le terme « seuil plastique » devrait être remplacé, d'après Heger [HEG 2004], par le terme seuil de flambement des parois cellulaires. Dans la suite de ce rapport, par abus de langage, le terme de plasticité pour le bois sera quand même utilisé.

En traction comme en compression, les directions radiales et tangentielles ont des comportements mécaniques proches. C'est pourquoi de nombreux travaux considèrent le bois non pas comme orthotrope mais comme isotrope transverse avec deux directions principales : la direction longitudinale et la direction transversale.

2.2.3. Comportement fragile du bois en cisaillement pur

Tout comme pour la compression, Gibson et Ashby [GIB 1997] donnent les formules pour calculer la résistance du bois en cisaillement : $\tau_{LR} = \tau_{LT} = 0,086 \sigma_s \left(\frac{\rho}{\rho_{ML}} \right)$

et $\tau_{RT} = C_7 \sigma_s \left(\frac{\rho}{\rho_{ML}} \right)^2$ avec C_7 un coefficient désignant le rapport de la résistance en flexion de la paroi cellulaire sur sa résistance longitudinale (valeur non fournie par les auteurs).

Dans le cas du cisaillement pur, le comportement du bois est fragile. Cependant, en construction bois, il est extrêmement rare de rencontrer une situation où le bois est cisailé sans introduction d'un effort de compression transversale. Or, la résistance au cisaillement du bois est fortement liée à la contrainte de compression transversale qui y est injectée. Ce phénomène peut être illustré par différents exemples.

Lors de l'enfoncement d'une broche perpendiculairement au fil du bois, une compression localisée sous la broche est facilement observable. Lors de cette action, le bois est sollicité non seulement en compression mais également en cisaillement. En effet, la broche comprime le bois non pas sur toute sa surface mais sur une surface restreinte ce qui induit de part et d'autre de cette surface du cisaillement. Kollmann et Cote [KOL 1968] ont réalisé des essais de compression transversale localisée. Leurs essais montrent que plus la surface de compression est restreinte plus la limite élastique de compression apparente (rapport de la charge appliquée sur la surface d'application) du système augmente (Figure 21 (a)). Ceci s'explique par le fait que lorsque la surface de compression diminue, l'effort de compression transversale diminue mais l'effort de cisaillement reste sensiblement constant. Plus la surface de contact diminue et plus l'effort de cisaillement joue un rôle prépondérant.

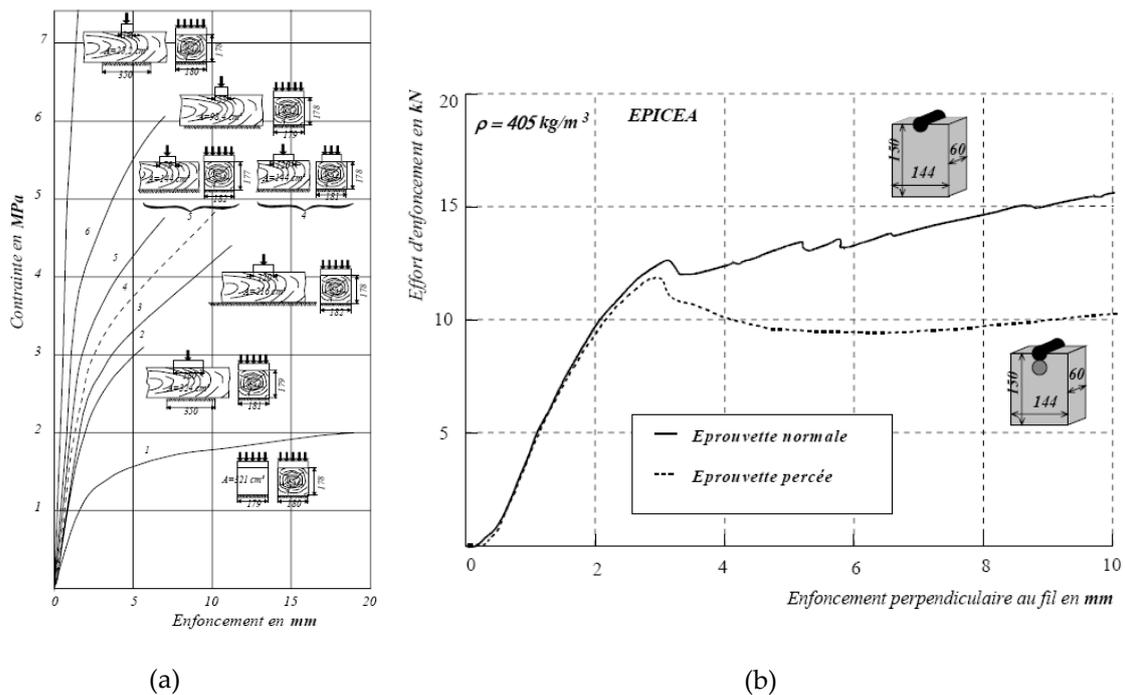


Figure 21 : Renforcement du bois à la compression localisée :
 (a) Effet de la surface chargée en compression localisée perpendiculaire au fil du bois
 [KOL 1968]

(b) Comparaison de la rigidité d'enfoncement perpendiculaire au fil du bois entre deux types
 d'éprouvettes (normale et percée) [BOC 1997]

Le phénomène de renforcement de la résistance d'un système sollicité en compression transversale localisée par le cisaillement est très marqué dans le cas des assemblages brochés. Ainsi, pour démontrer ce fait, Bocquet [BOC 1997] a comparé deux essais d'enfoncement d'une broche perpendiculairement au fil du bois. Le premier est réalisé sur une éprouvette de bois entière et la seconde sur une éprouvette percée en dessous de la broche. Dans le second cas, il n'y a plus de résistance en compression transversale. Les essais montrent que le cisaillement joue un rôle prépondérant dans la résistance du bois à l'enfoncement d'une tige (Figure 21 (b)).

Par ces deux exemples, il est montré que la compression transversale est renforcée par le cisaillement. Par ailleurs, les paragraphes suivants montrent que la limite élastique au cisaillement d'une éprouvette est également augmentée lorsque cette dernière est sollicitée en même temps en compression transversale.

Mandery [MAN 1968] a réalisé des essais de sollicitation d'éprouvettes en bois de Douglas en compression transversale et en cisaillement. L'objet de son étude est de montrer l'influence de la compression transversale sur la résistance en cisaillement (τ_{LT} et τ_{LR}). L'auteur a donc mesuré la résistance au cisaillement du bois densifié à différents niveaux en restant dans le domaine élastique : 0 MPa, 1,06 MPa, 2,11 MPa et 3,16 MPa.

L'auteur montre que la capacité résistante du bois au cisaillement augmente de façon linéaire avec la contrainte de compression transversale (σ_y) suivant la formule :

$$\tau_{LT} = \tau_{LR} = 5,4 + 1,40\sigma_y.$$

Ainsi entre une éprouvette sollicitée en compression transversale à 3,16 MPa et une éprouvette non sollicitée, il y a une augmentation de la résistance en cisaillement de plus de 80%.

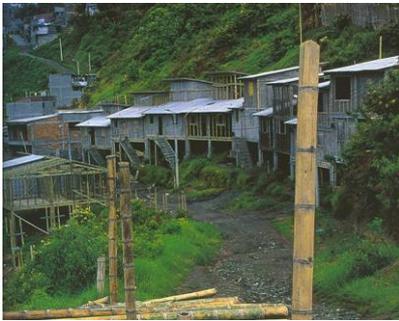
Sa structure fortement anisotrope mais également la répartition de ses microfibrilles au sein de cette structure expliquent les différences de comportement dans les différentes orientations du matériau bois. L'orientation des trachéides et des microfibrilles qui les constituent confère au bois des capacités résistantes les plus importantes dans la direction longitudinale. Ceci explique pourquoi les assemblages qui introduisent de la traction transversale (majorité des assemblages utilisés en construction) subissent assez souvent une ruine prématurée.

Dans les directions transversales, en compression, le bois a un comportement qui peut s'apparenter à celui d'une structure en nid d'abeille ou à une mousse ([GIB 1997], [ADA 1998]) avec une loi de comportement comportant trois phases principales dont une phase élastique très réduite et un plateau important. Pour ces raisons, il paraît difficile de transposer directement le principe de précontrainte, tel qu'il a été exposé précédemment, sur un matériau comme le bois.

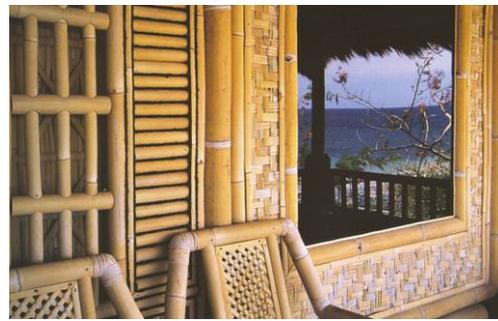
Pour alimenter la démarche, et pour rester dans le domaine des matériaux fibreux naturels, une autre approche a été menée, sur un matériau utilisé depuis toujours dans la construction, et présentant une forme d'analogie de structure anatomique avec le bois : le bambou

3. LE BAMBOU : UNE HERBE D'ACIER UTILISEE DANS LA CONSTRUCTION

Le bambou en temps que matériau de structure est utilisé depuis toujours par les Hommes. D'après Jayanetti [JAY 2003], un milliard de personnes vivent dans des maisons en bambou à travers le monde. Le bambou est utilisé tant pour réaliser des locaux à faibles coûts (Figure 22 (a)) que pour des constructions luxueuses pour le tourisme (Figure 22 (b)). Il permet de réaliser des constructions éphémères comme des échafaudages (Figure 22 (c)) et des constructions durables (Figure 22 (d)) : des habitations faites de ce matériau peuvent avoir jusqu'à 100 ans (les pièces abîmées sont alors remplacées par de nouvelles au cours de la vie de l'édifice). Il est utilisé tant dans des constructions traditionnelles (Figure 22 (e)) que modernes (Figure 22 (f)).



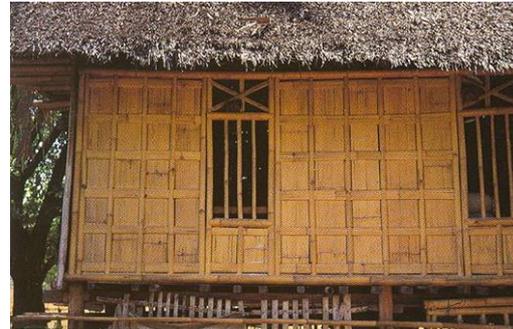
(a) Quartier de Manizales en Colombie construit à base de bambou



(b) Maison contemporaine à Amed (Bali) qui utilise diverses techniques de construction en bambou



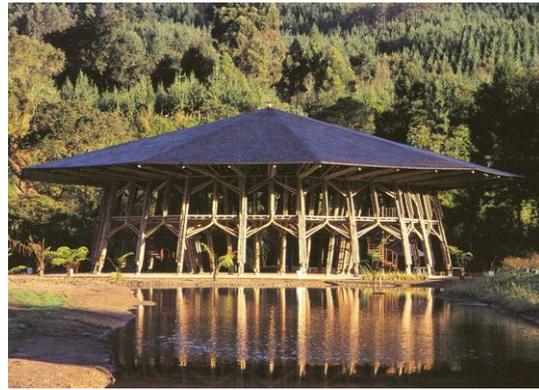
(c) Echafaudage en bambou placé à l'intérieur d'une charpente en construction à Bali



(d) Maison en bambou construite dans un hameau des environs de Batutumonga sur l'île Célèbes



(e) Village de Kete Kesu sur l'île Célèbes



(f) Pavillon créé par Velez pour l'exposition "L'homme, la nature et la technologie" à Hanovre en 2000 édifié en Colombie, il a été démonté puis reconstruit en Allemagne

Figure 22 : Différents exemples de constructions en bambou [LAN 2002]

Avant de décrire les principaux assemblages utilisés dans les constructions à base de bambou, l'anatomie ainsi que les propriétés mécaniques du matériau sont décrites.

3.1. Le bambou : une herbe insolite

Les bambous font partie des Monocotylédones. Ils appartiennent à la famille des Poacées (anciennement appelée Graminées et qui contient entre autre le blé, l'orge, le riz, le roseau...) et à la sous-famille des Bambousoidées. Il s'agit d'une herbe particulière car elle est ligneuse ce qui lui permet d'être vivace, résistante et d'atteindre pour certaines espèces 30 mètres de haut.

3.1.1. Description générale de la plante

Naturellement, les Bambousoidées poussent sur tous les continents excepté l'Antarctique et l'Europe. La plupart des espèces de Bambou sont présentes dans les régions tropicales et subtropicales et se développent bien à des températures variant entre 9 et 36°C. Cependant, des espèces adaptées aux climats tempérés ont été introduites en Europe et certains spécimens poussent naturellement jusqu'à 4000 m d'altitude et supportent la neige et le gel [LAN 2002].

Malgré une localisation géographique vaste, la structure des bambous est relativement constante. Ainsi, à l'âge adulte, la plupart des espèces de cette sous-famille est constituée d'une tige cylindrique creuse appelée chaume (il existe quelques exceptions où le chaume est plein). Comme toutes les tiges, le chaume est composé de nœuds, qui correspondent à une cloison rigide, appelée diaphragme et d'entre-nœuds (Figure 23). Le diamètre des bambous est plus important à la base qu'au sommet et cette diminution de diamètre s'accompagne par une diminution de l'épaisseur de la paroi du chaume. La longueur des entre-nœuds diffère d'une espèce

à l'autre et est plus importante au milieu de la plante. Les bourgeons se développent à la base des nœuds pour donner des branches à la structure identique à celle des chaumes et se divisent en ramuscules pour donner à leur extrémité des feuilles. Ces dernières sont de formes effilées, tombent tous les ans et sont aussitôt remplacées.

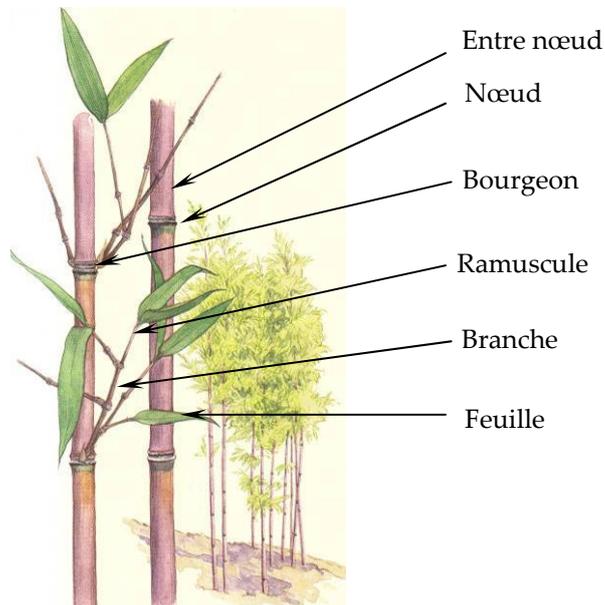


Figure 23: Tige de bambou [TRU 1999]

Les bambous se développent à partir de rhizomes qui sont des tiges horizontales et souterraines. Ces dernières permettent l'assimilation, la distribution et le stockage des nutriments ainsi que le développement de nouvelles tiges. Le rhizome, qui a une structure identique à celle du chaume, possède des racines au niveau de ses nœuds qui est le centre de développement du bambou. En effet, au niveau de chaque nœud, un bourgeon est présent et peut former soit un nouveau rhizome, soit un chaume. Le bourgeon possède déjà tous les nœuds du futur bambou et sa croissance consiste en une élongation télescopique des entre nœuds : lorsqu'il sort de terre, le bambou a donc son diamètre définitif. Deux types de rhizomes peuvent être distingués. Le rhizome pachymorphe ou cespiteux est court et produit des chaumes près de la souche : leur extension est donc limitée. Ils sont caractéristiques des bambous de climat tropical. Le rhizome leptomorphe ou traçant se développe horizontalement et forme des systèmes racinaires développés produisant parfois un réseau de plusieurs centaines de kilomètres à l'hectare. Ils sont caractéristiques des bambous de climat tempéré. Ces deux types de rhizome ont des conséquences au niveau des plantes aériennes : les rhizomes pachymorphes donnent des « massifs » de bambous alors que les bambous leptomorphes donnent des tiges individuelles.

Une fois sorti de terre, le bambou croît uniquement dans le sens longitudinal à une vitesse record (entre 10 et 50 cm par jour en moyenne suivant les espèces). Il atteint sa taille définitive entre 2 et 4 mois mais sa tige est alors peu lignifiée. Elle est donc peu résistante. D'une espèce à l'autre, la taille maximale des chaumes est très

variable et va de 30 cm pour les bambous nains à 30 m pour les bambous géants. Une fois sa taille maximale atteinte, le bambou est dit « immature » et subit une période de maturation allant de 3 à 6 ans suivant les espèces au cours de laquelle sa couleur devient verte et souvent jaune. D'après Liese [LIE 2003], durant cette période, et même après, les cellules fibreuses et parenchymatiques subissent un épaissement de leur paroi par ajout d'une lamelle supplémentaire qui subit une lignification. Ce phénomène s'accompagne d'une augmentation de la densité et des propriétés mécaniques du bambou.

3.1.2. Anatomie de la plante

Un chaume est constitué de l'épiderme, de parenchyme, de tissus structuraux et mécaniques, de tissus conducteurs, de quelques tissus produits (gommes, cire) et les cellules méristématiques. Selon Liese [LIE 1987] en moyenne, un chaume est constitué d'environ 50% de parenchyme, 40% de fibres et 10% de cellules conductrices, les autres tissus étant négligeables. Lopez³, cité par Beraldo [BER 1994], donne les dimensions moyennes des différents éléments anatomiques du bambou qui sont résumés dans le Tableau 3.

Eléments	Largeur	Longueur
Parenchyme	65 µm	0,25 mm
Fibres	7 à 27 µm	2,2 à 2,6 mm
Vaisseaux	100 µm	

Tableau 3: Dimensions moyennes des différents éléments du bambou

Les tissus du parenchyme, matrice de base du chaume, sont constitués de cellules vivantes et stockent les aliments nutritifs tels que l'amidon dont l'apport est nécessaire lors de la pousse très rapide de la plante. Ils contribuent également à la stabilité et à la flexibilité de la plante. Ces tissus sont essentiellement constitués de cellules allongées parsemées de cellules cubiques (Figure 24) communiquant entre elles par des punctuations simples. Les cellules allongées se lignifieraient tôt dans le cycle de développement de la plante. Les cellules de parenchyme les plus courtes ont une densité cytoplasmique plus importante et une épaisseur de paroi plus fine que les cellules les plus longues. Elles gardent leur cytoplasme et leur activité (sans lignification) très tardivement dans la vie du bambou [GRO 1971]. Au cœur du chaume, au niveau des nœuds, il existe une membrane tendre de couleur blanchâtre essentiellement constituée de parenchyme vivant.

³ Lopez (1974), *Bambu-su cultivo y aplicaciones en: fabricación de papel, construcción, arquitectura, ingeniería, artesanía*, *Estudia Tecnicos Colombianos Ltda*, Cali, Colombia

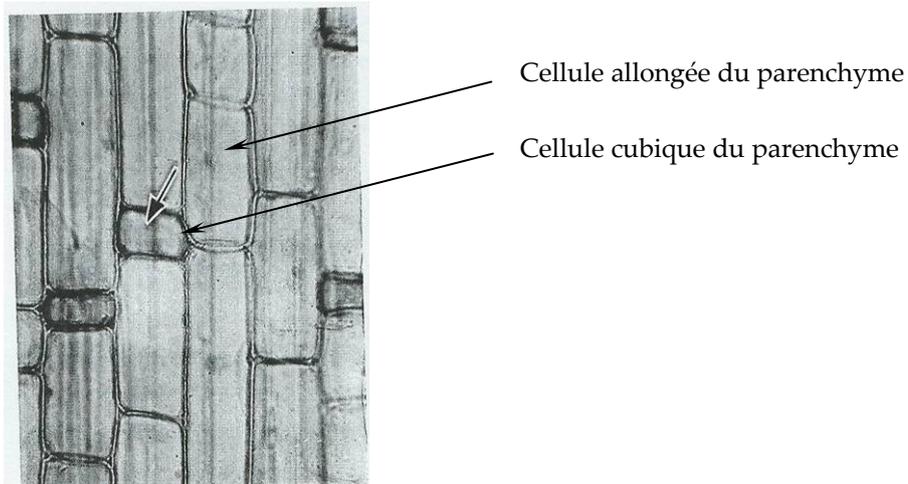


Figure 24: Cellules du parenchyme avec des cellules allongées et cubiques (grossissement : 370) [GRO 1971]

Les tissus structuraux et mécaniques sont divisés en deux catégories : le collenchyme et le sclérenchyme. Le premier type de tissu soutient des jeunes organes en croissance. Les cellules collenchymateuses sont allongées et vivantes ; elles ont une paroi épaisse qui leur permet de soutenir les jeunes organes en développement. Le sclérenchyme renforce et soutient les parties de la plante qui ne s'allongent pas. Les cellules sclérenchymateuses sont mortes et allongées : ce sont les fibres de la plante. A l'âge adulte, leur pourcentage est largement supérieur aux cellules collenchymateuses. Les fibres sont longitudinales et serrées ce qui confère à la plante sa souplesse, sa flexibilité, son élasticité et sa grande résistance en traction. D'après Liese [LIE 1987], la plupart des fibres possèdent une paroi secondaire épaisse. Cette dernière possède une structure polylamellée avec une alternance de lamelles larges et étroites et différentes orientations de fibrilles qui accentuent la dureté du bambou (Figure 25).

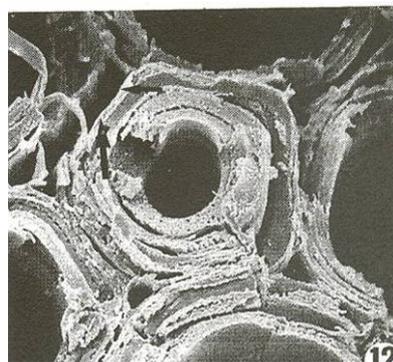


Figure 25 : Coupe des fibres de bambou : vue sur les différentes lamelles de leur paroi (grossissement : 2180) [LIE 1987]

Les vaisseaux vasculaires qui permettent la conduite de la sève dans toute la plante sont actifs tout au long de la vie du bambou. Ils sont longitudinaux sans contacts entre eux sauf au niveau des nœuds où des jonctions permettent la circulation de la sève dans le sens horizontal. En effet, comme toutes les

monocotylédones, le bambou ne possède pas de tissus spécialisés pour le transport radial (contrairement aux dicotylédones avec leurs rayons ligneux). Liese [LIE 1987] a observé que le xylème conducteur est constitué d'un ou deux protoxylèmes et de deux grands vaisseaux de métaxylème. Les protoxylèmes ont une membrane simple alors que les métaxylèmes ont une double membrane. Les perforations de ces derniers sont la plupart du temps simples avec des anneaux horizontaux ou légèrement obliques.

Les cellules épidermiques (qui sont en périphérie du chaume) sont riches en silice, ce qui augmente la dureté du bambou, et produisent de la cire qui confère à la plante une surface lisse. Les cellules méristématiques, quant à elles, sont indifférenciées et sont en permanente division ce qui permet à la plante de grandir et de se développer notamment au niveau des branches des feuilles et du rhizome.

3.1.3. Répartition des organes dans la paroi de la plante

Une tige de bambou en section transversale est constituée de faisceaux vasculaires incorporés dans le parenchyme. Les faisceaux vasculaires sont formés de tissus conducteurs (vaisseaux du xylème et du phloème) et de fibres. Ces tissus s'organisent autour des fibres comme l'indique la figure 26.

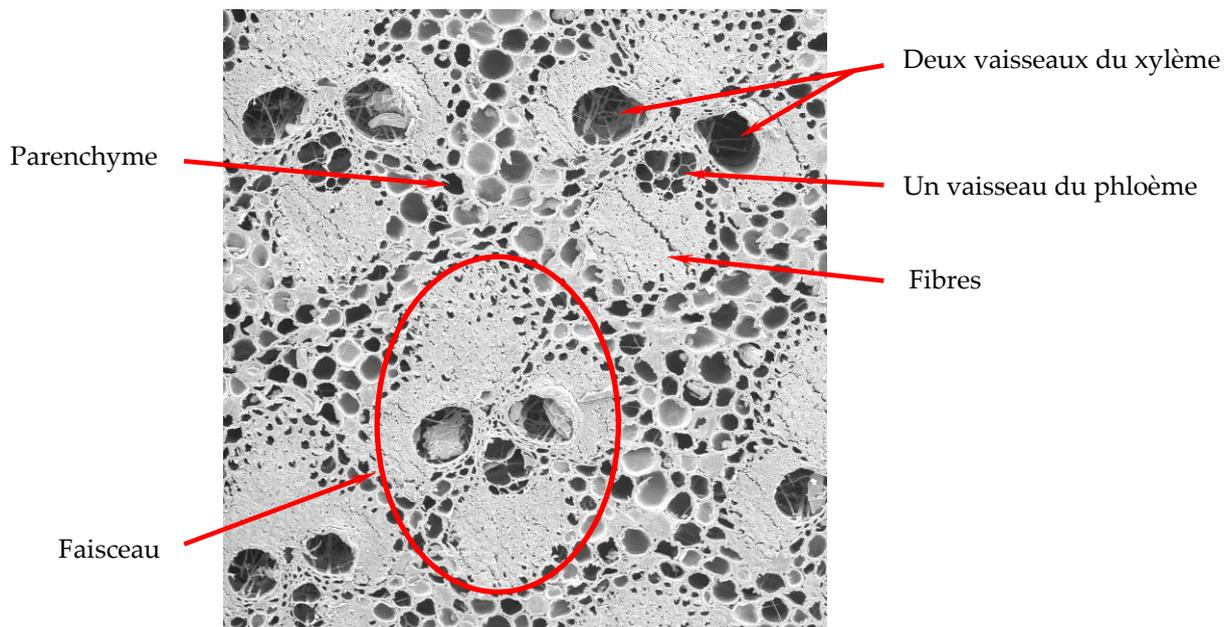


Figure 26: Détail de la paroi d'un bambou observé au microscope électronique à balayage (grossissement : 90) [RAB 2001]

Grosser et Liese [GRO 1971] ont décrit plus précisément les faisceaux de vaisseaux comme le montre la figure 27 ce qui leur a permis de classer les bambous en quatre familles suivant la présence et la localisation des fibres.

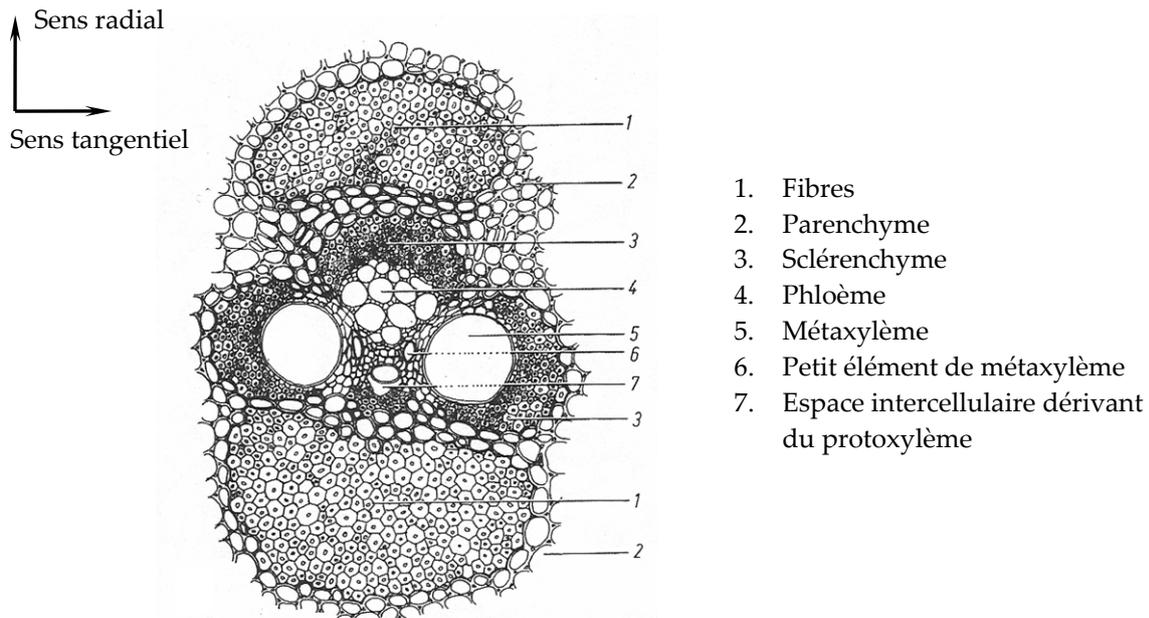


Figure 27: Détail d'un faisceau vasculaire de bambou [GRO 1971]

La distribution de ces faisceaux vasculaires dans l'épaisseur de la tige de bambou n'est pas constante, aussi Grosser et Liese [GRO 1971] observent quatre zones distinctes dans une section transversale de bambou (Figure 28) : une zone périphérique (1), une zone de transition (2), une zone centrale (3) et une zone intérieure (4).

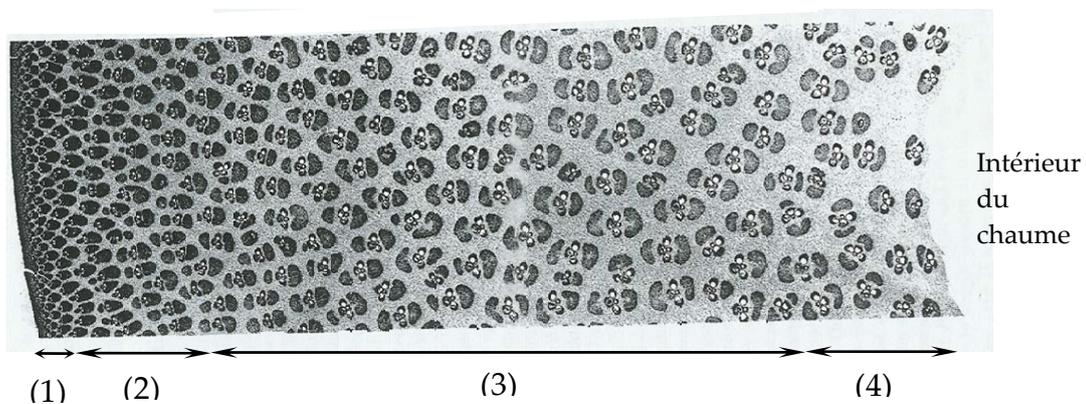


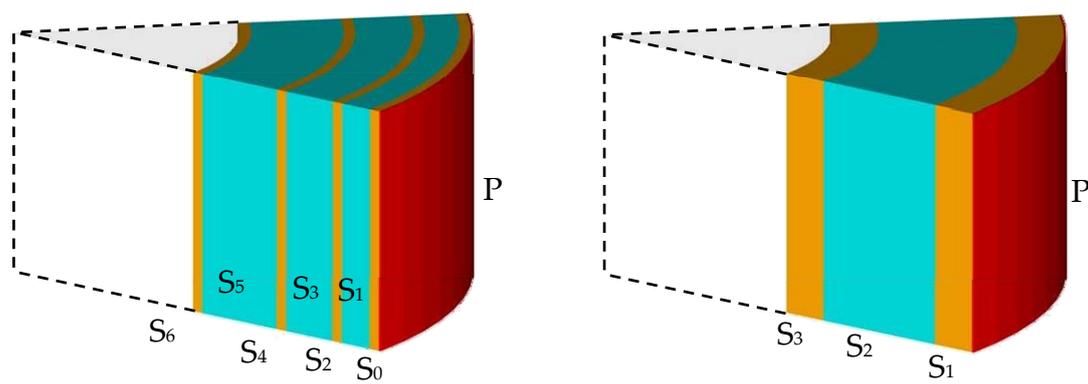
Figure 28: Section d'une tige de bambou (*Bambusa polymorpha*) [GRO 1971]

En périphérie, l'épiderme, l'hypoderme et le cortex primaire forment une couche spéciale. Accolés à cette zone, quelques faisceaux forment la zone (1). Dans la zone de transition (2), le sclérenchyme et les vaisseaux sont plus ou moins mélangés. La troisième zone qui est centrale est la plus grosse et les faisceaux y sont les plus différenciés. Parfois, une quatrième zone peut être distinguée à l'intérieur du chaume ; les faisceaux vasculaires y sont souvent petits, simples et désorientés.

Dans la zone (1), près de la périphérie, les faisceaux sont petits et nombreux, il y a donc peu de parenchyme entre eux alors que dans la zone (3), ils sont plus gros (la

zone (2) étant une vaste zone de transition). Ainsi, en périphérie (zone 1 et 2), la proportion de parenchyme est faible et donc celle de fibres est plus importante : la densité augmente donc de l'intérieur du bambou vers sa périphérie.

Au niveau mécanique, les fibres sont les tissus qui ont l'influence la plus importante ; aussi Parameswaran et Liese [PAR 1967] et Janssen [JAN 1981] entre autres ont travaillé sur l'orientation des fibrilles dans l'épaisseur d'une cellule de fibre de bambou. Ils ont observé que la paroi de ces cellules se découpe en différentes couches (Figure 25). Tout d'abord la couche P correspond à la paroi primaire, puis la couche S0 est une zone de transition. Vient ensuite une succession de cinq couches ou plus où l'orientation des fibrilles est alternée comme l'indique figure 29 (a). Janssen ajoute que l'orientation des fibrilles a une importance capitale sur le module et la résistance du bambou. Tout comme le bois, le matériau bambou est orthotrope ce qui s'explique par la répartition des tissus dans la tige et par l'orientation des fibrilles au sein de la paroi cellulaire des fibres. D'après la figure 29, la proportion de fibrilles orientées transversalement semble moins importante pour le bambou que pour le bois. Il est important de s'interroger si cette différence a une influence sur les propriétés mécaniques du bambou.



(a) Schématisation de la paroi des cellules des fibres du bambou

(b) Schématisation de la paroi des cellules des trachéides de résineux

- Paroi primaire
- Fibrilles de cellulose orientées avec un angle proche de 90° par rapport à la direction longitudinale (orientation « transversale »)
- Fibrilles de cellulose orientées avec un angle proche de 0° par rapport à la direction longitudinale (orientation « longitudinale »)

Figure 29: Comparaison de l'orientation des fibrilles dans les parois des cellules structurales du bois et du bambou [JAN 1981]

3.1.4. Propriétés mécaniques de la tige de bambou

La difficulté pour mesurer les propriétés mécaniques du bambou est sa forme et son irrégularité. En effet, il est souvent difficile d'utiliser la même géométrie d'éprouvettes que celles utilisées pour mesurer les propriétés du bois du fait de la conicité assez importante du bambou. De plus, cette hétérogénéité a parfois un rôle important lors des essais.

En outre, les propriétés mécaniques dépendent de l'humidité des bambous et de leur âge au moment de leur coupe [ZHO 1981]. Il est donc difficile de donner une valeur de résistance mécanique du bambou par type de sollicitation. De nombreuses valeurs de contraintes à rupture et de modules existent en bibliographie, cependant il paraît difficile de les comparer du fait non seulement de leur différence d'âge, de leur taux d'humidité mais de surcroît il faut distinguer les essais réalisés sur canne et sur des éprouvettes. Crosnier et Kazi-Aoual [CRO 1997] donnent une fourchette de contrainte à rupture et de modules d'élasticité pour les différentes sollicitations pour le bambou (Tableau 4). Cependant les auteurs précisent que ces valeurs peuvent considérablement varier.

Traction parallèle aux fibres	150 à 400 MPa
Compression parallèle aux fibres	60 à 90 MPa
Flexion axiale	90 à 200 MPa
Cisaillement longitudinal	4 à 10 MPa
Traction perpendiculaire aux fibres	1 à 4 MPa
Compression perpendiculaire aux fibres	50 à 100 MPa
Module d'élasticité en traction parallèle aux fibres	18000 à 30000 MPa
Module d'élasticité en compression parallèle aux fibres	12000 à 20000 MPa
Module d'élasticité en flexion	15000 à 22000 MPa

Tableau 4 : Valeurs indicatives moyennes pour du bambou des contraintes de rupture à différentes sollicitations et des modules d'élasticité conventionnels

Tout comme le bois, le bambou possède des propriétés mécaniques longitudinales très fortes par rapport aux autres directions. Cette anisotropie est encore plus forte pour ce matériau : en traction parallèle aux fibres, la résistance du bambou peut atteindre pour certaines espèces la limite élastique d'un acier doux alors qu'en traction transversale sa résistance est 100 à 400 fois plus faible. Le comportement du bambou est différent de celui du bois en compression transversale : la capacité résistante du bambou pour cette sollicitation est 8 à 20 fois supérieure à celle d'un bois de résineux. Ceci s'explique par la différence de structure des deux matériaux : la part de vide dans le bambou est moins importante que pour le bois.

Malgré des difficultés évidentes liées à la forme et à sa forte orthotropie, le bambou est largement utilisé comme matériau de construction. Les paragraphes suivant font un listing et une analyse des principaux assemblages utilisés pour le

bambou dans sa forme tubulaire. Cette analyse a pour objectif final de définir un principe pour précontraindre les matériaux fibreux naturels.

3.2. Assemblages pour le bambou

Outre les difficultés liées à sa forte orthotropie, le bambou utilisé dans sa forme tubulaire présente d'autres difficultés pour son assemblage. La première contrainte est liée à sa forme. En effet, les connections pour des matériaux circulaires et creux ne sont pas fréquentes. De plus, le bambou est une plante naturelle qui présente donc des irrégularités : sa section est plus souvent elliptique que circulaire, sa section diminue du bas vers le haut du chaume et son épaisseur n'est pas forcément constante le long de la section et de la longueur de la plante. Les nœuds sont des discontinuités le long de la tige qu'il faut prendre en compte. Lors de son séchage, le bambou subit des contraintes assez importantes qui conduisent le plus souvent à l'apparition de fentes. Ce phénomène de fendage est à prendre en compte dès que ce matériau est utilisé en construction. De plus, l'épiderme du bambou produisant de la cire, il est difficile de coller le chaume à partir de sa surface extérieure. Enfin, sa surface extérieure est dure ce qui rend le clouage et le perçage difficiles.

Janssen [JAN 2000] définit sept groupes d'assemblages pour le bambou dans sa forme tubulaire :

- Groupe 1 : la liaison entre les deux tiges de bambou se fait par contact de toute la section.
- Groupe 2 : la liaison se fait par l'intérieur du chaume parallèlement aux fibres.
- Groupe 3 : la liaison se fait par l'intérieur du chaume perpendiculairement aux fibres.
- Groupe 4 : la liaison se fait par la section du chaume parallèlement aux fibres.
- Groupe 5 : la liaison se fait par la section du chaume perpendiculairement aux fibres.
- Groupe 6 : la liaison se fait par l'extérieur du chaume parallèlement aux fibres.
- Groupe 7 : la liaison se fait par l'extérieur du chaume perpendiculairement aux fibres.

Les groupes 3 et 7 sont théoriques et n'ont aucune réalité pratique ; les autres groupes sont représentés sur la figure 30.

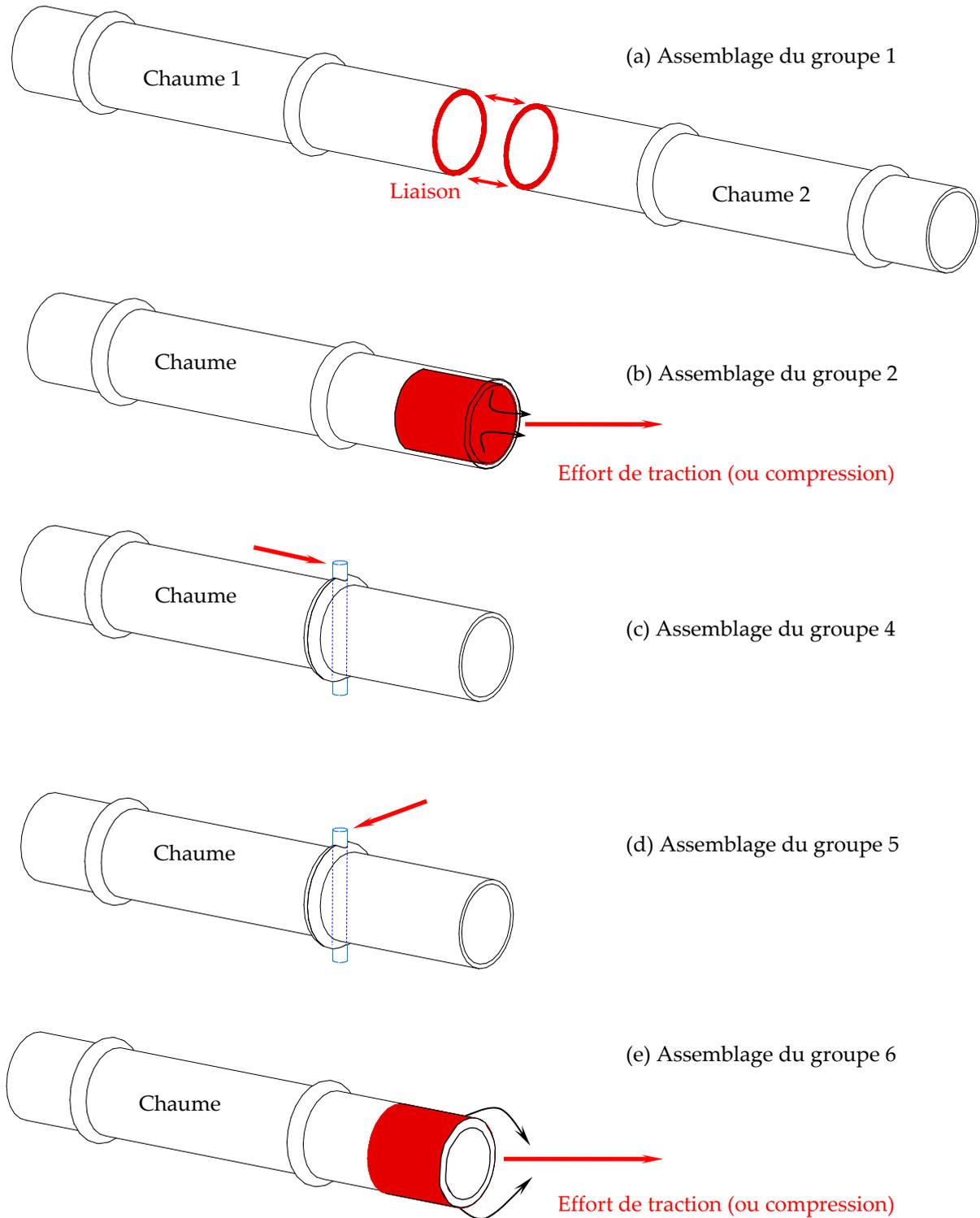


Figure 30 : Principes de fonctionnement des différents groupes d'assemblages distingués par Janssen [JAN 2000]

Le fait de solliciter le chaume de bambou sur toute sa section (groupe 1) impose la plupart du temps d'insérer des tiges dans le chaume qui est alors sollicité parallèlement ou perpendiculairement à la direction des fibres. De plus, le fait de faire transiter les efforts parallèlement ou perpendiculairement à la direction du

chaume impose d'utiliser en outre la section du chaume du fait de la faible résistance en cisaillement du bambou. Aussi, les groupes 1, 4 et 5 peuvent être alors regroupés en une famille d'assemblage. Trois familles d'assemblage sont donc distinguées dans la suite du paragraphe : la famille I où la liaison se fait par la section du chaume du bambou, la famille II où la liaison se fait par l'extérieur du chaume et la famille III où la liaison se fait par l'intérieur du chaume. Pour les deux dernières familles, seuls les cas où les efforts sont parallèles aux fibres sont réalistes.

3.2.1. Assemblages de la famille I

Cette famille d'assemblages est utilisée traditionnellement par les pays producteurs de bambou, elle est donc la plus répandue à travers le monde. Elle se caractérise par le contact de toute la section d'un chaume de bambou sur un autre. Pour un bon fonctionnement de ce type d'assemblage, il est nécessaire de lier les deux chaumes de bambou. Cette liaison s'effectue souvent en introduisant des efforts perpendiculairement ou parallèlement aux fibres (ce qui explique pourquoi les assemblages des groupes 1, 4 et 5 ont été rassemblés).

Une application directe de ce type d'assemblage est de lier deux chaumes par un joint de colle (Figure 31). Dans ce cas, il s'agit d'assemblages appartenant uniquement au groupe 1 défini par Janssen. Ce procédé est peu utilisé en pratique car le collage est rendu difficile à cause de la cire produite par les cellules épidermiques. Ce procédé permet de reprendre des efforts de compression et de cisaillement mais est incapable de reprendre des efforts de traction.

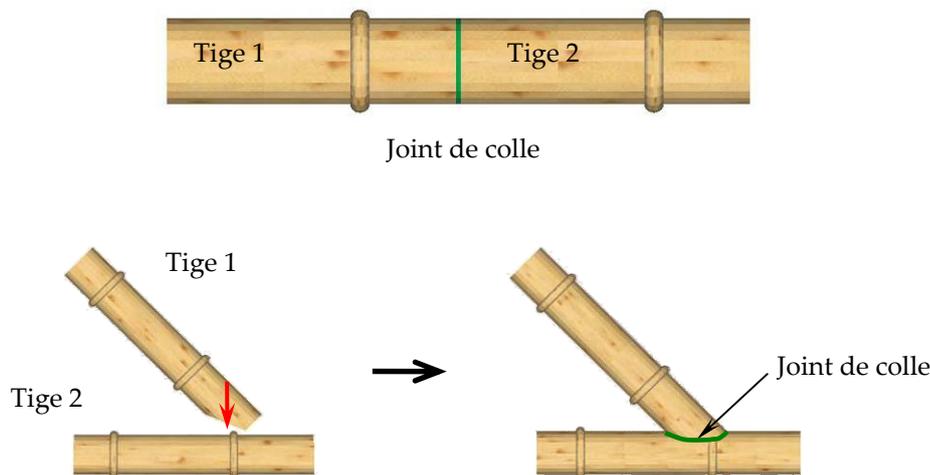


Figure 31: Assemblages liés par l'intermédiaire d'un joint de colle d'après [JAN 2000]

Une autre manière de lier les deux tiges de bambou consiste à utiliser une cheville qui peut être en bambou, en bois ou en acier. Cette liaison, présentée sur la figure 32, peut être classée dans les groupes 1 et 5 définis par Janssen. L'exemple 2 de la figure 32 présente une cheville plus sophistiquée que celle de l'exemple 1 et permet de mieux résister à l'arrachement.

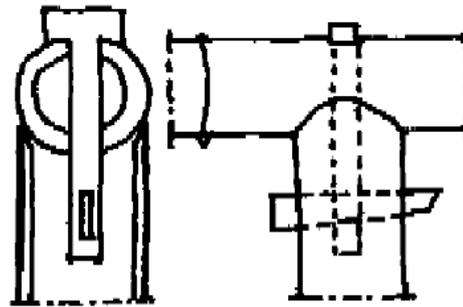
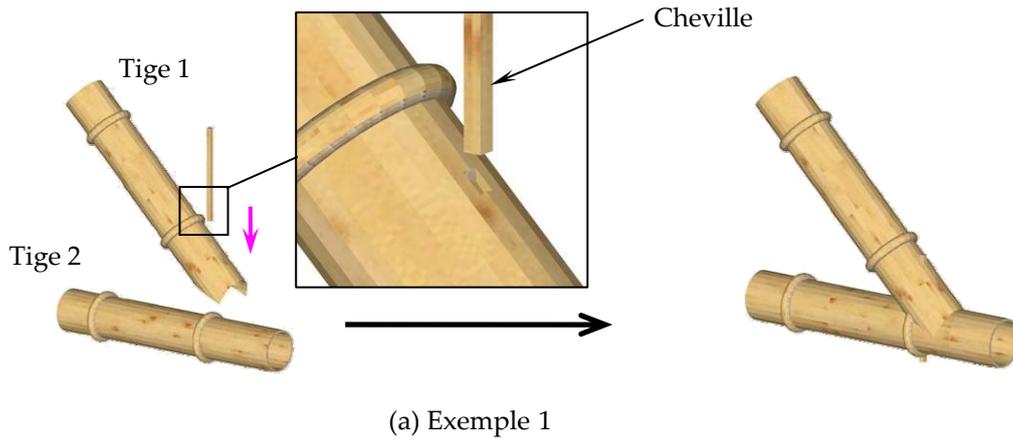


Figure 32: Assemblages liés par l'intermédiaire d'une cheville [JAN 2000]

La liaison entre les deux chaumes peut se faire également par des lanières qui peuvent être en rotin, bambou, fibre de palmier, fil de fer galvanisé, nylon ou tout autre matériau durable et résistant [LAN 2002]. Ce type de liaison, présenté sur la figure 33 peut être classé dans les groupes 1 et 6. L'assemblage (b) de la figure 33 envoie par le bambou vertical (tige 3) un effort de compression qui permet de maintenir la tige 1 qui reprend des efforts de traction.

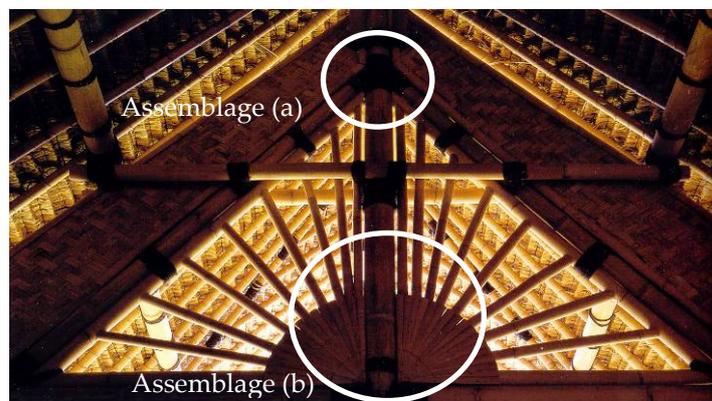
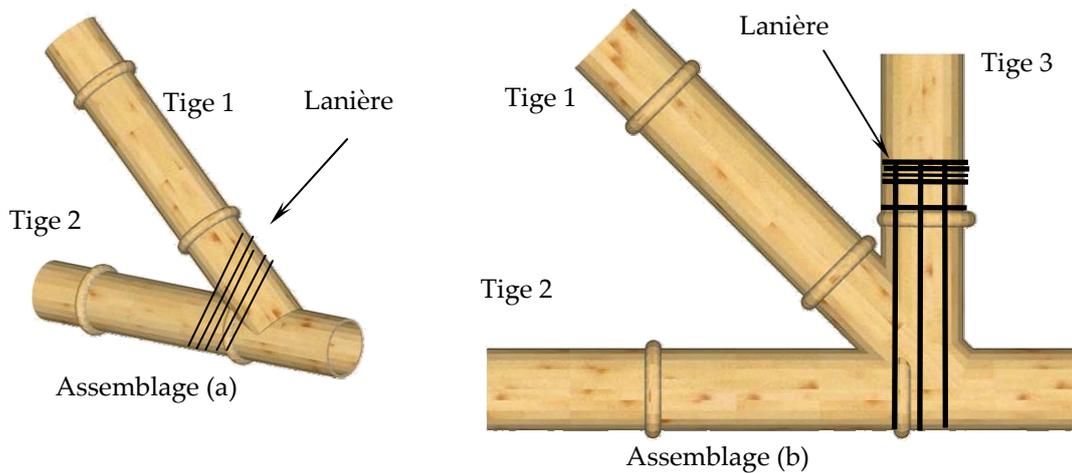


Figure 33: Assemblages liés par des lanières d'après [JAN 2000] et pignon d'une façade d'une maison à Bali utilisant ce type d'assemblage [LAN 2002]

Les assemblages de la figure 32 et de la figure 33 consistent donc à tailler une tige de bambou en biseau (tige 1) pour qu'elle épouse la forme de l'autre tige (tige 2) et de lier ces deux tiges. Ce type de liaison est utilisé entre autre pour la liaison entre un arbalétrier et l'entrait des fermes traditionnelles.

Une autre façon d'utiliser les cordages est présentée sur la figure 34. Dans ce cas, l'assemblage n'est pas capable de reprendre un effort de cisaillement et il est souvent utilisé pour réaliser des clôtures ou contreventer des maisons.

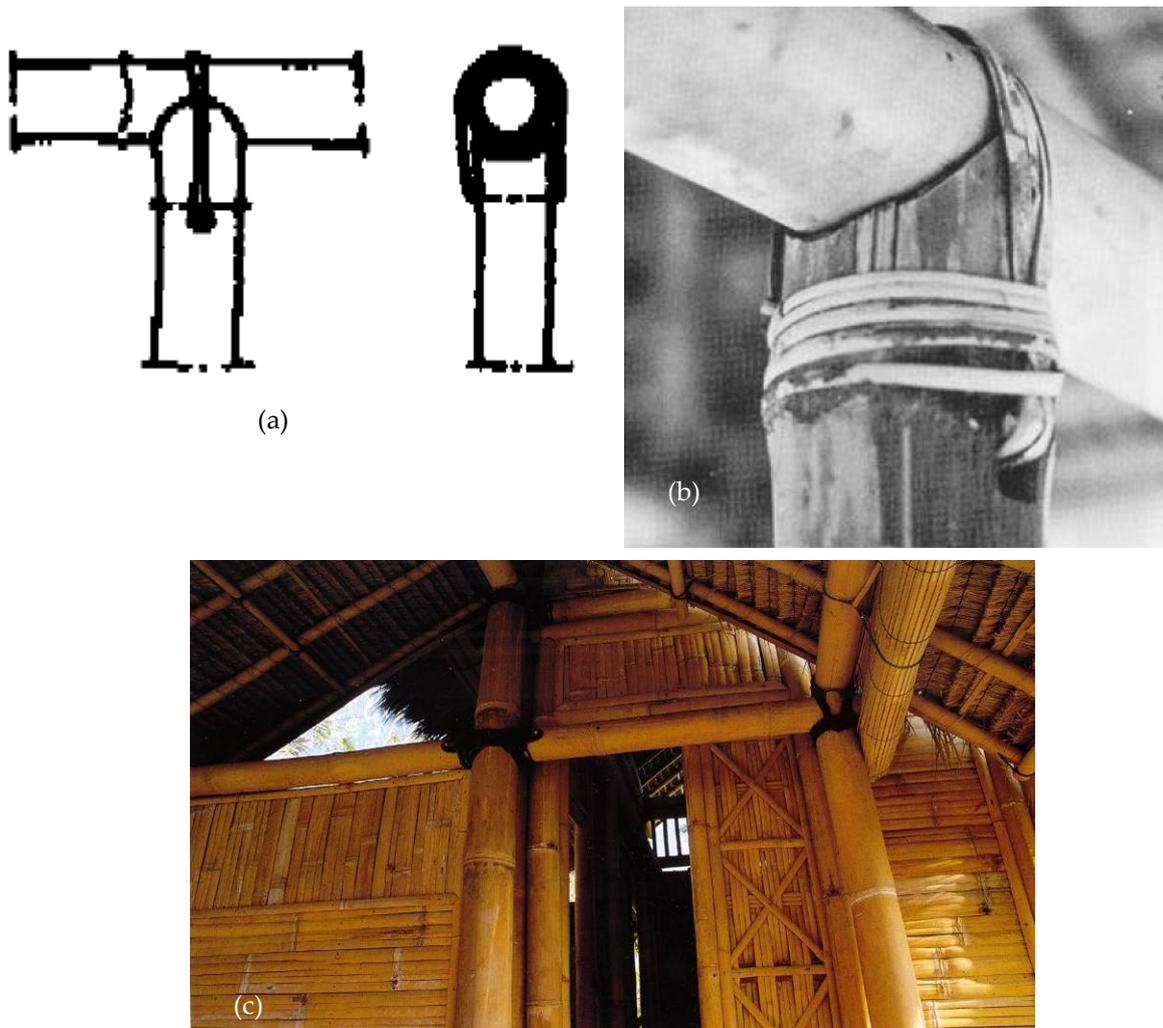


Figure 34: Assemblages liés par des lanières :

(a) Principe de l'assemblage [JAN 2000]

(b) Application pour une clôture [ROT 2009]

(c) Application pour contreventer une maison à Bali [LAN 2002]

Il est possible d'utiliser à la fois des chevilles et du cordage comme le montre la Figure 35. Dans ce cas, l'assemblage est constitué de trois éléments : les deux encoches A et B qui reprennent les efforts de cisaillement, la zone de contact qui reprend les efforts de compression et la cheville C avec le cordage qui reprennent les efforts de traction. Ce type d'assemblage appartient à la fois aux groupes 1, 4 et 5 définis par Janssen.

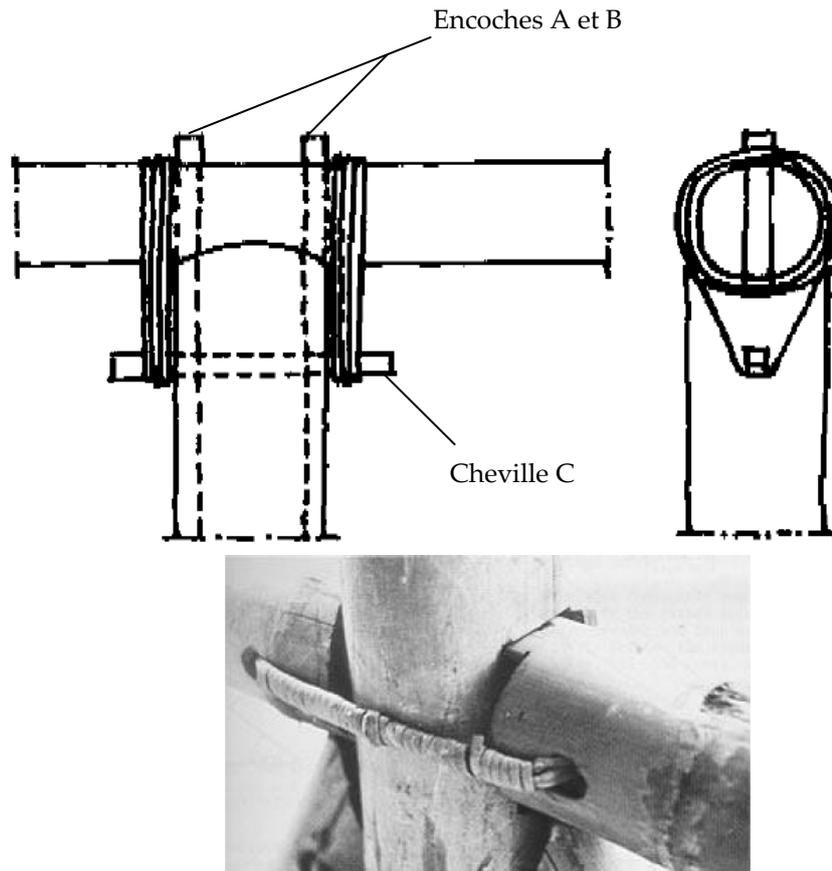


Figure 35 : Assemblage lié à la fois par des chevilles et du cordage [JAN 2000] et une application concrète [ROT 2009]

Une autre manière pour lier les tiges de bambou entre elles et d'utiliser le bambou lui-même. L'assemblage de la figure 36 est très utilisé en Asie traditionnelle. Dans ce cas, le bambou vertical (tige 1) possède une « languette » qui permet de fixer le chaume situé à l'horizontal (tige 2) ce qui améliore la stabilité de l'assemblage. Ce type d'assemblage peut être classé dans les groupes 1 et 6 définis par Janssen.

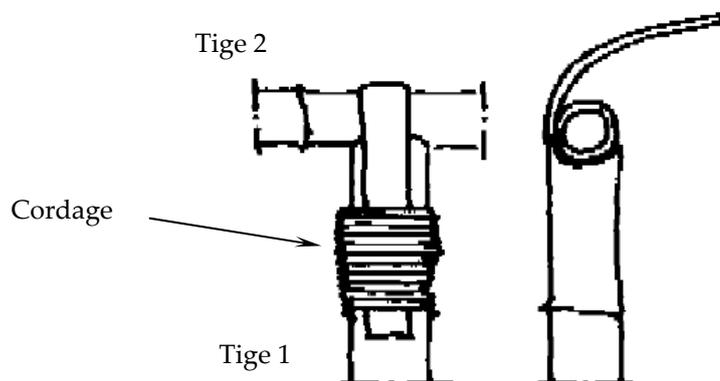


Figure 36: Assemblage du groupe 1 lié par le bambou lui même [JAN 2000]

Des moyens plus modernes existent également pour lier les deux chaumes de bambou. Ainsi, une version plus moderne de l'assemblage de la figure 35 est présentée sur la figure 37 : cet assemblage utilise deux vis et un crochet.

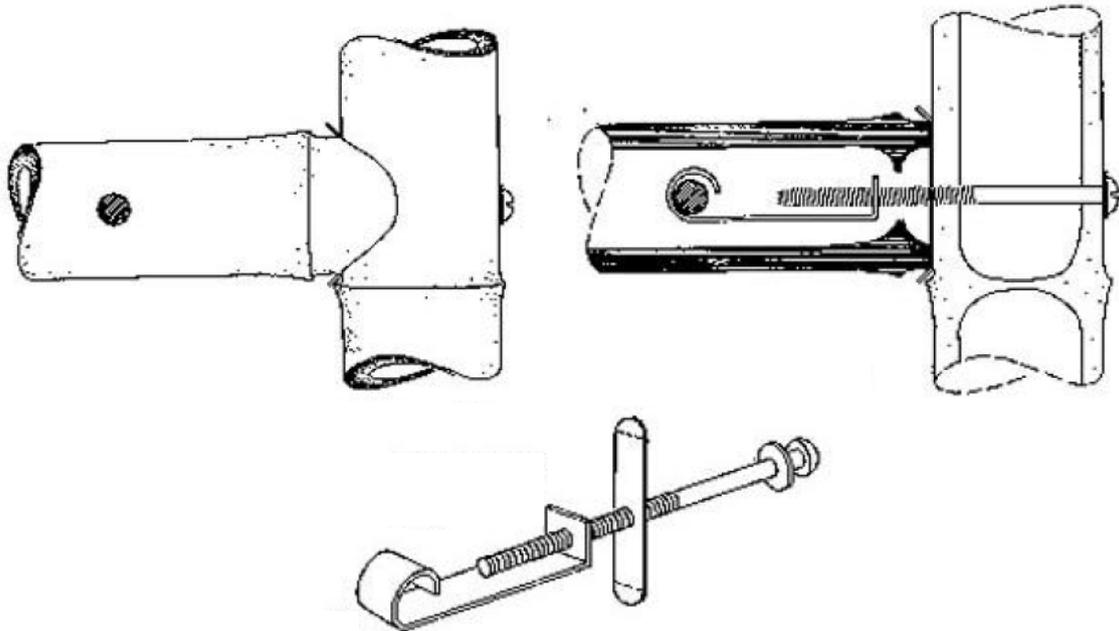


Figure 37 : Assemblage lié par l'intermédiaire d'un crochet et de vis [ROT 2009]

La plupart des assemblages présentés ci-dessus utilisent les nœuds comme point de solidité du matériau à l'effondrement et utilisent toute la section du bambou pour reprendre les efforts de cisaillement. Il existe des assemblages où l'effort transite directement parallèlement et/ou perpendiculairement aux fibres (assemblages du groupe 4 et/ou 5 définis par Janssen). Ces assemblages ont pour la plupart été développés plus récemment.

Par exemple, la figure 38 présente un assemblage utilisé pour réaliser des fermes en bambou utilisant soit des tiges en acier soit des chevilles en bambou : cet assemblage est peu coûteux mais semble peu efficace. Les efforts passent directement entre chaumes par l'intermédiaire de la tige placée au niveau d'un nœud qui est un point de résistance du chaume.

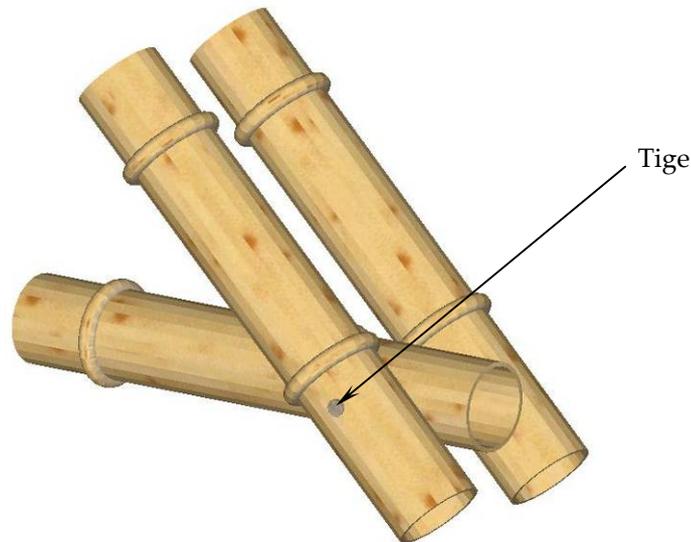


Figure 38: Assemblage utilisant une tige pour le passage des efforts entre plusieurs chaumes [JAN 2000]

Shoei Yoh a réalisé un assemblage en 1989 permettant le transfert des efforts entre plusieurs chaumes de bambou grâce à des tubes d'acier placés à l'intérieur des tiges. Les tubes sont alors boulonnés sur chacun des chaumes par plusieurs boulons (Figure 39).



Figure 39: Assemblage imaginé par Yoh [ROT 2009]

Il est également possible d'utiliser des plaques métalliques, des panneaux de particules ou de bambous pour lier les chaumes (Figure 40). Différentes possibilités existent pour lier les bambous aux plaques mais les plus fréquentes sont les boulons ou la colle.

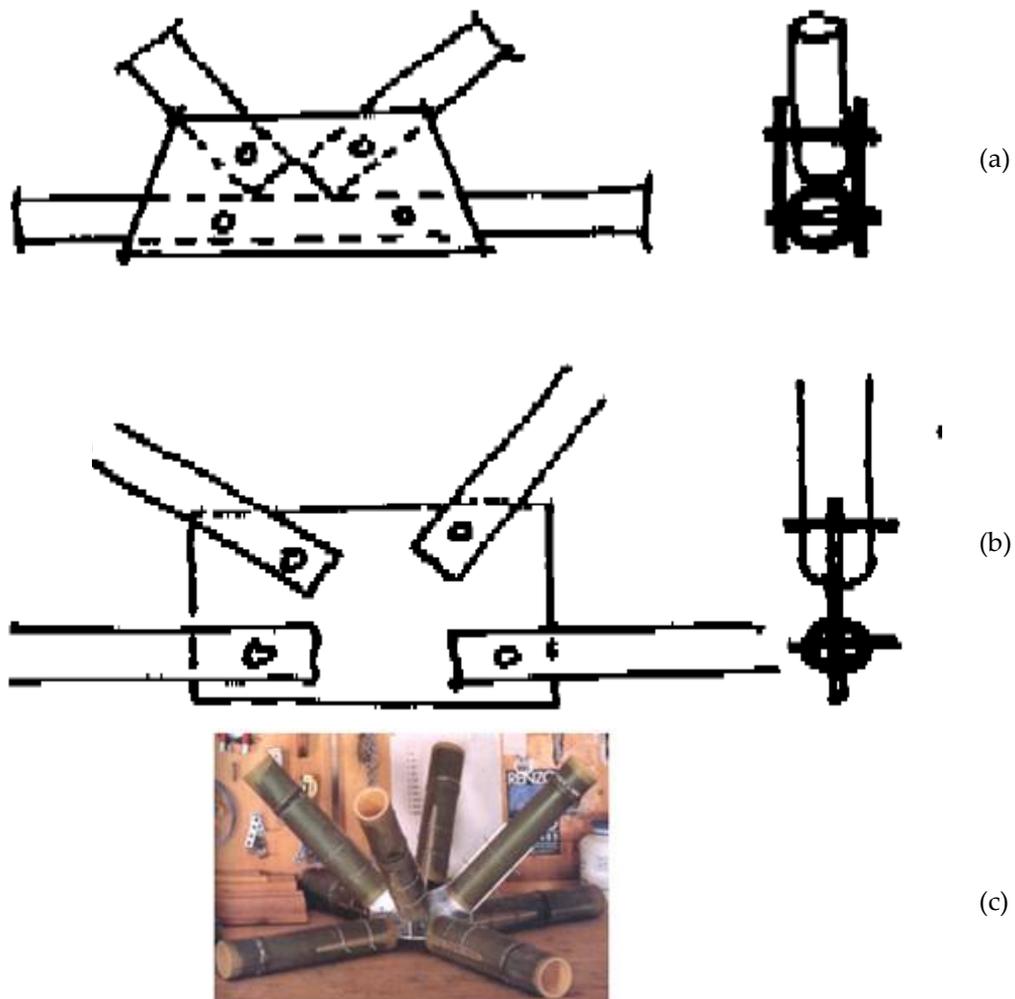


Figure 40: Assemblage du groupe 5 utilisant des plaques métalliques :
 (a) et (b) [JAN 2000]
 (c) Assemblage imaginé par Renzo Piano [ROT 2009]

Les nœuds présents sur le chaume sont donc utilisés dans la plupart des cas pour lier les bambous. Ils sont utilisés soit comme point de solidité pour la transmission des efforts de cisaillement soit pour éviter la rupture par aplatissement des tiges sur elles même. Pour ce dernier point, il est possible d'utiliser d'autres méthodes pour renforcer le bambou. Ainsi, sur le site Internet de « Deboer Architects » [DEB 2009], une version moderne de l'assemblage de la Figure 32 (b) est présentée : il s'agit du « Fish-Mouth joint » (Figure 41). Cet assemblage, développé par Simón Vélez renforce le bambou à l'écrasement par l'intermédiaire de mortier.

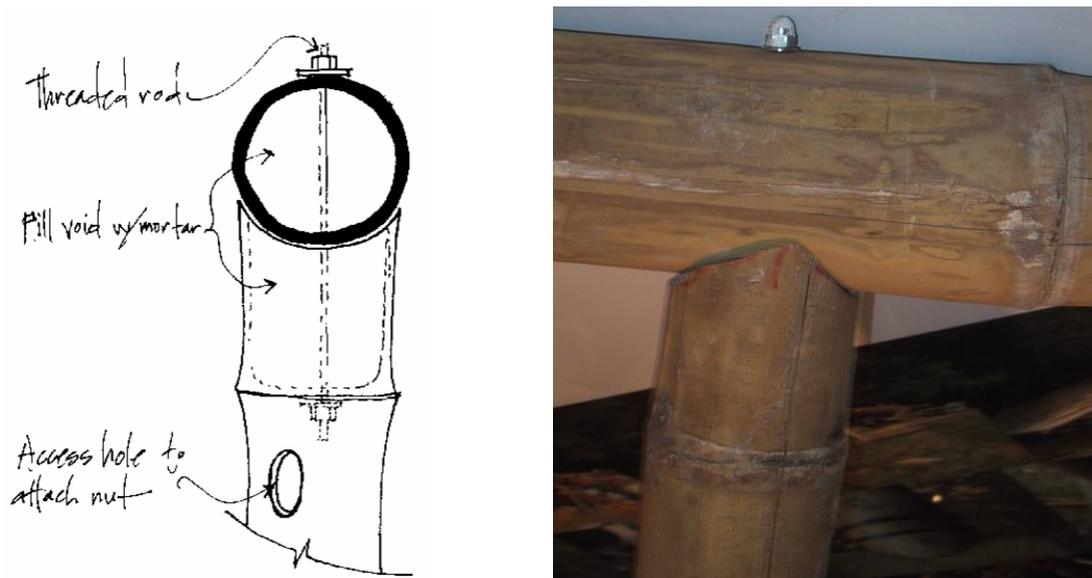


Figure 41: Le "Fish-Mouth joint" : assemblage lié par l'intermédiaire d'une tige filetée et de mortier [DEB 2009]

Cette technique de renforcement est également utilisée pour lier plusieurs tiges de bambou entre elles pour la réalisation de structures importantes. Vélèz lors de la réalisation du pavillon Zeri (Figure 22 (f)) a utilisé cette technique particulière pour lier les chaumes et réaliser des poteaux. Les chaumes sont percés et des tiges filetées sont passées dans ces trous pour les lier entre eux. L'entre nœud où sont placées les tiges est rempli de ciment (un trou est réservé pour cette opération) pour éviter la rupture par aplatissement des chaumes sur eux même. Cette technique est présentée sur la figure 42. Cet assemblage appartient uniquement au groupe 4 de Janssen car la section du bambou n'est pas utilisée.

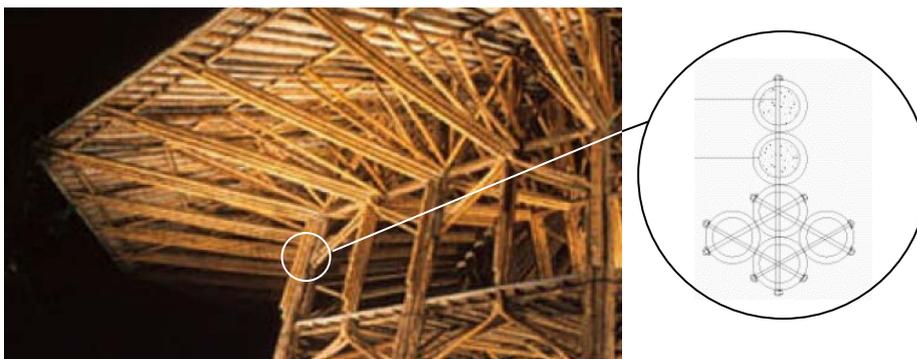


Figure 42: Détail du pavillon Zeri [ROT 2009]

Les assemblages de la famille I permettent de réaliser la grande majorité des structures traditionnelles et une partie des structures modernes. Ils peuvent transmettre des efforts de compression axiale en utilisant toute la section du chaume. La transmission des efforts de traction axiale se fait par l'intermédiaire d'efforts de cisaillement (comme pour les assemblages brochés bois) uniquement en utilisant les renforts naturels de la plante (les nœuds). La forme tubulaire du bambou le rendant vulnérable aux efforts de compression transversale (risque d'effondrement par

aplatissement du chaume), le passage de ces derniers est permis par l'utilisation des renforts naturels de la plante (les nœuds) et/ou en renforçant artificiellement la tige par l'intermédiaire de mortier. Aucun des assemblages de la famille I ne permet d'utiliser toute la capacité résistante du matériau en traction longitudinale.

3.2.2. Assemblages de la famille II

Pour les assemblages appartenant à cette famille, les efforts sont repris de l'extérieur de la paroi parallèlement au sens du fil ce qui correspond aux assemblages du groupe 6 défini par Janssen [JAN 2000].

Les assemblages de la figure 43 montrent des solutions traditionnelles utilisant ce principe : les efforts passent de l'extérieur de la paroi par l'intermédiaire de cordages. Les cordages sont traditionnellement en fibre de cocotier ou en bande de bambou. Pour ce dernier procédé, les bandes sont posées vertes et lorsqu'elles sèchent, elles rétrécissent et resserrent les bambous à lier entre eux. Aujourd'hui, des matériaux plus modernes sont utilisés (liens d'acier ou bandes de plastique). Une autre application traditionnelle de cette famille d'assemblage est rencontrée pour renforcer des poteaux de bambou. Ces derniers sont liés par des cordages entre eux pour former des poteaux d'inertie plus importante.

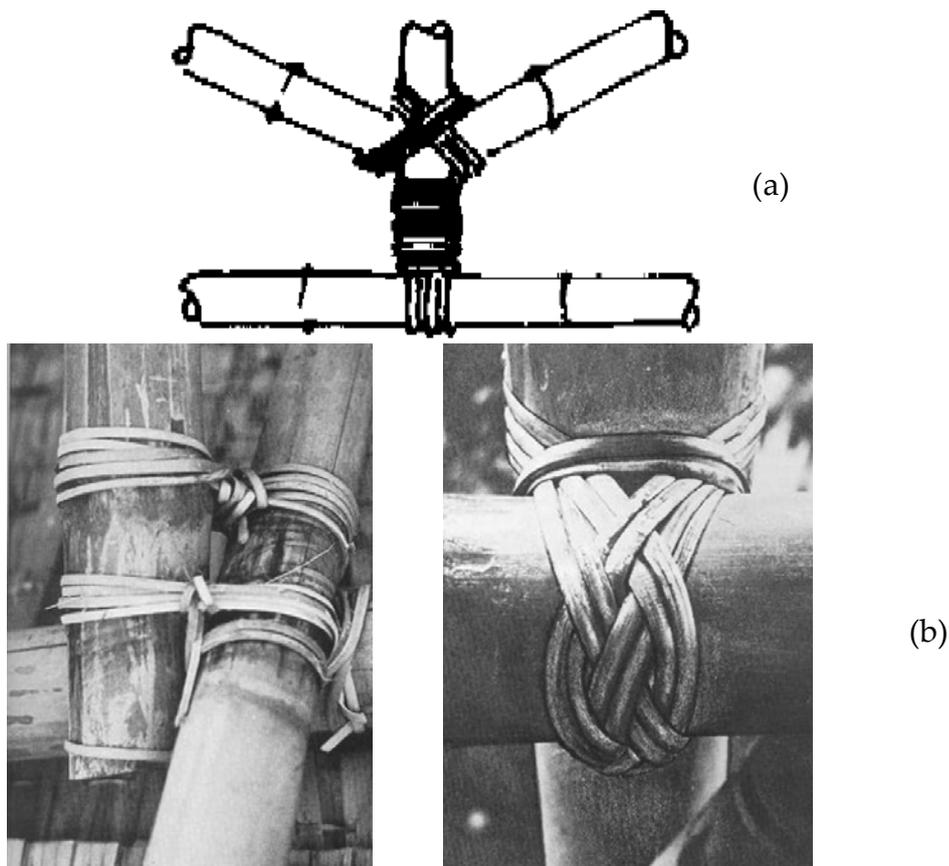


Figure 43: Assemblage traditionnel utilisant les cordages pour transmettre les efforts entre chaume par l'intermédiaire de leur paroi extérieure :

(a) principe de fonctionnement [JAN 2000]

(b) applications concrètes [ROT 2009]

Brusnowitz [BRU 1989] a déposé un brevet sur un procédé proche de ceux décrits précédemment (Figure 44).

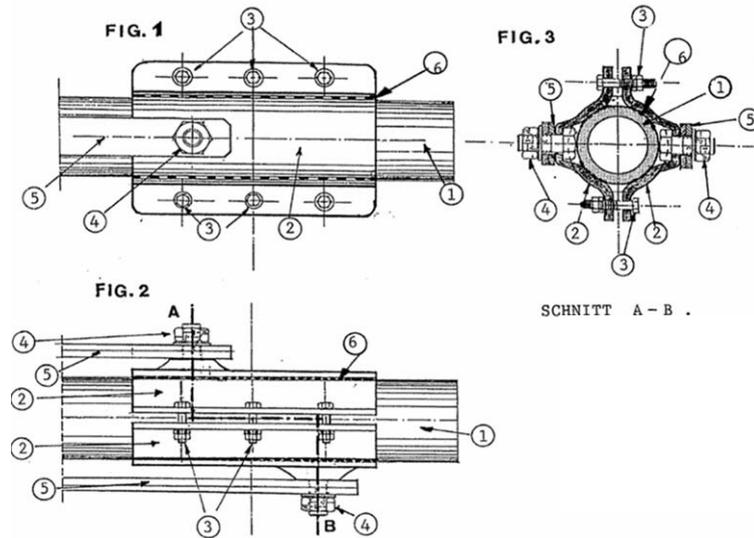


Figure 44: Assemblage de Brusnowitz [BRU 1989]

Alberman et al. [ALB 2006] ont réalisé un assemblage léger pour les tiges de bambou. Ce dernier est en PVC et prend la forme indiquée sur la figure 45 : les efforts passent de l'extérieur de la tige de bambou vers l'embout par l'intermédiaire d'une colle. Les auteurs soulignent que pour optimiser l'assemblage, il est nécessaire de faire des entailles à l'extrémité des bambous. Le test en traction montre que ce type d'assemblage peut monter jusqu'à 19 kN pour des bambous de 50 à 65 mm de diamètre extérieur. A partir de cet assemblage, un treillis a été réalisé.

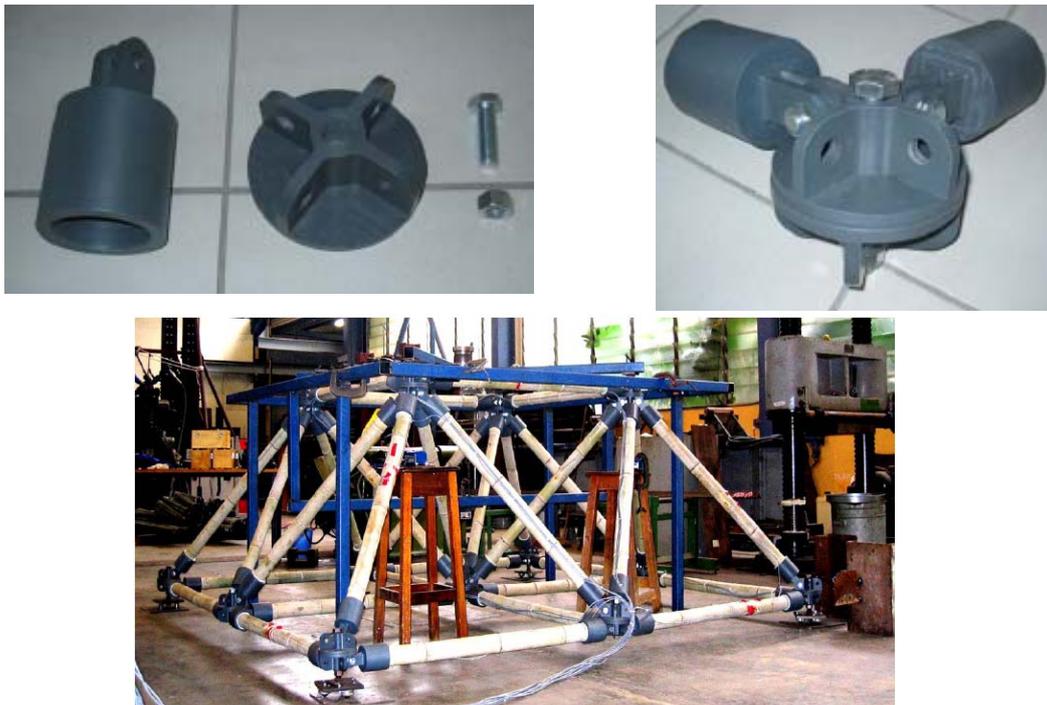


Figure 45: Assemblage développé par Alberman et al [ALB 2006]

Le système Bambutec reprend les efforts à la fois de l'intérieur et de l'extérieur de la tige de bambou. En effet, à partir de bois de résineux usinés pour recevoir les tiges de bambou, ces dernières sont collées et orientées pour réaliser des structures en treillis comme l'indique la Figure 46.

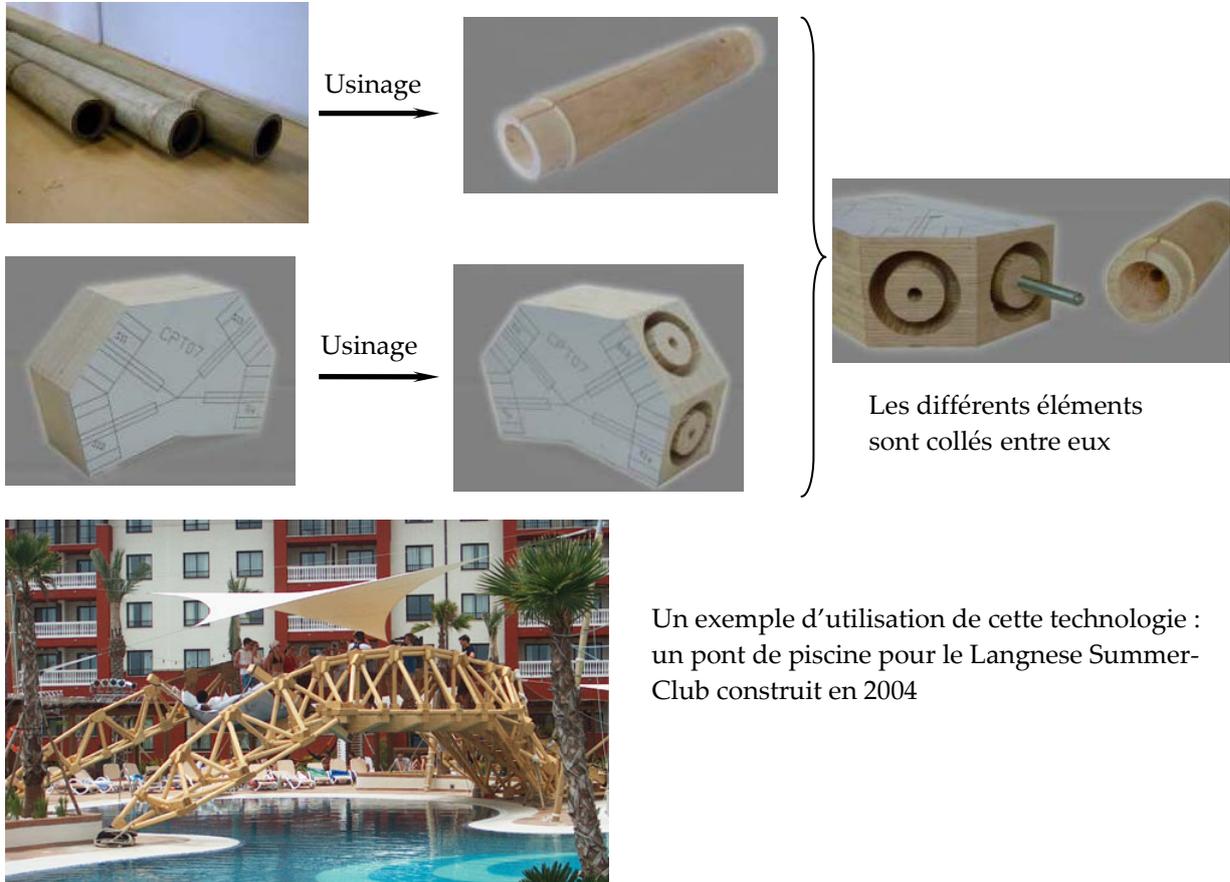


Figure 46 : Description du système Bambutec [BAM 2009]

Peu d'assemblages permettent le passage des efforts par l'extérieur de la tige. Les assemblages les plus performants utilisant cette technique nécessitent l'utilisation de colle mais ne permettent pas l'utilisation de 100% de la capacité résistante du bambou en traction.

3.2.3. Assemblages de la famille III

Pour les assemblages de cette famille, les efforts sont repris à l'intérieur du chaume parallèlement aux fibres par l'intermédiaire d'un élément linéaire (une tige filetée ou autre). Les efforts à l'intérieur du bambou peuvent être repris par différents types de liant. Cette famille d'assemblages, correspondant au groupe 2 défini par Janssen, est peu utilisée dans les assemblages traditionnels et permet d'imposer au bambou des efforts de traction et de compression parallèles aux fibres.

Le premier liant permettant le transfert des efforts du chaume vers un élément linéaire est la colle. Par exemple, les efforts peuvent être transmis de l'intérieur du chaume par l'intermédiaire d'une cale de bois cylindrique. Dans ce cas, le bois est collé sur la paroi intérieure de la tige. Une plaque de métal peut alors être collée dans une fente préalablement réalisée dans la cale de bois. Différentes géométries de plaques métalliques peuvent être utilisées ; quelques unes sont présentées sur la figure 47.

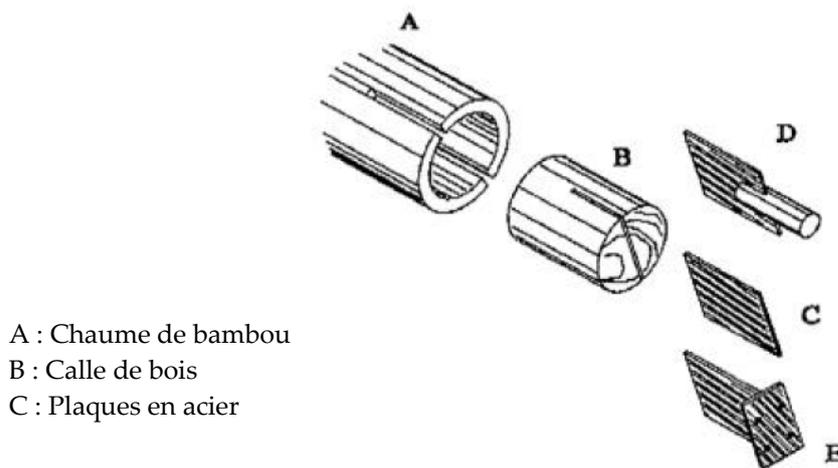


Figure 47: Connexion par une cale de bois [ROT 2009]

Pour les bambous de petit diamètre, le système Pan® peut être utilisé. Dans ce cas, une tige métallique est collée dans le chaume. Ce système permettrait de reprendre 50% de la capacité résistante du bambou (Figure 48).



Figure 48: Assemblage utilisant le système Pan® [ROT 2009]

Un autre liant possible est le béton. Janssen [JAN 1981] cite des travaux russes qui n'ont pas pu être retrouvés⁴ et qui rapporteraient que l'assemblage serait aussi fort que le bambou lui-même.

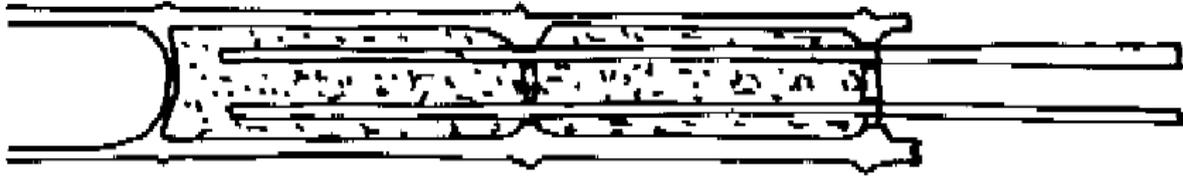


Figure 49 : Assemblage permettant le transfert des efforts de l'intérieur du chaume de bambou vers des tiges par l'intermédiaire de ciment [JAN 1981]

Pour les bambous de gros diamètres, des assemblages spéciaux peuvent être utilisés. Dans ce cas, un profilé métallique particulier est ancré dans la tige de bambou préalablement remplie de ciment. Cet assemblage, présenté sur la figure 50, a été développé par l'entreprise Mero.

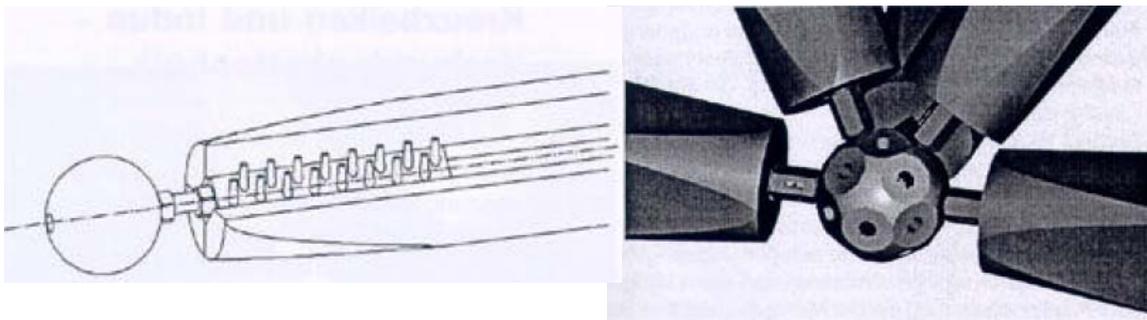


Figure 50: Assemblage Mero [ROT 2009]

En 2001, Rabot-Querci [RAB 2001] décrit deux assemblages utilisant le scellement d'une tige filetée dans le chaume par l'intermédiaire d'un mortier de scellement fluide. Le premier de ces assemblages est un assemblage sur le nœud, c'est-à-dire que le bambou est coupé avec un nœud à son extrémité et que ce dernier est percé en son milieu d'un diamètre supérieur d'un millimètre à celui de la tige. L'entre nœud est alors rempli de mortier et la tige est insérée dedans. La même opération est réalisée à l'autre extrémité du bambou pour pouvoir le tester en traction après séchage du mortier. Certaines de ces éprouvettes sont ligaturées avant de les tester, c'est-à-dire que leur extrémité est entourée de fil polyamide ou de fibre de verre collée sur le chaume. Le fait de ligaturer permet de limiter la fissuration du chaume et d'augmenter la résistance de l'assemblage. Le mode de rupture le plus souvent observé est l'arrachement de la cloison au niveau du nœud ce qui correspond à une contrainte de 52,3 MPa : cet assemblage ne permet donc pas d'utiliser toutes les capacités du bambou en traction longitudinale. Le deuxième

⁴ N.N. Technical Digest (Prague) (1961) vol. 3 no. 5 p.72

assemblage est un assemblage en cône : des entailles sont réalisées à l'extrémité du chaume qui est resserré en cône. Cette manipulation permet d'augmenter l'adhérence entre le mortier et le bambou. Avant que le mortier ne soit coulé dans l'entre nœud, le chaume est maintenu fermé par le même principe de ligature décrit précédemment. Après séchage du mortier, l'assemblage est testé en traction. Le mode de rupture le plus observé est le relâchement de la ligature entraînant une sortie du bloc. Malgré cela, la ruine des éprouvettes apparaît plus tard que pour l'assemblage précédent mais avec un déplacement plus important. L'auteur souligne que lors du séchage du mortier, ce dernier subit une phase d'expansion exerçant une poussée sur les parois du chaume. Le bambou n'ayant pas une résistance en traction transversale importante, cette poussée conduit parfois à la ruine des éprouvettes avant même de les tester.

Le fait de donner une forme conique au bambou a été imaginé dès 1941 par Duff. Cette référence n'a pas été trouvée et est citée par Janssen [JAN 1981]⁵. L'assemblage de Duff est constitué d'un « bouchon » de bois en forme de cône tronqué lié à un boulon qui permet le passage des efforts du boulon au chaume (Figure 51). Pour éviter l'ouverture du chaume, ce dernier est entouré d'un anneau en aluminium ou en acier.

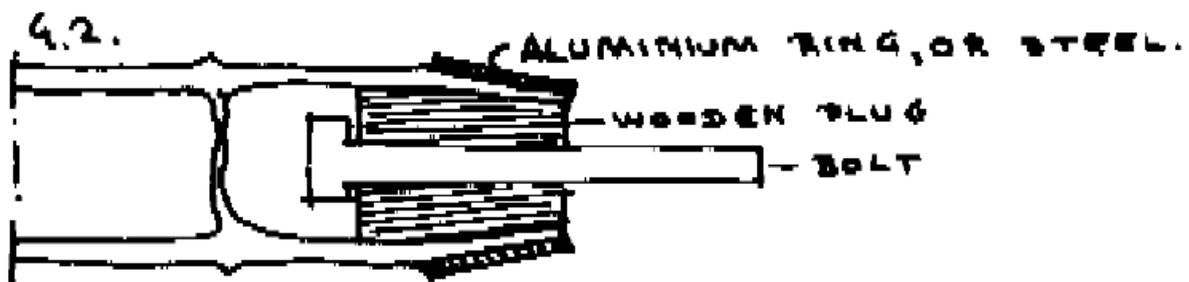


Figure 51 : Assemblage imaginé par Duff en 1941 [JAN 1981]

En 2005, Londono et Cheyne [LON 2005] posent un brevet sur un assemblage très semblable à celui de Duff. Dans cet assemblage, l'effort transite dans le bambou par l'intérieur du chaume par l'intermédiaire d'un « bouchon » constitué 0,5 litres d'un mélange de sable, de résine phénolique et d'un catalyseur. Pour que ce bouchon passe les efforts vers le chaume, l'extrémité de ce dernier est usinée en cône grâce à des entailles (Figure 52). Pour empêcher l'ouverture de la tige de bambou, cette dernière est maintenue fermée par un câble en acier. Ce type d'assemblage permet d'utiliser 100% de la capacité résistante du bambou lors d'un test en traction.

⁵ Duff C.H. (1941), *Bamboo and its structural use*, Institution of Civil Engineers, Shanghai, pp. 2..27

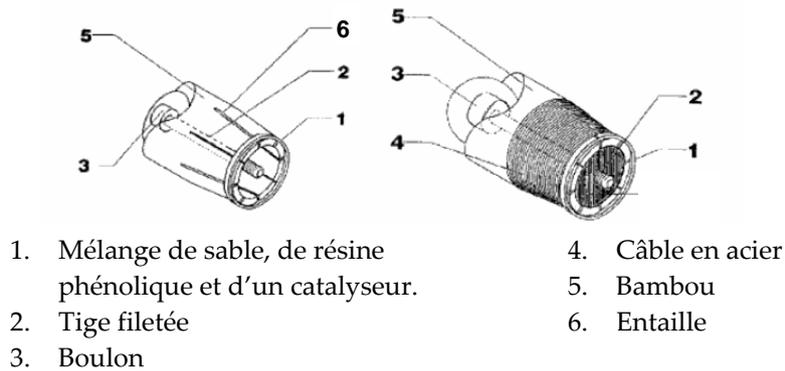


Figure 52: Assemblage de Londono et Cheyne [LON 2005]

Dans les derniers assemblages décrits, 100% de la capacité résistante du bambou en traction longitudinale est utilisée. Ceci est permis par la forme de la zone d'assemblage (Figure 53) : les efforts de traction (F) sont transférés dans le chaume de bambou par l'intermédiaire du cône intérieur qui envoie dans le bambou un effort de traction longitudinale (F_t) et un effort perpendiculaire (F_c) repris par le cône extérieur (anneau métallique ou câble en acier). Le bambou est donc sollicité en traction longitudinale par l'effort F_t et en compression transversale par l'effort F_c . Cette dernière sollicitation est permise (contrairement au bois) grâce à la forte limite élastique du bambou en compression transversale.

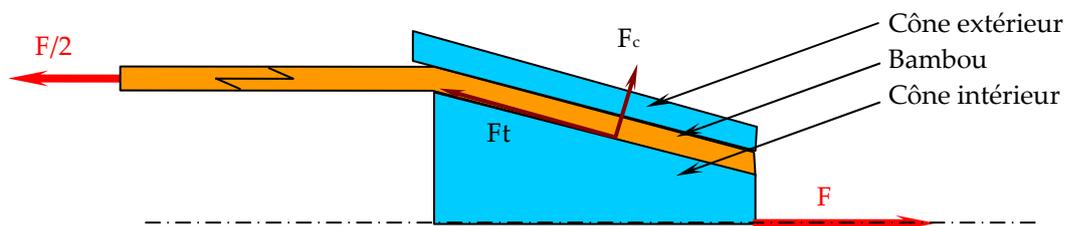


Figure 53 : Passage des efforts du cône intérieur vers le bambou (une moitié de l'assemblage est représenté) dans le cas des assemblages Duff (1941) [JAN 1981] et [LON 2005]

Ainsi les assemblages coniques pour le bambou mettent en jeu à la fois de la compression transversale et de la traction longitudinale tout comme les assemblages métalliques précontraints. Cependant les efforts transitent peu ou pas par frottement, l'effort n'est pas garanti et les glissements initiaux sont importants.

Cette analyse des assemblages pour le bambou, qui est résumée sur le tableau 5, montre que les assemblages coniques permettent de monopoliser 100% de la capacité résistante du matériau en traction longitudinale. A partir de ces assemblages coniques pour le bambou, un assemblage précontraint pour ce matériau constitue la suite de cette approche.

Type d'assemblage		Groupes Janssen					Efforts			Limite de l'assemblage	Figure et Référence	
		1	2	4	5	6	F_c	F_t	τ			
FAMILLE 1	Joint de colle	Passage d'une partie de l'effort par la section du bambou	x					x		x	Bambou en cisaillement	Figure 31
	Tiges au niveau d'un nœud		x			x		x	(x)	x	Bambou en cisaillement	Figure 32
	Lanières au niveau d'un nœud		x				x	x	x	x	Bambou en cisaillement	Figure 33 Figure 34
	Tiges + lanières au niveau d'un nœud		x		x	x		x	x	x	Bambou en cisaillement	Figure 35
	Tiges au niveau d'un nœud				x	x		x	x	x	Bambou en cisaillement	Figure 38
	Tiges + Tube d'acier				x	x		x	x	x	Bambou en cisaillement	Figure 39 (Yoh)
	Tiges + Plaque				x	x		x	x	x	Bambou en cisaillement	Figure 40 (Piano)
	Tige + béton		(x)		x	x		x	x	x	Bambou en cisaillement	Figure 41 Figure 42
FAMILLE 2	Lanières		x				x	x		Glissement	Figure 43	
	Tubes serrés		x				x	x		?	Figure 44 [BRU 1989]	
	Tubes collés		x				x	x		Décollement des tubes	Figure 45 [ALB 2006]	
	Bois collé		x				x	x		?	Figure 46	
FAMILLE 3	Bois collé			x			x	x		?	Figure 47	
	Acier collé			x			x	x		Ruine de l'assemblage	Figure 48	
	Béton			x			x	x		Arrachement du bloc de béton	Figure 49	
	Assemblage conique Bois + Acier			x			x	x		Traction longitudinale	Figure 51 Duff	
	Assemblage conique Résine + Câble			x			x	x		Traction longitudinale	Figure 52 [LON 2005]	

Tableau 5: Récapitulatif des différents assemblages pour le bambou (F_c : Force de compression, F_t : Force de traction, τ : effort de cisaillement parasite)

4. APPLICATION DU PRINCIPE DE LA PRECONTRAINTE SUR DES CHAUMES DE BAMBOU

A partir des données bibliographiques, des assemblages précontraints pour le bambou ont été imaginés, usinés et testés sur des chaumes en traction longitudinale. Les résultats obtenus sont ensuite analysés.

4.1. Essais préliminaires :

La bibliographie montre que pour mobiliser 100% de la capacité résistante d'un matériau fibreux et fortement anisotrope comme le bambou en traction longitudinale, il est nécessaire de faire transiter les efforts du bambou vers l'assemblage par l'intérieur du chaume en lui donnant une forme conique. Le chaume de bambou est alors coincé entre un cône intérieur et extérieur. Dans les assemblages utilisant ce principe trouvés en bibliographie, les efforts ne transitent pas par frottement entre les cônes et le bambou dans la partie initiale du chargement. Le passage des efforts est possible grâce à la forme conique que prend le chaume dans la zone d'assemblage. Sans cette forme conique les parties glisseraient initialement sans limite. Pour introduire du frottement dans l'assemblage, il est nécessaire d'introduire dans le bambou des efforts de compression transversale. Le principe proposé ici est d'utiliser la forme conique de l'assemblage pour injecter dans le bambou des efforts de compression transversale et de transmettre ainsi l'effort axial par frottement sur la surface intérieure du chaume. Si l'effort de compression transversale est introduit avant l'application de l'effort de traction sur l'assemblage lui-même, l'assemblage peut être considéré comme précontraint. Une enveloppe extérieure rigide est cependant nécessaire pour permettre l'application de cet effort.

En 2002, lors d'un projet de fin d'études encadré par Bocquet et Duchanois et réalisé par Peillien et Petitdemange [PEI 2002] un assemblage utilisant le principe décrit ci-dessus a été réalisé pour des chaumes de bambou. La longueur du cône intérieur est de 97 mm et l'angle qu'il réalise avec la verticale est de 3°. Le cône extérieur, quant à lui, a une longueur de 150 mm (Figure 54). Cinq essais de traction sur un système constitué d'une tige de bambou munie à chacune de ses extrémités d'un assemblage précontraint sont effectués (Figure 55). Ces essais sont réalisés sur une machine universelle de type Instron munie d'une cellule de charge de 150 kN et sont illustrés par la force appliquée au système en fonction du déplacement de la traverse de la machine d'essai (Figure 57). Cette représentation permet de montrer l'allure du comportement du système mais ne donne pas le glissement réel de l'assemblage.

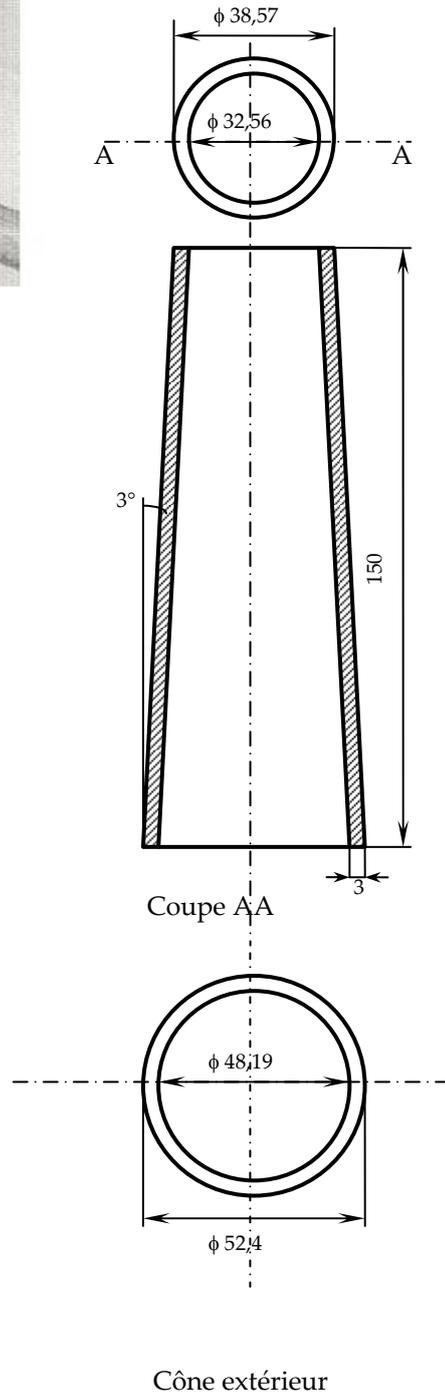
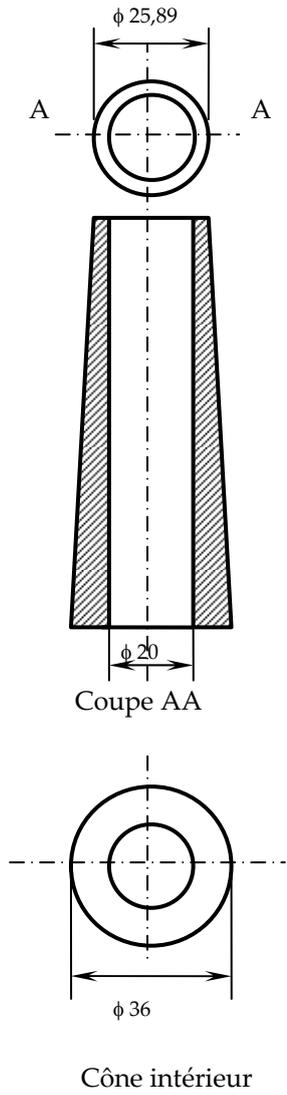
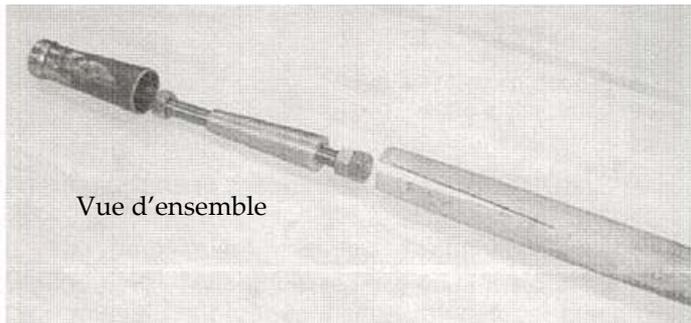


Figure 54 : Géométrie des assemblages précontraints préliminaires pour les chaumes de bambou [PEI 2002]

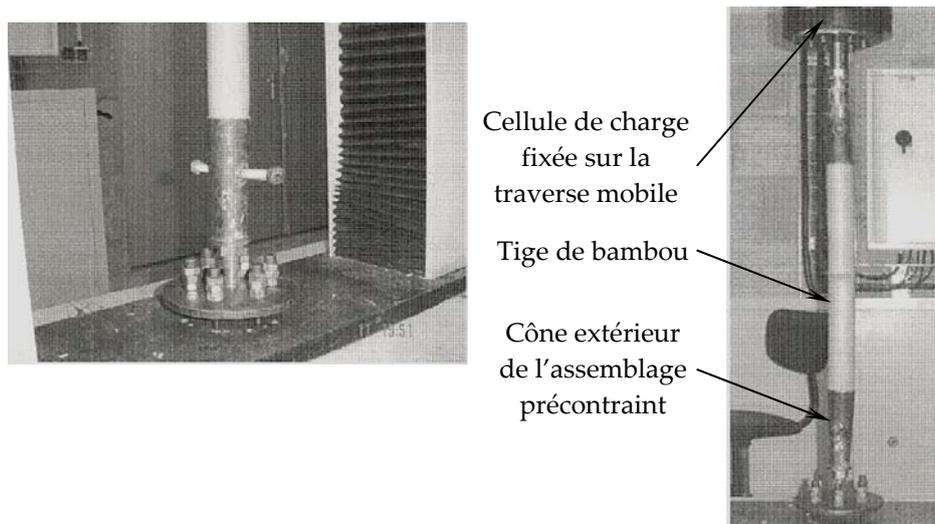


Figure 55 : Dispositif expérimental permettant de tester les assemblages précontraints pour des chaumes de bambou (essais préliminaires) [PEI 2002]

Le dispositif expérimental proposé ne permet pas de mesurer la raideur des assemblages. Cependant, les courbes de la figure 57 montrent qu'il n'y a pas de phase initiale de glissement mais que le système est linéaire jusqu'à une limite liée à la précontrainte introduite dans le système lors de sa mise en place (Figure 56). Au-delà de cette limite, le système entre dans une phase plastique capable de dissiper des sollicitations de type sismique. Ce dispositif expérimental semble donc présenter tous les atouts des assemblages précontraints pour l'acier.

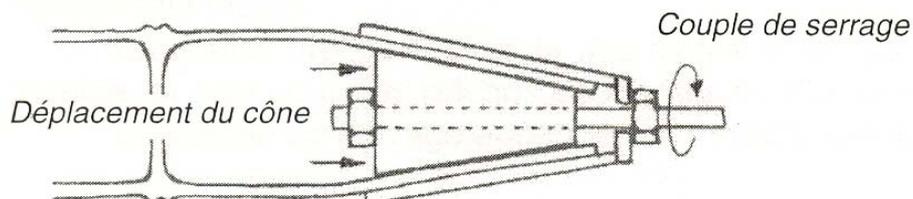


Figure 56 : Introduction de la précontrainte dans les assemblages [PEI 2002]

A partir de ces essais préliminaires, une nouvelle campagne est réalisée.

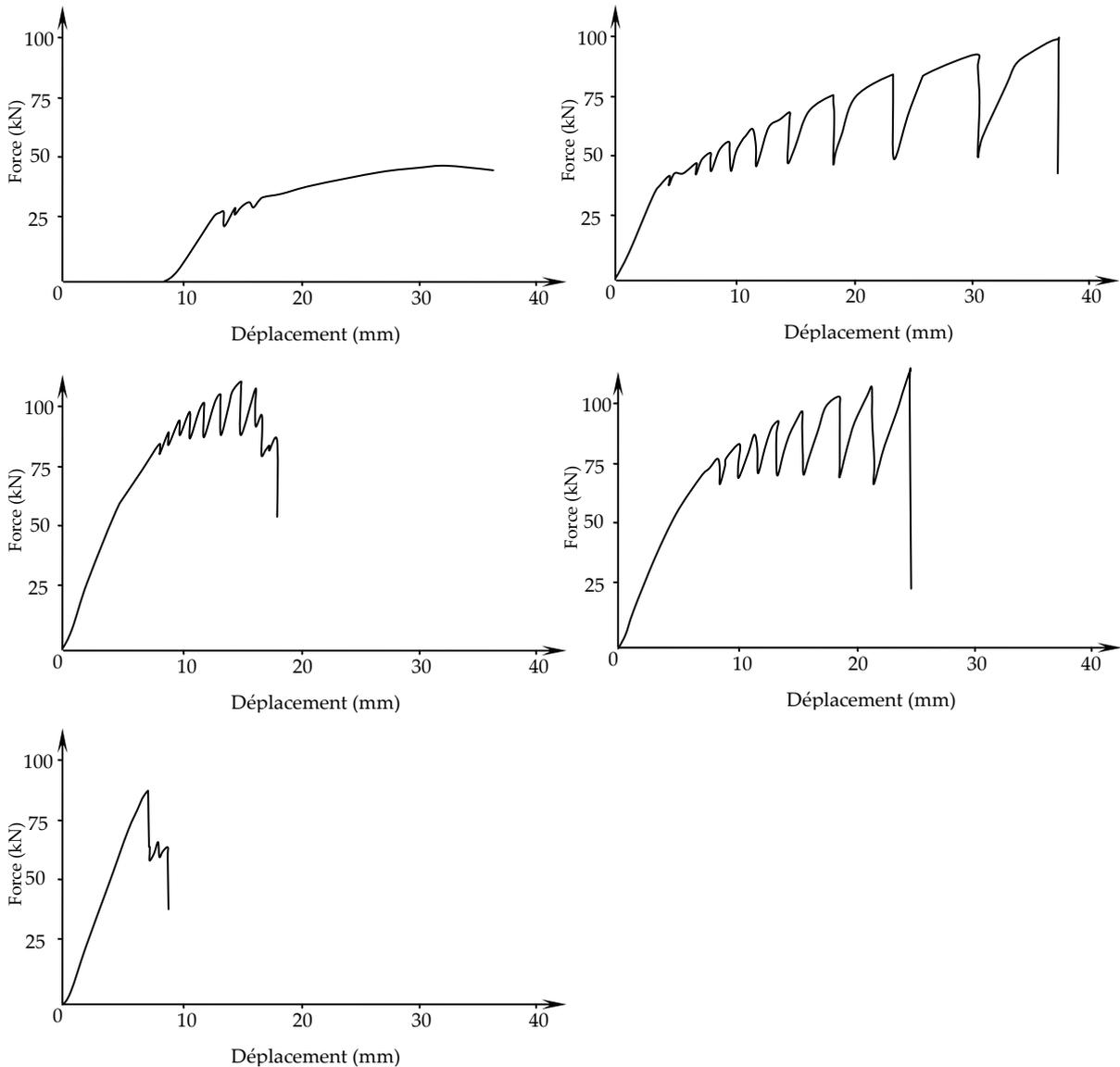


Figure 57 : Comportement des assemblages précontraints pour les chaumes de bambou lors des essais préliminaires [PEI 2002]

4.2. Principe et géométrie des assemblages testés

La première étape nécessaire à la réalisation d'un assemblage précontraint pour un chaume de bambou est l'usinage de l'extrémité de la tige en forme de cône. Cette étape se fait par la réalisation de huit encoches comme l'indique la figure 58.



Figure 58 : Préparation de l'embout d'un chaume de bambou pour la mise en place d'un assemblage précontraint

Pour appliquer l'effort de précontrainte dans la tige, cette dernière est pincée entre deux cônes usinés en acier. Ainsi, un assemblage à une extrémité d'un chaume de bambou est composé de deux cônes, d'une tige filetée et d'écrous, l'ensemble se montant comme l'indique la figure 59. La géométrie des assemblages réalisés dépend de deux paramètres : de la géométrie des assemblages préliminaires réalisés par Peillien et Petitdemange [PEI 2002] et de la géométrie des tiges de bambou à disposition. Dans l'idéal, pour une tige donnée, un assemblage doit être usiné. Ici, le même assemblage est utilisé pour plusieurs tiges ayant des dimensions proches. L'angle des cônes choisi pour les essais est de 3° par rapport à l'horizontale. La longueur du cône intérieur est de 112 mm et celle du cône extérieur est de 184 mm. Les plans de ces assemblages sont présentés dans l'Annexe 1. Le cône extérieur de la figure 59 est représenté avec une forme conique sur ses faces intérieures et extérieures. Seule la forme conique de la face intérieure est importante pour le fonctionnement de l'assemblage, aussi lors des essais réalisés, seule cette face possède une forme conique pour faciliter l'instrumentation des assemblages.

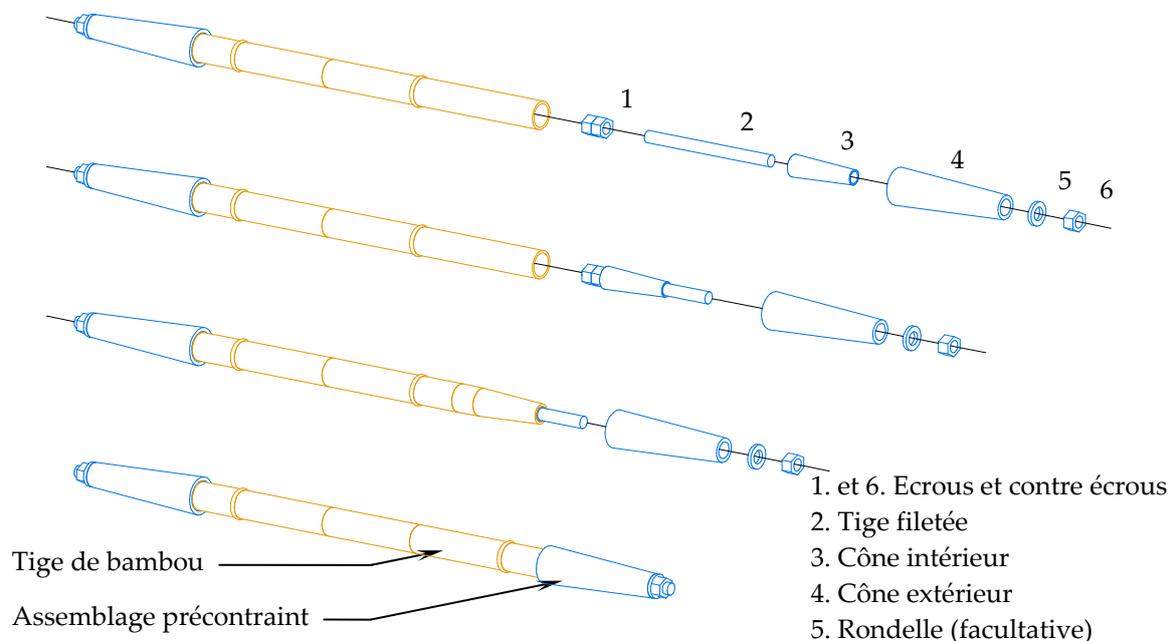


Figure 59 : Montage d'un assemblage précontraint pour un chaume de bambou

4.3. Description d'un essai « type » d'un assemblage précontraint pour le bambou

Pour caractériser le comportement de l'ensemble bambou - assemblages précontraints, des essais sont réalisés. Lors de la mise en place d'un assemblage précontraint pour le bambou, l'écrou 6 de la figure 59 est serré manuellement par l'intermédiaire d'une clé ce qui permet d'injecter une certaine force de précontrainte dans l'assemblage. Une tige de bambou munie d'un assemblage précontraint à chacune de ses extrémités est testée en traction longitudinale (parallèle aux fibres) en liant les assemblages à un vérin horizontal comme l'indique la figure 60.

Deux capteurs de déplacement de type LVDT (Linear Variable Differential Transducer) sont disposés sur le cône extérieur de chaque assemblage. Pour chaque extrémité de l'ensemble bambou - assemblages, un capteur permet de mesurer le déplacement relatif du cône extérieur par rapport au bambou et l'autre le déplacement relatif des deux cônes.

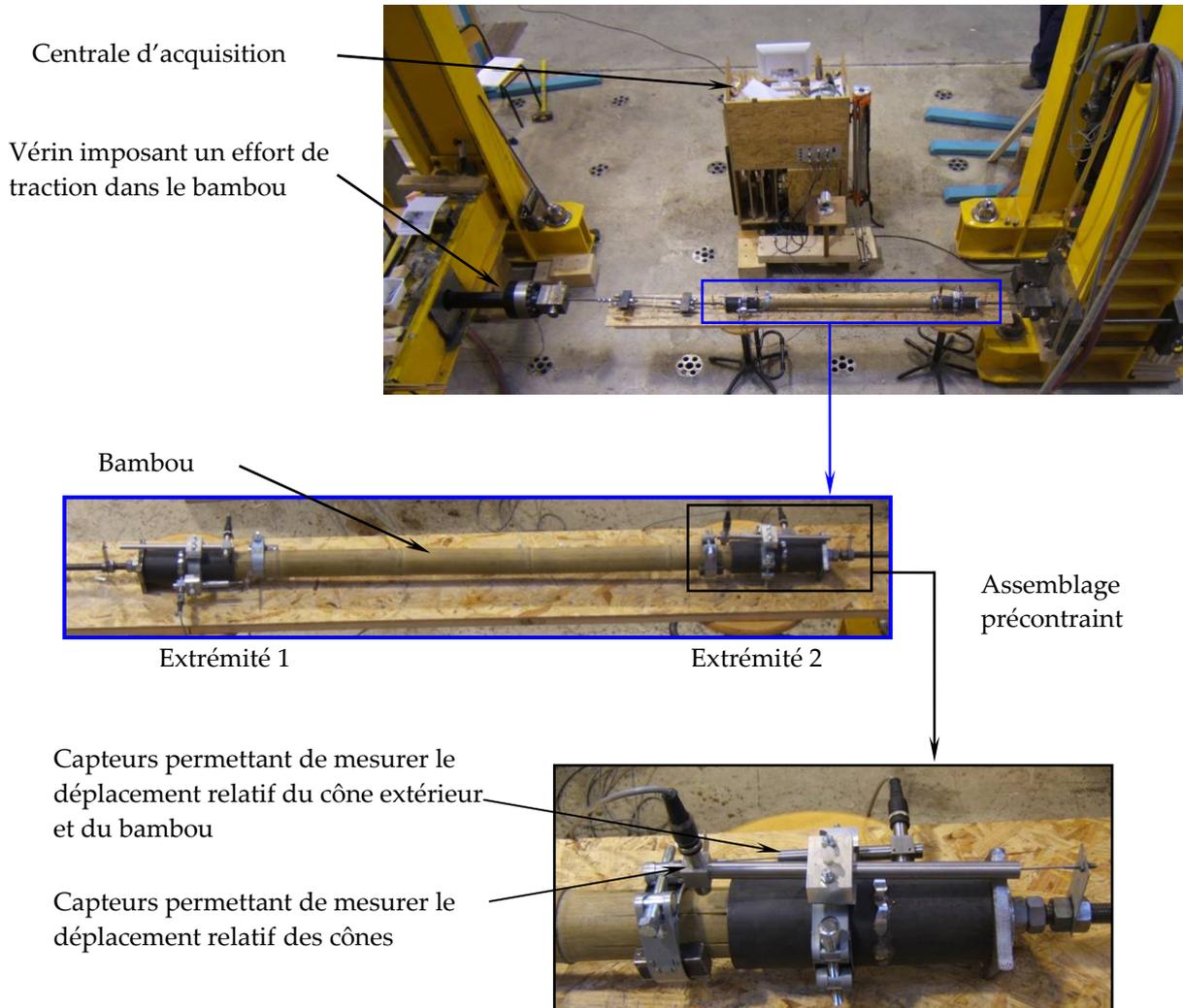


Figure 60 : Dispositif expérimental pour tester l'assemblage précontraint appliqué au bambou

A partir du déplacement relatif du cône extérieur par rapport au bambou et du déplacement relatif des deux cônes, il est possible de déterminer le déplacement relatif du cône intérieur et du bambou qui correspond au glissement de l'assemblage (Figure 61 (a)). La contrainte dans le bambou est calculée par le rapport entre la force appliquée sur l'ensemble et la section moyenne du chaume de bambou (Figure 61 (b)).

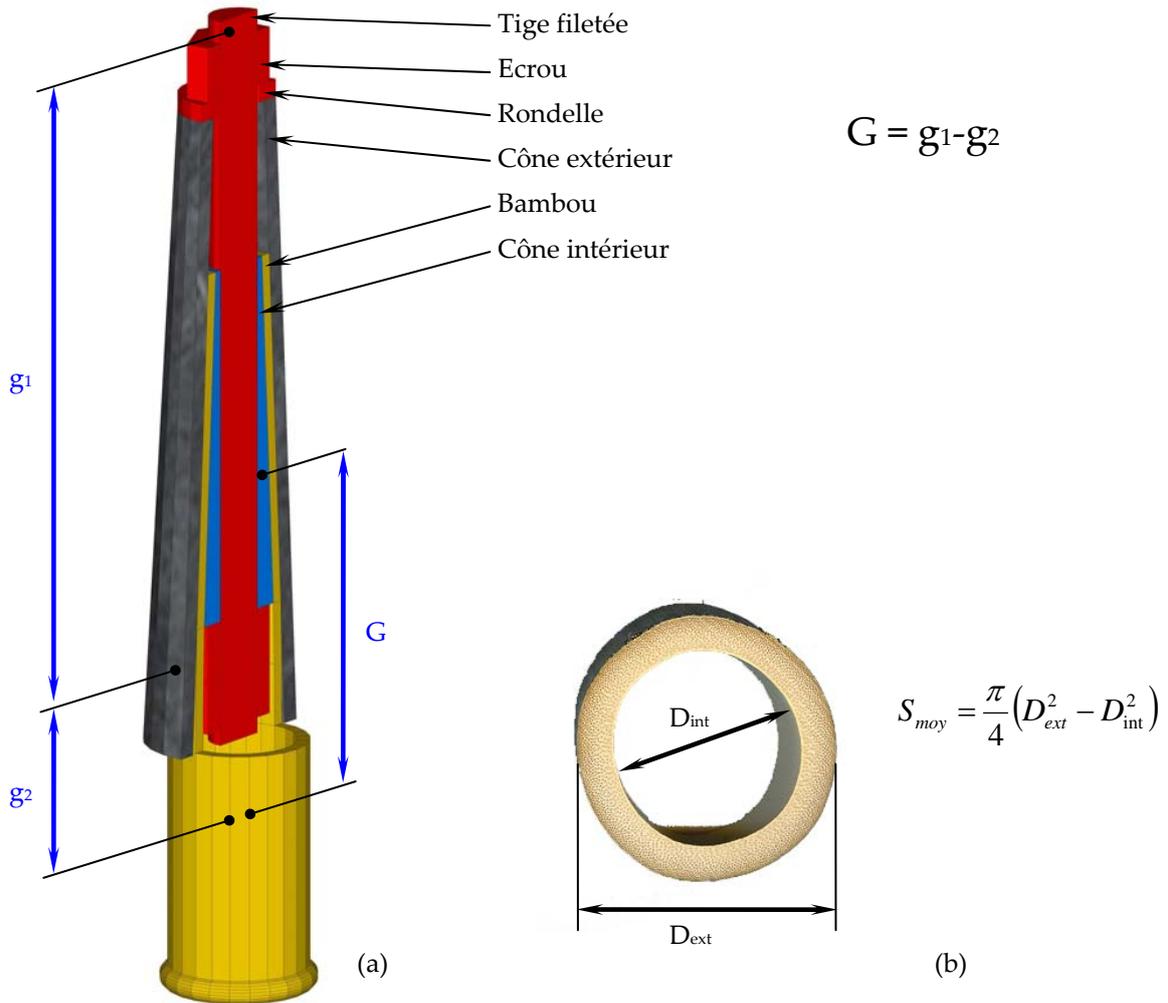


Figure 61 : Caractérisation du comportement d'un assemblage précontraint pour le bambou : (a) mesure du glissement (G), (b) mesure de la section

Pour expliquer les phénomènes mis en œuvre lors de la mise en place des assemblages précontraints pour le bambou, il est intéressant de présenter un exemple de courbe montrant la contrainte dans le bambou en fonction du glissement d'un des assemblages (Figure 62). Dans l'exemple présenté sur la figure 62, le test de l'ensemble bambou – assemblages se fait en quatre étapes :

- **Etape 1** : le système est chargé jusqu'à 90 kN (110 MPa),
- **Etape 2** : la charge est maintenue et le boulon 6 de la figure 59 est resserré pour garder la précontrainte dans l'assemblage,
- **Etape 3** : le système est déchargé,
- **Etape 4** : le système est rechargé jusqu'à rupture.

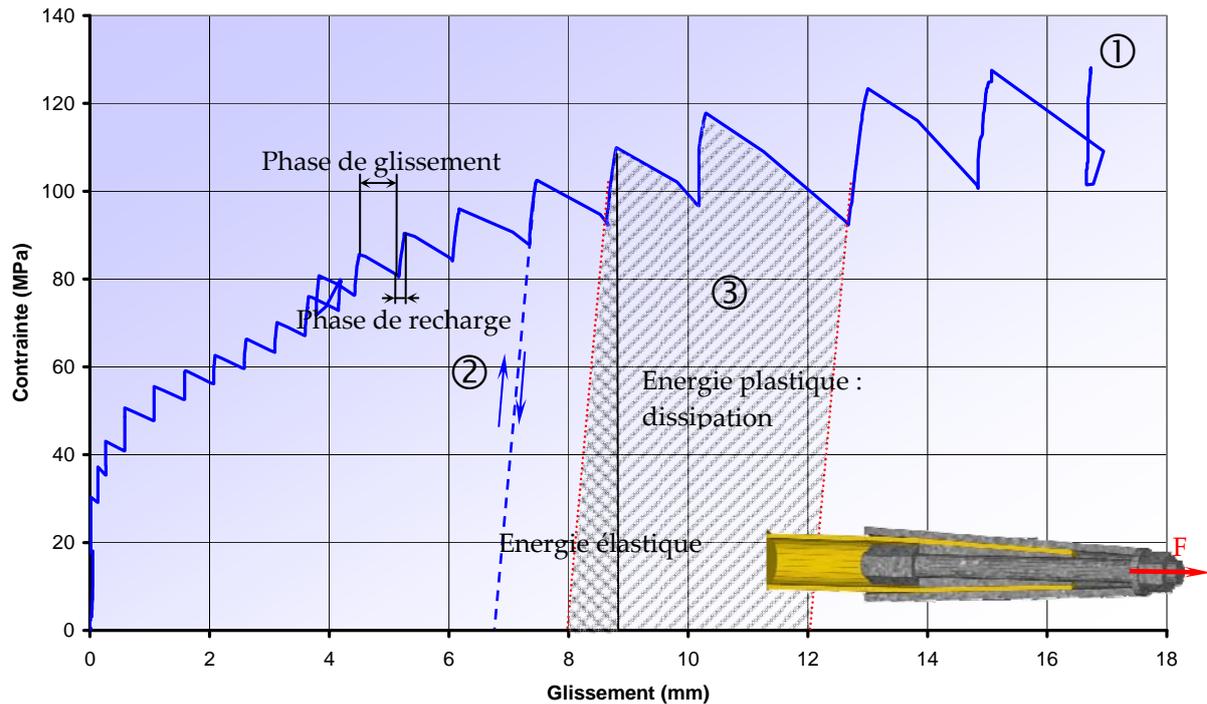


Figure 62 : Loi de comportement d'un assemblage précontraint pour un chaume de bambou

L'étape 1 est une étape de mise en place de la précontrainte dans le système. Cette étape peut se décliner en deux phases. Tout d'abord, la contrainte augmente rapidement jusqu'à environ 30 MPa pour un glissement très faible (0,05 mm). Une fois cette contrainte dépassée, les deux cônes subissent un glissement relatif plus important (deuxième phase de la première étape).

La charge de précontrainte injectée manuellement par l'intermédiaire du boulon 6 de la figure 59 permet à l'assemblage de ne pas subir de glissement jusqu'à 30 MPa. Il est à noter que la raideur dans cette zone est importante (valeur difficilement mesurable du fait de l'imprécision des capteurs). Une fois l'effort induit par la précontrainte dépassé par l'effort de traction, le cône intérieur glisse. Ce glissement induit des efforts de compression transversale dans le chaume de bambou. Après glissement, du fait de sa forme, le cône intérieur ressort de façon plus importante le bambou : l'effort de précontrainte augmente donc en même temps que celui de traction. La contrainte de traction augmente alors dans l'assemblage jusqu'à ce qu'elle soit à nouveau trop importante ce qui entraîne à nouveau le glissement du cône. La raideur lors de l'étape de recharge est de l'ordre de 30 kN/mm. Ce phénomène de glissement - recharge se produit plusieurs fois jusqu'à la fin de l'étape 1.

L'étape 2 permet de bloquer le cône intérieur et d'empêcher son retour à l'état initial (par glissement) lors de la décharge du système (étape 3). Lors du blocage du cône, l'effort de compression transversale dans le chaume est maintenu ce qui permet de garder une force de frottement importante entre les cônes et le bambou.

Lors de l'étape 4 (courbe en pointillé ② de la figure 62), le système se charge avec une raideur de l'ordre de 30 kN/mm pour atteindre une valeur proche de celle atteinte lors de l'étape 1. Lors de cette recharge, les efforts transitent entre le cône intérieur et le bambou par frottement. Une fois ce niveau atteint, les phases successives de glissement et de recharges reprennent jusqu'à rupture du système.

La zone ③ de la figure 62 montre que si l'assemblage est précontraint jusqu'à un certain niveau et que la charge appliquée dépasse ce niveau, le système entre alors dans une phase plastique. Ainsi, lors d'une sollicitation exceptionnelle de type sismique, cette phase plastique permet de dissiper une partie de l'énergie et ainsi éviter une rupture fragile du système.

Il est important de noter qu'au fur et à mesure que l'effort de traction longitudinale augmente dans le bambou, la contrainte de compression augmente également. L'effort de précontrainte dans l'assemblage augmente donc au fur et à mesure que ce dernier est sollicité en traction : il s'agit de **précontrainte active**.

4.4. Résultats obtenus lors des essais sur les assemblages précontraints pour le bambou

Pour caractériser au mieux les assemblages précontraints pour le bambou et vérifier que ces essais sont reproductibles, huit ensembles bambou – assemblages précontraints ont été testés. Les bambous testés proviennent de la bamboueraie de Prafrance SAS⁶ et appartiennent au genre *Phyllostachys* et leur espèce est *reticulata*. Le tableau 6 résume la géométrie des tiges de bambou testées, la résistance à laquelle le système a résisté, le mode de rupture observé et la raideur mesurée.

⁶ N° Siret : 330 685 116000 15 - Code NAF 9104 Z

N° essai	N° bambou	D_{moy} (mm)	e_{moy} (mm)	Force de rupture (kN)	Raideur (kN/mm)	Contrainte de rupture (MPa)	Mode de rupture	
1	B1	46,0	7,6	113,12 kN	-	126,7 MPa	Rupture du bambou	Capteurs LVDT
2	B2	45,6	8,0	88,17 kN	-	117,9 MPa	Rupture du bambou	
3	B2	45,6	8,0	65,60 kN	-	115,1 MPa	Rupture du bambou	
4	B3	43,4	7,4	100,77 kN	-	118,2 MPa	Rupture de la tige en acier	
5	B4	44,05	6,8	82,74 kN	32,8	78,4 MPa	Rupture au niveau de l'assemblage	Capteurs LVDT + VDM
6	B5	44,1	7,7	97,48 kN	35,8	80,5 MPa	Rupture du bambou	
7	B5	44,1	7,7	101,55 kN	85,0	88,0 MPa	Rupture du bambou	
8	B5	43,8	7,3	93,42 kN	21,0	109,8 MPa	Rupture du bambou	

Tableau 6 : Résultats obtenus pour les différents essais sur les assemblages précontraints pour le bambou (D_{moy} = Diamètre intérieur moyen de la tige de bambou testée
 e_{moy} = Epaisseur moyenne de la tige de bambou testée)

Pour caractériser les assemblages précontraints appliqués au bambou, il est choisi de représenter la contrainte dans le bambou en fonction du glissement de chaque assemblage (deux courbes par essai). Ces courbes (présentées sur la figure 63) montrent toutes le même comportement : une phase rigide initiale pour atteindre la force appliquée par l'effort de précontrainte initial puis une succession de glissements et de recharges jusqu'à rupture du système. Les essais 2, 5, 6, 7 et 8 présentent différentes phases de charge – décharge pour caractériser au mieux la raideur du système.

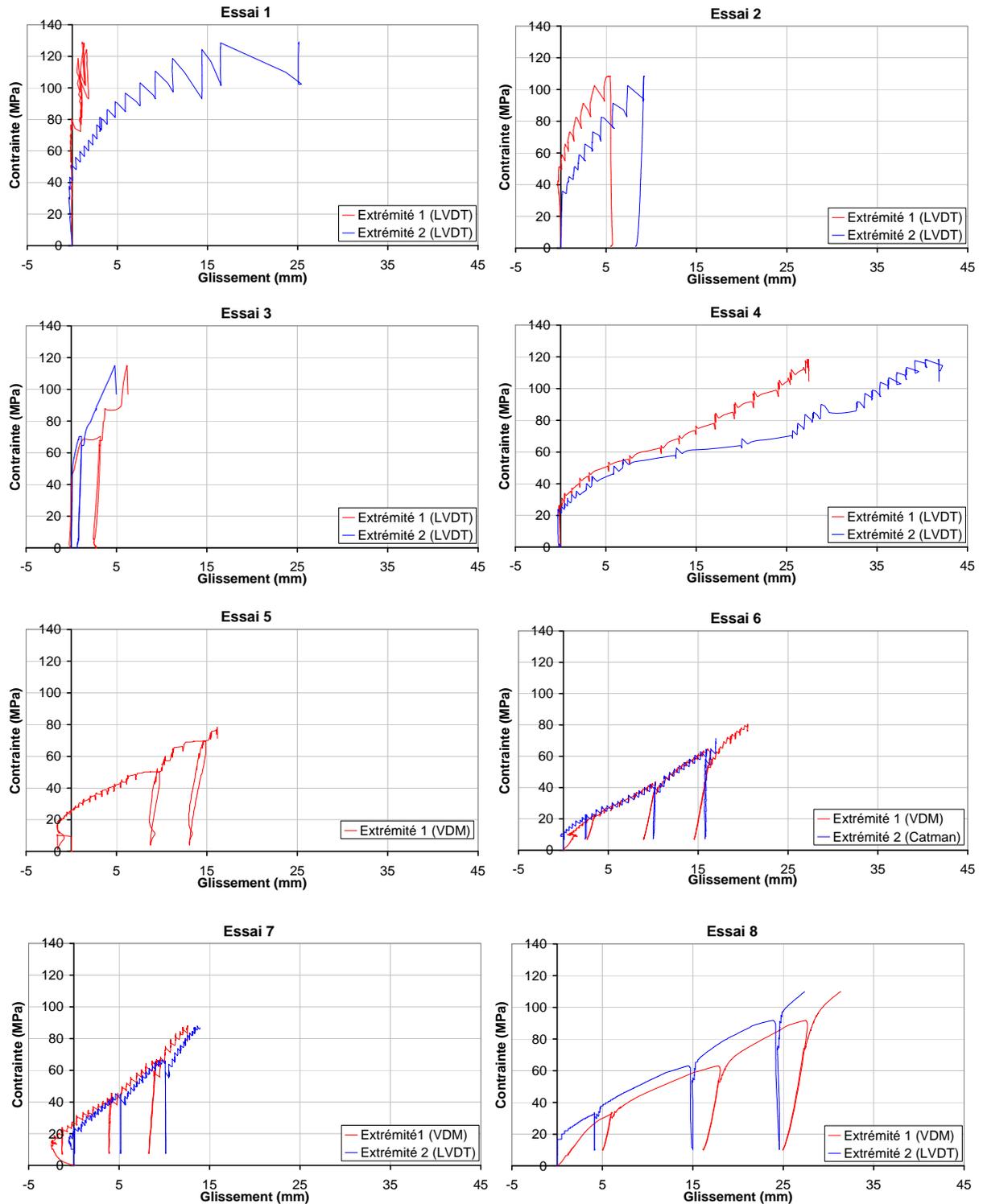


Figure 63 : Evolution de la contrainte dans le chaume de bambou en fonction du glissement relatif du cône intérieur et du bambou pour les différents essais réalisés sur les assemblages précontraints pour le bambou

A partir de ces données expérimentales, le système tige de bambou - assemblages précontraints est analysé à différents niveaux.

4.5. Analyse des résultats obtenus

4.5.1. Analyse de la rupture

Dans la majorité des essais, la rupture apparaît en dehors de la zone d'assemblage au niveau d'un nœud comme le montre la figure 64. Néanmoins, cette figure montre qu'une « lamelle » de bambou est marquée par le cône intérieur lors de son déplacement. Ce matage du bambou peut être limité en cassant les arêtes vives du cône intérieur (réalisation de chanfreins). Lorsque le matage est trop important, la rupture a lieu à la sortie de l'assemblage : il y a ruine prématurée. C'est le cas de l'essai 5 où la contrainte à rupture est la plus faible par rapport aux autres essais. Pour l'essai 4, les tiges en acier utilisées étaient trop peu résistantes : elles ont donc plastifié et cassé. Afin d'éviter ce problème, pour les essais suivant un acier de qualité 10.9 a été utilisé.

Lorsque l'assemblage est bien réalisé, c'est-à-dire que le cône intérieur est usiné de telle manière à ce que le bambou soit peu ou pas marqué, l'assemblage permet de monopoliser 100% de la capacité résistante du matériau en traction longitudinale, tout comme les assemblages de Londono et Cheyne [LON 2005] et de Duff (1941) [JAN 1981].

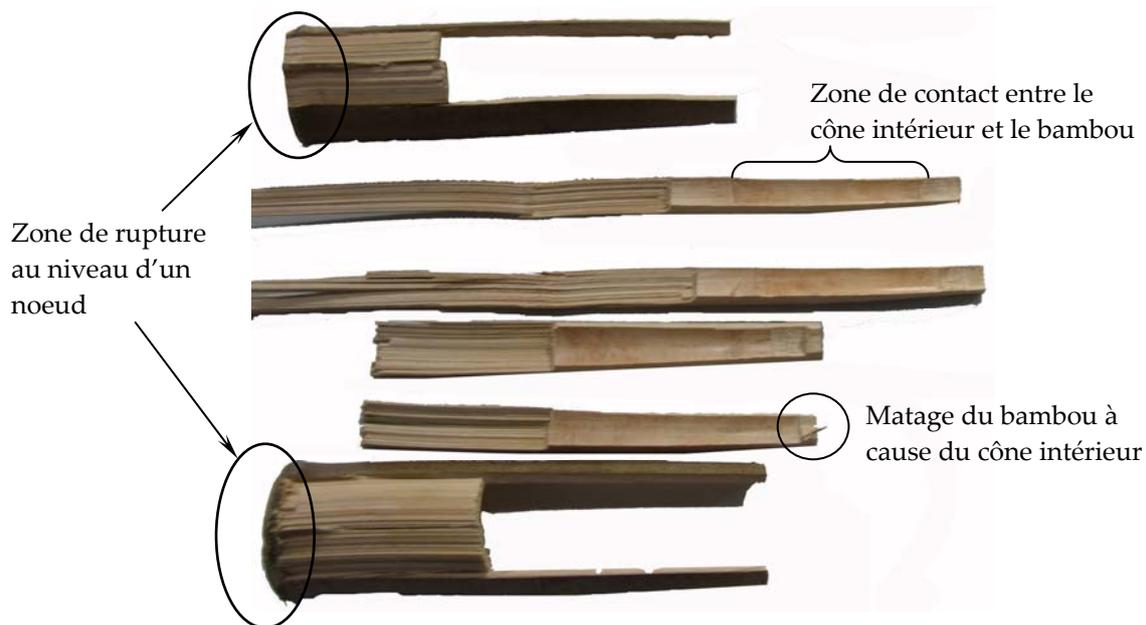


Figure 64 : Mode de rupture observé pour les chaumes de bambou assemblés avec un assemblage précontraint : la tige casse au niveau d'un nœud

4.5.2. Analyse de la raideur

La plupart des courbes de la figure 63 présentent des défauts puisque le glissement est négatif presque systématiquement au départ de la courbe. Ce phénomène s'explique par le fait que lorsque la charge est injectée dans le système, ce dernier s'aligne par rapport au vérin. Cette mise en place engendre peu de perturbations mais puisque la raideur initiale du système est importante (glissement

de l'assemblage faible), ces petites perturbations sont mesurées par les capteurs et provoquent une mesure de glissements négatifs au début du chargement.

Pour mesurer le plus proprement possible la raideur de l'assemblage, des phases de charge décharge sont réalisées. Cependant, la forme cylindrique des tiges de bambou rend difficile le positionnement des capteurs LVDT sur le système ce qui affecte la mesure de la déformée et donc celle de la raideur. Pour résoudre ce problème, un autre mode de mesure est utilisé pour une des deux extrémités du système bambou – assemblages pour les essais 5, 6, 7 et 8. Le système utilisé est un système de mesure par analyse d'images nommé VDM. Il consiste à suivre le déplacement de points (cibles de la figure 65). Cette technique permet de mesurer le déplacement relatif (et la rotation) de deux objets (ensemble de plusieurs cibles) les uns par rapport aux autres avec une grande précision ($1/20000^{\text{ème}}$ du champ de mesure de la caméra). Ainsi, le déplacement relatif de la tige filetée (et donc du cône intérieur) et du bambou peut être directement mesuré (déplacement relatif des objets 1 et 3 de la figure 65).

L'analyse d'images permet une mesure précise de la raideur de l'assemblage au niveau des phases de charge - décharge (Tableau 6). En moyenne, la raideur d'un assemblage précontraint est de 44 kN/mm. Cette valeur peut paraître faible pour des assemblages précontraints. Ceci s'explique par le fait que sur sa face intérieure, le chaume de bambou est peu résistant (peu de fibres comme l'indique la figure 28). Ainsi, lors des phases de recharges (courbe en pointillé © de la figure 62) le cône intérieur sollicite le bambou en compression transversale et en cisaillement sur sa face intérieure qui présente une résistance et un module faibles ce qui diminue la raideur du système.

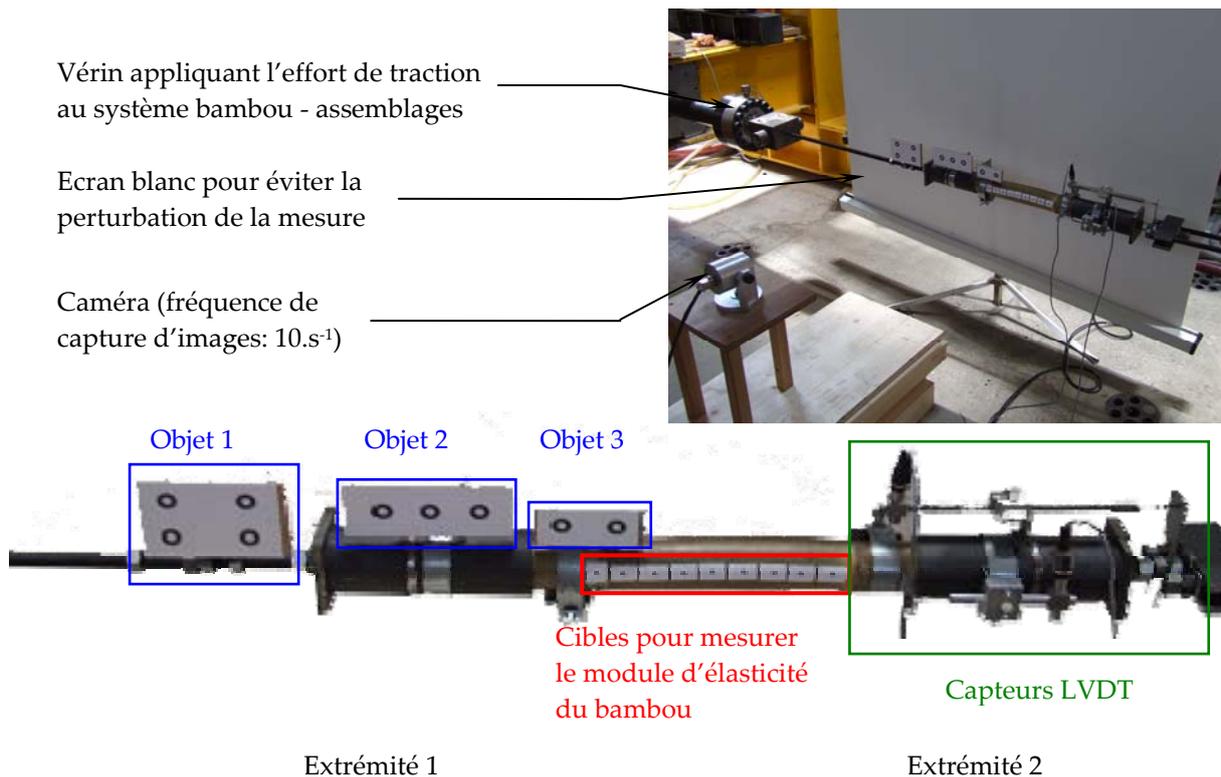


Figure 65 : Instrumentation d'un ensemble bambou - assemblages pour mesurer les glissements d'une des extrémités par analyse d'images et l'autre par les capteurs LVDT

4.5.3. Analyse plus fine du glissement des assemblages

Il est possible d'être plus précis dans l'analyse en mesurant de manière séparée le déplacement du cône intérieur et celui du cône extérieur par rapport au bambou. En moyenne le cône intérieur se déplace 18 fois plus que le cône extérieur. Ce dernier se déplace de moins d'un millimètre par rapport au bambou : son déplacement est donc négligeable dans le calcul du glissement de l'assemblage.

Ainsi, la grande disparité au niveau des valeurs des courbes donnant le comportement des assemblages précontraints observés sur la figure 63 s'explique principalement par la différence de l'angle d'adhérence entre l'acier du cône intérieur et la partie intérieure des chaumes de bambou.

4.5.4. Remarques supplémentaires sur les assemblages précontraints pour le bambou

Pour un bon fonctionnement du système, il est nécessaire d'usiner le bambou de telle manière à ce qu'il épouse le plus parfaitement possible la forme du cône intérieur. Ainsi, la phase d'usinage des entailles dans le bambou est primordiale. Le fait de réaliser huit entailles autour du chaume comme l'indique la figure 58 est la meilleure solution trouvée pour donner à la tige de bambou sa forme conique.

Pour utiliser 100% des capacités résistantes du bambou en traction, il est nécessaire de laisser au cône intérieur suffisamment de course pour que les phases de glissements successifs de ce dernier se fassent sans qu'il ne sorte du chaume. En effet, si le cône intérieur s'est trop déplacé et dépasse de la tige, la surface de contact entre le bambou et le cône diminue et l'assemblage n'est plus optimum. Ceci montre que la géométrie du système est un facteur important.

Le passage des efforts entre le cône intérieur et le bambou se fait de manière progressive. Au niveau d'un assemblage, au niveau du diamètre le plus gros du cône intérieur, 100% de l'effort de traction se situe dans le chaume de bambou. Le long du cône intérieur, l'effort passe progressivement du bambou vers le cône. A l'extrémité de ce dernier, 100% de l'effort de traction a transité vers l'assemblage. Ce passage progressif des efforts de tractions s'accompagne d'une densification progressive du matériau fibreux. En effet, à l'extrémité du chaume alors qu'il y a peu d'effort de traction, le bambou est le plus comprimé transversalement.

Les languettes de bambou formées lors de son usinage en forme de cône subissent une flexion pour être plaquées contre le cône intérieur. Cette flexion engendre des efforts de moment parasites qui ne semblent pas néfastes à l'assemblage pour un angle de 3°. Il serait nécessaire de vérifier si ce moment parasite n'est pas néfaste pour des angles plus importants.

Pour conclure, ce type d'assemblage permet bien d'appliquer de la précontrainte dans un matériau fibreux naturel. Aussi, contrairement à l'assemblage de Duff (1941) cité par Janssen [JAN 1981] et celui de Londono et Cheyne [LON 2005], ce n'est pas l'angle donné au bambou qui permet le transit des efforts mais le frottement entre les cônes et le bambou. Dans la configuration d'assemblage donnée ici c'est l'angle donné au chaume de bambou qui permet l'apparition d'un effort normal à la paroi du chaume permettant de mobiliser des efforts de frottement mais il est possible d'imaginer d'autres moyens.

Les assemblages précontraints présentent quatre principaux avantages par rapport aux autres assemblages pour le bambou. Tout d'abord, contrairement à la plupart des assemblages bambou, ils permettent de mobiliser 100% de la capacité résistante du matériau en traction longitudinale. Cette forte capacité résistante est couplée avec une raideur d'assemblage relativement importante. Le fait de précontraindre l'assemblage permet d'assurer la résistance du système. Enfin, une fois la charge de précontrainte dépassée, le système entre dans une phase de glissement par frottement permettant de dissiper de l'énergie lors d'une sollicitation de type sismique.

Contrairement au bois, le bambou a une forte résistance en compression transversale ce qui permet d'injecter des efforts de précontrainte importants

nécessaires au fonctionnement de l'assemblage. Du fait de sa faible résistance en compression transversale et de sa forme parallélépipédique, ce type d'assemblage ne peut pas s'appliquer directement au matériau bois.

5. APPLICATION DU PRINCIPE DE LA PRECONTRAINTE SUR DES AVIVES DE BOIS

Pour appliquer le principe des assemblages précontraints pour le bambou présentés aux paragraphes précédents sur du bois, il est nécessaire de trouver une solution pour augmenter la résistance de ce matériau en compression transversale sans altérer ses propriétés dans la direction longitudinale. Cette solution est recherchée dans les données bibliographiques. A partir de là, il est possible de trouver la géométrie donnée aux assemblages précontraints pour les avivés de bois et de les tester.

5.1. Augmentation de la résistance du bois en compression transversale : densification du matériau

Les propriétés mécaniques du bois étant fortement liées à sa masse volumique ([WAN 1950], [BOD 1982], [KOL 1968], [GIB 1997], [DIN 2000]), il est logique de penser que pour augmenter la résistance du bois en compression transversale, il suffit d'augmenter sa densité. Cette technique est connue dans la bibliographie sous le nom de densification transversale du bois. Cette méthode est utilisée depuis plus d'un siècle et au moment de la deuxième guerre mondiale, alors que le métal et le plastique devenaient rares, le bois densifié était utilisé comme matériau de substitution. D'après Blomberg [BLO 2006], il existe trois façons de densifier le bois : (a) par imprégnation en remplissant les lumens et les parois cellulaires avec une substance adéquate comme des polymères, des résines..., (b) par compression en réduisant la porosité du matériau bois par l'effondrement de sa structure interne et (c) par imprégnation et compression en combinant les deux méthodes (a) et (b). Dans la suite du document la densification transversale sera appelée par abus de langage densification.

La méthode retenue ici pour densifier le bois est la méthode (b) qui permet de ne pas injecter de produits dans le matériau bois et qui semble donc plus facile à mettre en œuvre et plus écologique. Le matériau ainsi formé possède des propriétés physiques et mécaniques différentes de celles du bois. Malgré le fait que le bois ne soit pas un matériau plastique au sens strict, le fait de le densifier par compression au-delà de sa limite élastique permet d'augmenter celle-ci (avec une diminution de son module élastique). Cette propriété paraît très intéressante pour injecter de la précontrainte dans le bois. La bibliographie montre qu'il existe quatre méthodes principales pour densifier le bois par compression.

La densification par compression à froid consiste à appliquer un effort de compression sur le matériau dans les conditions « normales » de température (autour de 20°C) et d'humidité. Perkitny et Jablonski [PER 1984] ont travaillé sur du Pin densifié à froid et ont montré qu'au-delà de 50% de densification, le bois voit ses propriétés en compression longitudinale et en flexion (et donc en traction longitudinale) diminuer.

La densification quasi-hydrostatique, étudiée par Blomberg [BLO 2006] consiste à appliquer sur le matériau de la pression sur cinq faces sur six d'une éprouvette parallélépipédique. Cette méthode est limitée à des échantillons de petite longueur. La pression appliquée est de 140 MPa et la température est autour de 20°C. La masse volumique du bois ainsi que ses propriétés mécaniques sont améliorées. L'avantage de comprimer le bois de manière quasi-isostatique est que le matériau est comprimé sans l'apparition de défauts majeurs (craquements, fentes...). Les deux méthodes décrites jusque là ne sont pas stables dimensionnellement surtout au contact de l'eau. La plupart des études visent à améliorer ce point.

La densification par traitement thermo-mécanique (TM) consiste à comprimer le bois sous haute température sans imprégnation. Des études montrent qu'il est possible d'améliorer la stabilisation du bois produit par ce procédé. Tabarsa et Chui [TAB 1997] ont travaillé sur l'effet de la densification thermo-mécanique sur de l'Epicéa (*Picea glauca*). La compression est réalisée dans le sens radial à des températures allant de 20°C à 200°C. Ils observent que la résistance à la flexion ainsi que le module d'élasticité du nouveau matériau formé (en considérant les nouvelles dimensions du bois après densification) augmentent généralement avec le niveau de compression et la température. Kultikova [KUL 1999] a travaillé sur du Pin et du Peuplier densifié à 200°C et 6,5% d'humidité relative (humidité du bois proche de 0%). Elle a réalisé des tests de traction à partir desquels une résistance ultime et un module d'élasticité sont calculés (Figure 66). L'auteur a comparé la résistance et le module d'élasticité d'éprouvettes à température ambiante et à 200°C non densifiées et d'éprouvettes densifiées à 200°C. Une augmentation de 13% de la résistance en traction et de 23% du module d'élasticité est observée pour une densification de 50% pour du Pin. Une augmentation de 23% pour la résistance en traction et de 32% du module d'élasticité pour du Peuplier est observée dans les mêmes conditions.

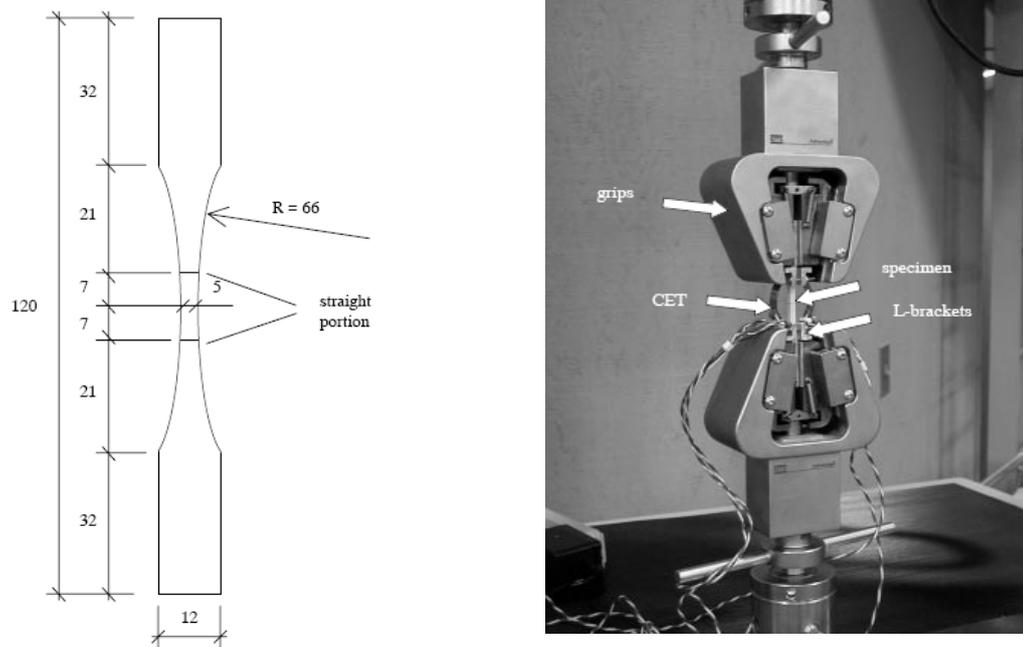


Figure 66 : Protocole expérimental utilisé par Kultikova [KUL 1999] pour tester la résistance du bois densifié en traction longitudinale

La densification par traitement thermo-hydro-mécanique (THM) consiste à comprimer le bois sous haute température et sous une atmosphère avec de la vapeur d'eau ce qui permet d'améliorer encore la stabilité du matériau. Navi et Girardet [NAV 2000] ont mesuré la résistance au cisaillement parallèle aux fibres du bois d'Épicéa et de Pin maritime avant et après densification par traitement THM. Ils observent une augmentation d'environ 1000% de ce paramètre. Kultikova [KUL 1999] a étudié la résistance en traction du bois densifié par traitement THM ainsi que son module d'élasticité. Ses études montrent que ces propriétés sont améliorées entre 42,5% et 55,5% suivant le traitement choisi.

Les méthodes de densification par traitement TM ou THM permettent d'augmenter la stabilité du matériau. Or en se basant sur le principe de précontrainte par blocage du matériau fibreux comme pour le bambou, si le bois dans l'assemblage précontraint gonfle au cours de son utilisation, cela ne peut qu'augmenter l'effort de précontrainte et donc ne peut être que bénéfique. Aussi, la solution de densification retenue est la compression à froid du bois. Aucune référence bibliographique sur de la densification à froid de bois d'Épicéa n'a été trouvée. Des essais avaient été réalisés à l'ENSTIB sur ce sujet dans les années 1985, mais n'avaient pas été publiés [TRI 1984]. Cependant, Perkitny et Jablonski [PER 1984] ont montré que cette action a des conséquences néfastes sur les propriétés mécaniques dans la direction longitudinale du Pin. Il sera donc nécessaire de faire une étude sur l'influence de la densification à froid du bois d'Épicéa sur sa résistance en traction longitudinale.

5.2. Principe et géométrie des assemblages testés

Au niveau de son comportement en compression transversale, le bois densifié se rapproche du comportement du bambou (limite élastique plus élevée) : il est donc possible de transférer le principe des assemblages précontraints du bambou vers le bois. Le principe de fonctionnement est le même que pour le bambou : le bois préalablement densifié est coincé entre une pièce métallique mobile qui reçoit l'effort axial et une pièce métallique fixe. Un angle est donné à l'assemblage pour injecter dans le bois des efforts de compression transversale et transmettre ainsi l'effort axial par frottement de la pièce métallique mobile à la surface en contact de l'avivé.

La première opération nécessaire est la densification le bois. Il est choisi de densifier le bois uniquement dans la zone d'assemblage et pour que la matière reste continue entre la zone d'assemblage et le reste de l'avivé de bois, la densification est progressive. Cette densification progressive est faite par l'application d'un gradient de contrainte permettant le passage d'un taux de densification de 0% à plus de 75% le long de la partie de bois assemblée. Le procédé utilisé pour réaliser ce gradient de densification est présenté sur la figure 67.

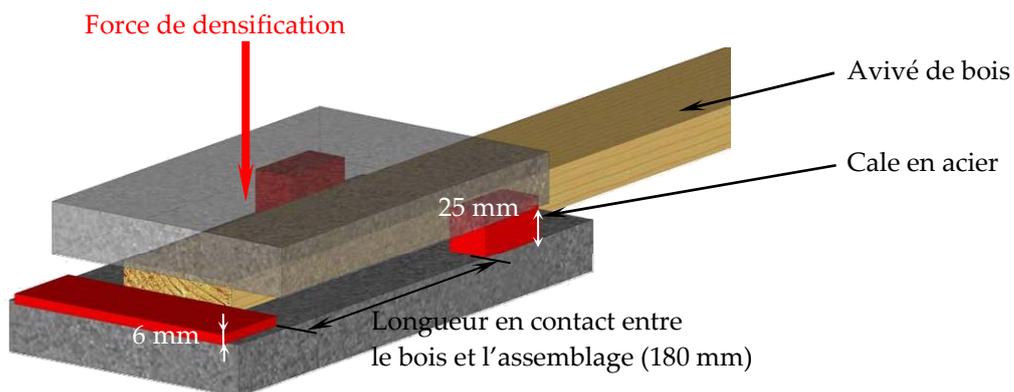
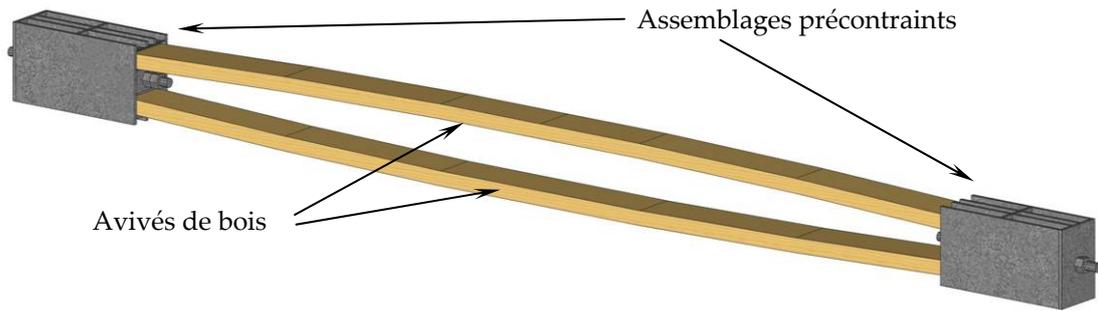
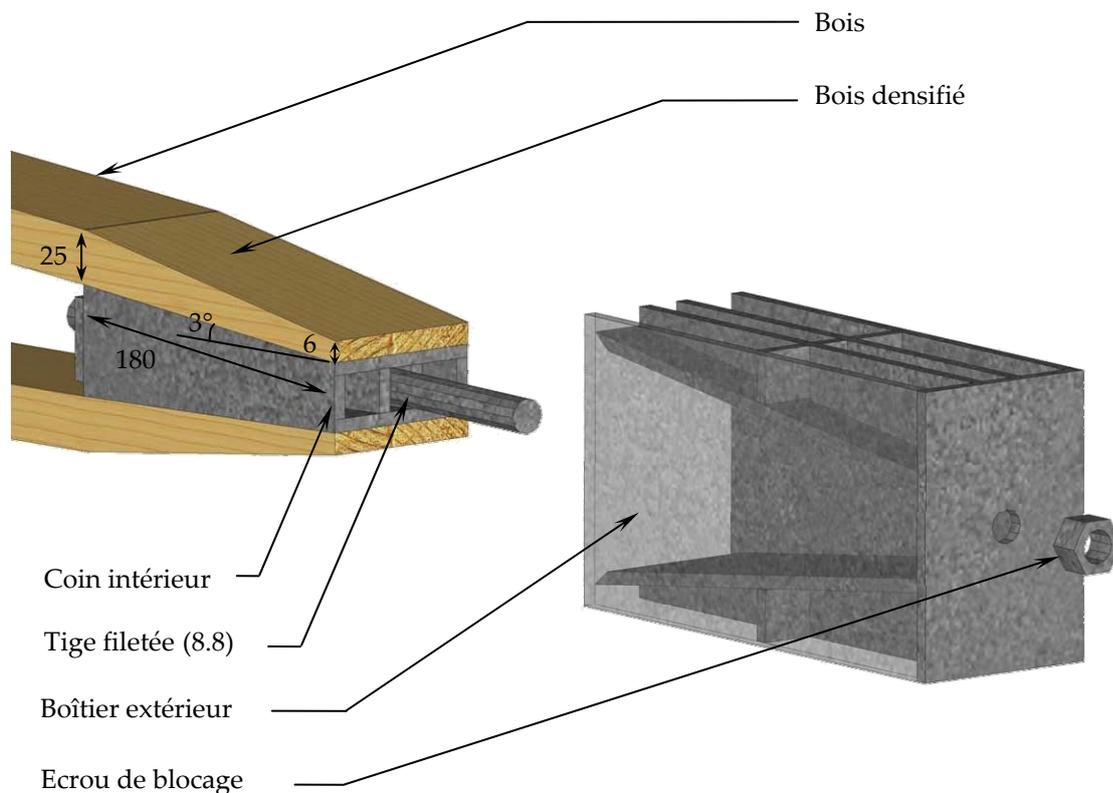


Figure 67 : Montage utilisé pour densifier de manière progressive un avivé de bois avant sa mise en place dans un assemblage précontraint

Le passage d'un assemblage de forme cylindrique pour un chaume de bambou à une forme linéaire pour un avivé de bois nécessite quelques modifications. Tout d'abord, le cône intérieur du bambou est remplacé par un coin qui possède deux surfaces en contact avec deux avivés de bois. Le cône extérieur de l'assemblage pour le bambou est remplacé par un boîtier. L'ensemble avivé – assemblages précontraints est donc constitué de deux avivés de bois aux extrémités densifiées et précontraintes et d'un coin intérieur entouré d'un boîtier. Pour tester cet assemblage, la configuration retenue est proche de celle utilisée pour tester les assemblages cylindriques pour les bambous : les deux avivés sont munis d'un assemblage précontraint à chacune de leur extrémité comme le montre la figure 68. L'ensemble est testé en traction axiale (parallèle à la direction longitudinale des avivés).



Vue de l'ensemble avivés de bois – assemblages précontraints



Vue éclatée d'un assemblage précontraint pour deux avivés de bois (données en mm)

Figure 68 : Présentation des assemblages précontraints appliqués à deux avivés de bois

Pour les assemblages testés, la longueur de contact entre le coin intérieur et le bois est de 180 mm, la largeur du coin intérieur est de 75 mm et l'angle que forme le coin intérieur avec l'horizontale est de 3° (Plan en Annexe 2). La hauteur des avivés de bois est de 25 mm et après densification, la hauteur minimum est de 6 mm. La largeur et la longueur des avivés varient selon les essais réalisés.

Dans la conception des assemblages précontraints présentés sur la figure 68, les avivés de bois sortant d'un assemblage présentent une courbure importante. Cette courbure introduit dans le matériau des efforts de moment fléchissant parasites.

Cette forme d'assemblage n'est donc pas optimale mais permet d'appliquer le même principe d'assemblages précontraints utilisés pour le bambou au matériau bois en limitant le nombre de pièces en mouvement. Des essais de caractérisation de ces assemblages précontraints linéaires ont été réalisés et sont présentés et analysés dans les paragraphes suivants.

5.3. Description d'un essai « type » d'un assemblage précontraint pour le bois

Le dispositif expérimental pour tester les assemblages précontraints linéaires est le même que celui adopté pour les chaumes de bambou. Le système constitué des deux avivés et des deux assemblages précontraints est chargé axialement par un vérin horizontal à une de ses extrémités et est maintenu à l'autre (Figure 69). La mesure de la force appliquée au système est réalisée par une cellule de charge dans le vérin. Le glissement du système est mesuré par trois capteurs LVDT à chacune des extrémités du système. A chaque extrémité, un capteur mesure le déplacement du coin intérieur et du boîtier extérieur et deux capteurs mesurent le déplacement relatif du boîtier et des avivés.

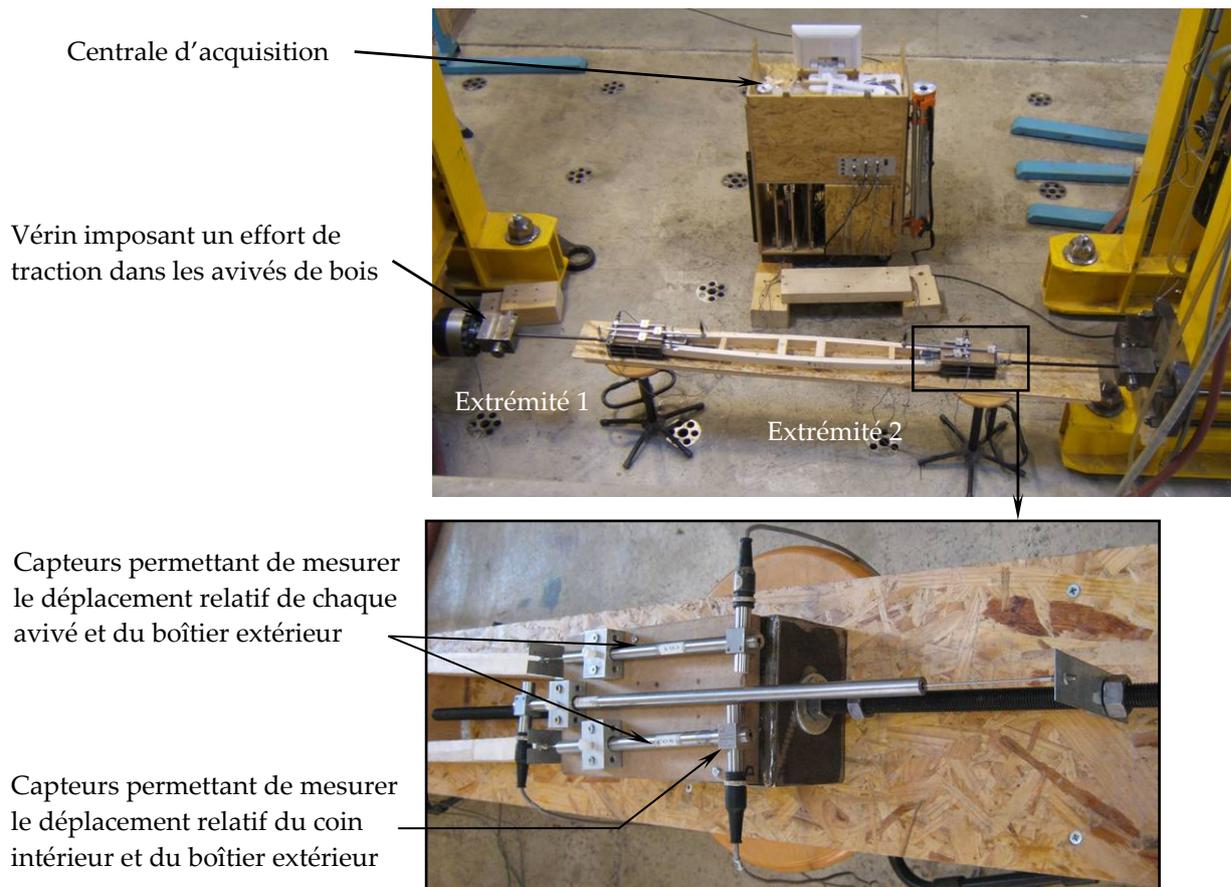


Figure 69 : Dispositif expérimental pour tester l'assemblage précontraint appliqué à deux avivés de bois

La courbure imposée aux avivés de bois rend la mesure de la contrainte dans le matériau fibreux difficile. Pour comparer les essais entre eux, cette courbure est négligée et la contrainte de traction dans les avivés est calculée directement par le rapport entre la force imposée par le vérin et la section des avivés. Pour chaque assemblage, le glissement est calculé en soustrayant le déplacement relatif du coin intérieur et du boîtier extérieur à la moyenne du déplacement relatif des avivés et du boîtier extérieur. Ainsi, il est possible de tracer la loi de comportement de chaque assemblage c'est-à-dire la courbe contrainte – glissement. Comme pour le bambou, une courbe caractéristique est prise comme base pour expliquer la phénoménologie mise en œuvre lors de la mise en place des assemblages précontraints pour les avivés de bois. L'exemple de base est présenté sur la figure 70 où chaque extrémité correspond à un assemblage. Tout comme pour le bambou, le chargement s'effectue en quatre étapes :

- **Etape 1** : mise en place de la précontrainte du système par application d'un effort de traction axiale jusqu'à ce que la charge atteigne 25 kN (10 MPa),
- **Etape 2** : la précontrainte est maintenue par l'intermédiaire de l'écrou de blocage défini sur la figure 68,
- **Etape 3** : le système est déchargé,
- **Etape 4** : le système est rechargé jusqu'à rupture.

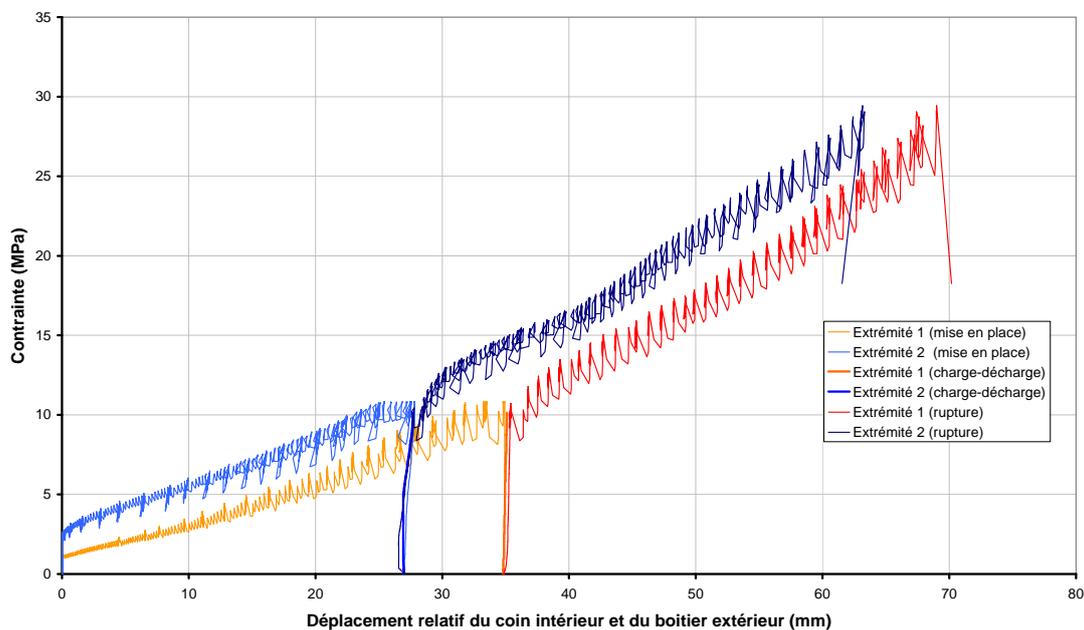


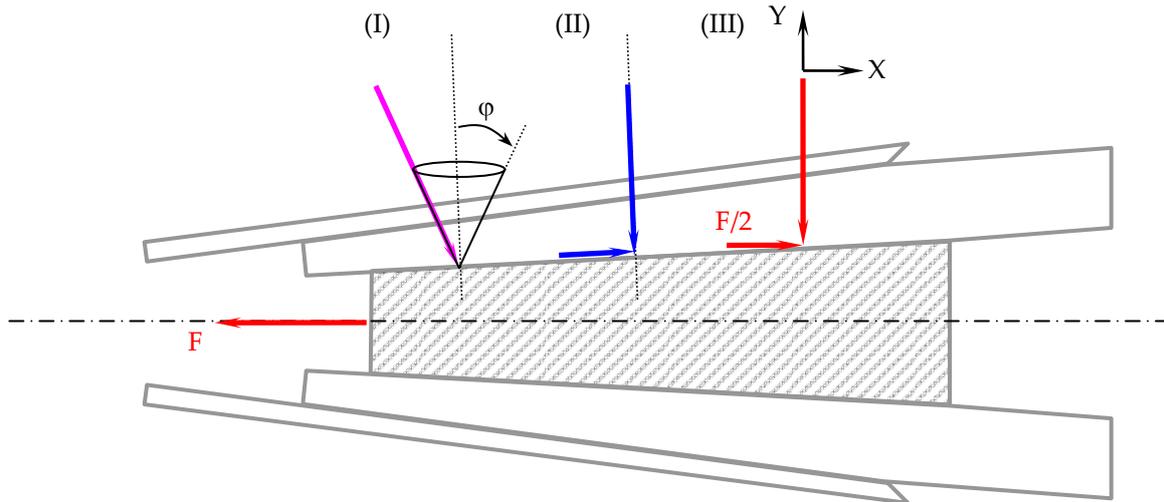
Figure 70 : Comportement d'un assemblage précontraint pour deux avivés de bois

Lors de la mise en place de l'assemblage, le bois est coincé entre le coin intérieur et le boîtier extérieur. Un effort de précontrainte manuel est injecté dans le système en serrant manuellement l'écrou de blocage. Aussi, dans l'étape 1, les premiers glissements apparaissent une fois que cet effort de précontrainte est dépassé (cet effort conduit à une contrainte d'environ 2 MPa). Cette succession de glissements

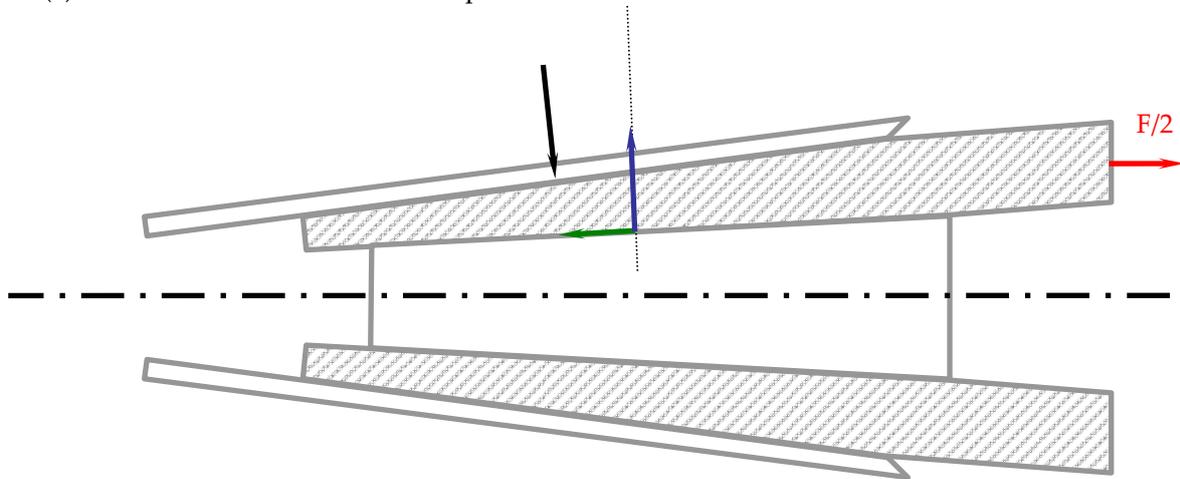
s'explique par le fait que le coin intérieur se déplace en écrasant le bois qui l'entoure. Pour un effort engendrant une contrainte de 10 MPa, le chargement est stoppé, les écrous de blocages serrés (étape 2) et le système est déchargé (étape 3). Lors de la recharge du système, il n'y a pas de glissement jusqu'à ce que le chargement génère à nouveau une contrainte de 10 MPa. La raideur obtenue est relativement élevée et dépend de l'essai considéré. Une fois ce niveau de chargement atteint, le système subit à nouveau des phases de glissement et de recharge jusqu'à rupture.

Pour comprendre le passage des efforts entre les différents éléments qui constituent l'assemblage précontraint, il est possible d'isoler les trois parties principales de cet ensemble : le coin intérieur (Figure 71 (a)), les avivés de bois (Figure 71 (b)) et le boîtier extérieur (Figure 71 (c)). Pour alléger ces figures, les efforts ne sont représentés que sur une moitié d'assemblage. Sur la figure 71 (a), l'effort de traction injecté dans le coin intérieur (noté F) est équilibré par les efforts de frottement entre le coin et les avivés de bois. Sur la figure 71 (a) (I), cet effort de frottement est représenté à l'instant juste avant le glissement du coin intérieur : cet effort se trouve donc à la frontière du cône de frottement d'angle φ . La figure 71 (a) (II) représente la décomposition de cet effort de frottement sur un plan orthotrope dont un des axes est normal à la surface entre le coin intérieur et un avivé de bois. Enfin, figure 71 (a) (III), montre la décomposition de cet effort de frottement dans le plan principal (O,X,Y) : dans ce cas, la résultante de la composante horizontale à chaque interface s'élève à la moitié de l'effort F .

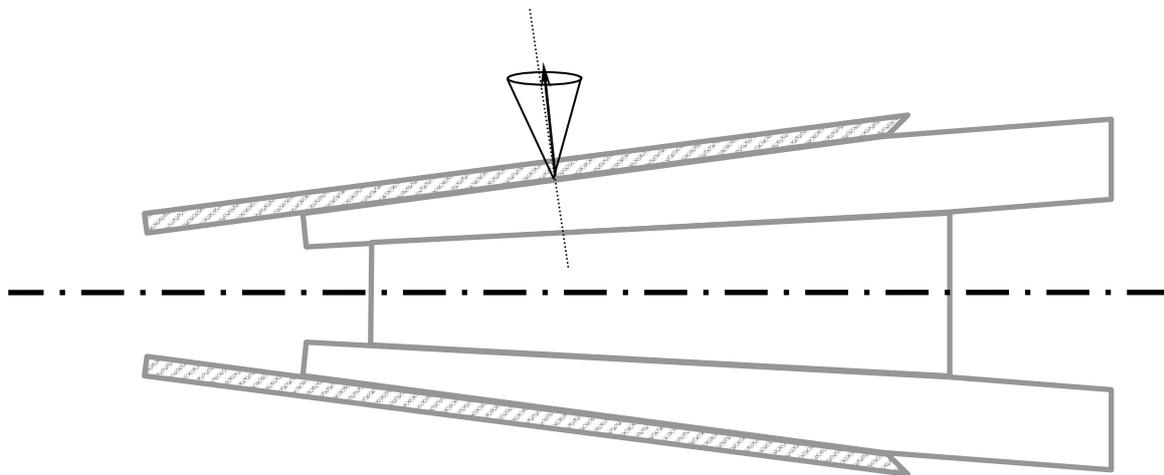
La figure 71 (b) représente l'équilibre des efforts dans un des avivés de bois. Ce dernier est sollicité par la force de réaction horizontale $F/2$, l'effort de frottement (décomposée dans le plan dont un des axes est normal à la surface entre cet avivé et le coin intérieur) et un effort de compression injecté par le boîtier extérieur. Cet effort est permis puisqu'il ne sort pas du cône de frottement entre le bois et le boîtier (Figure 71 (c)).



(a) Effort dans le coin intérieur lorsque ce dernier est isolé



(b) Effort dans les avivés de bois lorsque ces derniers sont isolés



(c) Effort dans le boîtier extérieur lorsque ce dernier est isolé

Figure 71 : Equilibre des efforts dans un assemblage précontraint pour les avivés de bois à l'instant juste avant glissement du coin intérieur

Ces figures montrent que le frottement entre le coin intérieur et les avivés de bois permet le passage d'un effort de traction axiale bien plus important que ne le permet l'angle de 3° de l'assemblage. Tant que l'angle de la réaction d'appui ne sort pas du cône de frottement, l'effort de traction axiale peut transiter du coin vers le bois. Lorsque cet effort de traction est trop important, l'effort de traction axiale sort du cône de frottement et il y a glissement.

5.4. Résultats obtenus lors des essais sur les assemblages précontraints pour le bois

Neuf essais ont été réalisés pour caractériser les assemblages linéaires pour deux avivés d'Epicéa. Les caractéristiques géométriques, la force et la contrainte à rupture, l'endroit où la rupture a eu lieu et la raideur pour chaque ensemble testé sont reportés dans le tableau 7.

N° essai	N° Epr.	ρ (kg/m ³)	Section (mm ²)	Longueur (mm)	F_{rupt} (kN)	σ_{rupt} (MPa)	Raideur (kN/mm)	Localisation rupture
1	E1	485	75x25x2	1500	140,92	37,58	46,1	Acier
2					151,62	40,43	45,5	Acier
3	E2	366,2	51x25x2	1500	29,71	11,65	19,6	Bois
4	E3	482,5	51x25x2	1700	20,09	7,87	-	Bois
5	E4	512,9	51x25x2	1700	40,70	15,96	-	Bois
6	E5	375,1	50x20x2	1500	-	-	-	Sortie du coin intérieur
7	E6	404,0	75x25x2	2250	36,70	9,80	48,1	Bois
8	E7	505,1	75x25x2	2250	141,71	37,79	98,0	Acier
9	E8	380,3	75x25x2	2250	68,54	18,28	16,95	Bois
10	F9	362,3	50x25x2	1500	100,11	40,04	39,0	Acier

Tableau 7 : Résultats obtenus pour les différents essais sur les assemblages précontraints pour le bois d'Epicéa

(N° Epr : numéro des avivés testés, F_{rupt} : force à rupture, σ_{rupt} : contrainte à rupture)

Deux types de bois sont testés : de l'Epicéa (essais 1 à 9) et du Frêne (essai 10).

Les essais 1 et 2 sont réalisés avec la même éprouvette. L'essai 1 est un essai de mise en place de la précontrainte dans l'ensemble avivés – assemblages précontraints n°1. Cet essai est arrêté à 140,92 kN car au-delà, les tiges en acier (acier haute résistance 10.9) plastifient. L'ensemble est alors conservé dans un environnement couvert avec une température et une humidité plus ou moins stables (variation de la température entre 19 et 23°C et de l'humidité relative de l'air entre 55 et 65%) pendant 14 mois. Après ce laps de temps, l'éprouvette 1 est à nouveau testée jusqu'à rupture des tiges. La figure 72 compare les lois de comportement du système lors de sa mise en place (essai 1) et après la mise en place (essai 2).

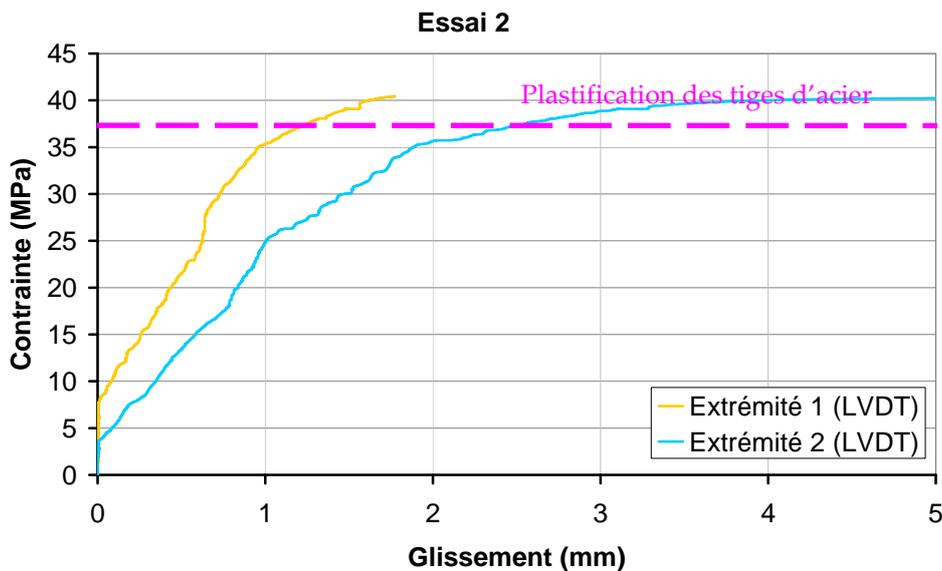
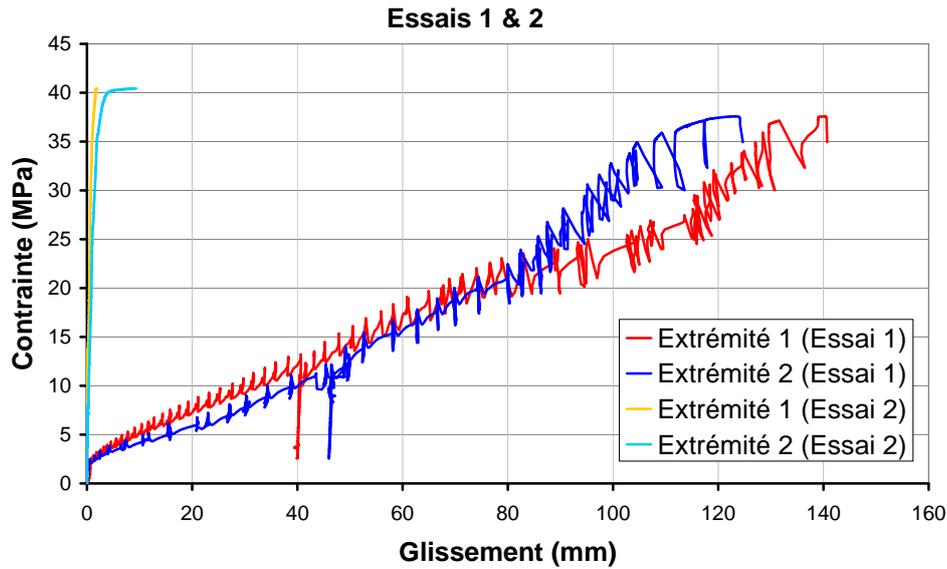


Figure 72 : Comparaison du comportement de l'éprouvette n°1 avant et après précontrainte avec un écart de temps de 14 mois

Le comportement de l'éprouvette 1 lors de la mise en place de la précontrainte et celui lors de son fonctionnement sont profondément différents. Dans le premier cas, il y a glissements successifs du coin intérieur qui se matérialise sur les courbes par un glissement du système important (140 mm) et des phases successives de charges - décharges. Autour de 40 MPa, le système est chargé puis déchargé ce qui permet de mesurer sa raideur qui est de l'ordre de 46 kN/mm. Lors de l'essai 2, le système est précontraint ce qui se matérialise par un déplacement faible : inférieur à 2 mm pour une contrainte de traction proche de 40 MPa dans les avivés de bois soit une raideur de 45,5 kN/mm. Ainsi, même après plusieurs mois sans charge, le système est capable de maintenir la précontrainte dans les avivés de bois.

Les essais 3, 4, 5 et 9 sont des essais de mise en place de la précontrainte jusqu'à rupture dans le système par chargement en traction conformément au protocole expérimental décrit ci-dessus. Pour ces quatre essais, la rupture se produit au même endroit : au niveau du bois, en dehors de la zone d'assemblage. Leur comportement est présenté sur la figure 73.

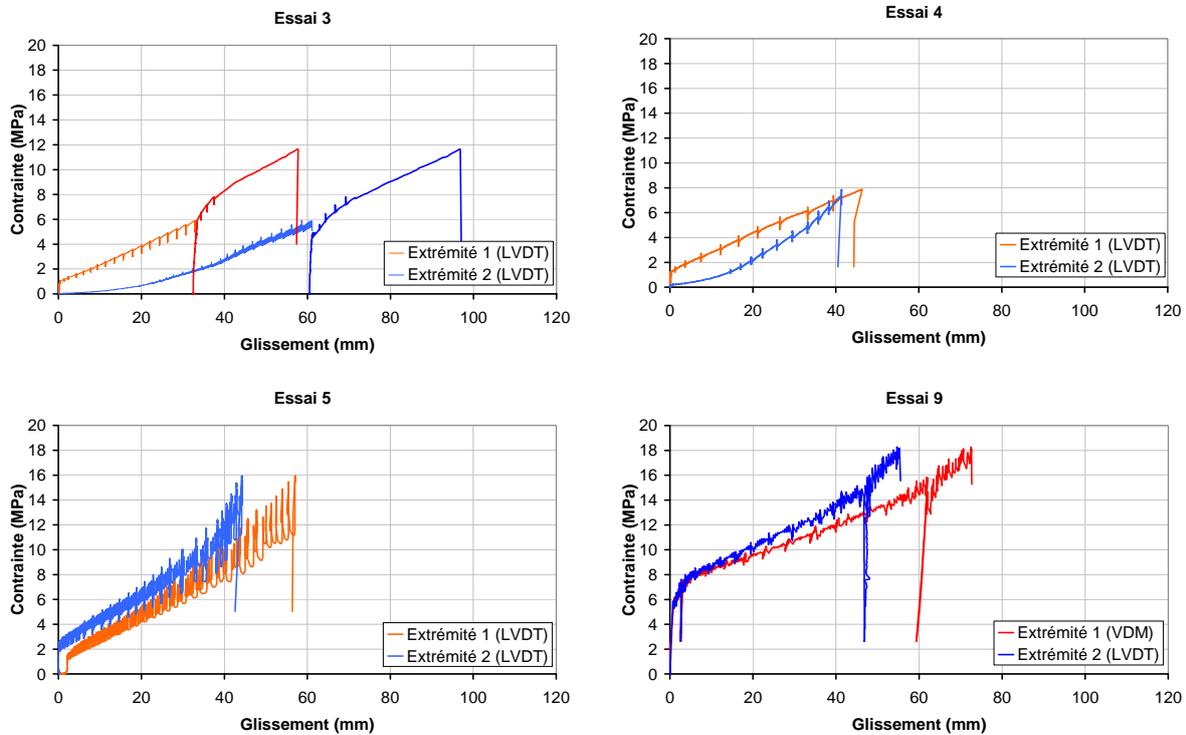


Figure 73 : Comportement des assemblages précontraints ayant tous le même mode de rupture : rupture fragile du bois en dehors de la zone d'assemblage

L'essai 8 est quant à lui à rapprocher de l'essai 1 puisqu'il a été interrompu avant plastification de la tige en acier (Figure 74).

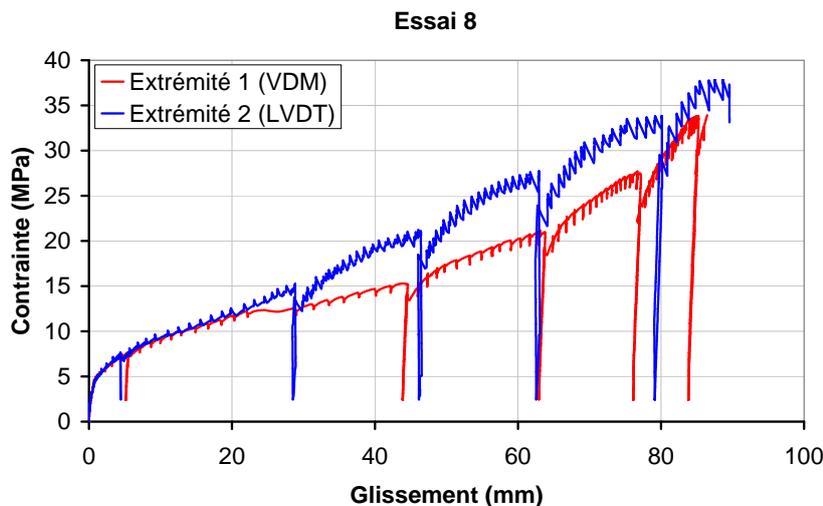


Figure 74 : Comportement de l'assemblage précontraint n°8 (plastification de la tige en acier)

Pour l'essai 6, les avivés ont une épaisseur de 20 mm au lieu de 25 pour les autres. Dans ce cas, le coin intérieur glisse sans densifier suffisamment le bois pour permettre la transmission des efforts de traction par frottement. Cet essai permet d'illustrer l'importance capitale de la géométrie initiale du système.

L'essai 7 a été réalisé avec un protocole particulier. En effet, jusqu'à présent, la phase de mise en place de la précontrainte dans les assemblages est réalisée en même temps que la sollicitation du système en traction longitudinale (avivés sollicités dans la direction axiale). Le fait de solliciter les avivés en traction longitudinale lors de la phase de mise en place de la précontrainte dans les assemblages, conduit inévitablement à l'apparition de phases de charges – décharges qui font subir aux avivés des à-coups importants pouvant provoquer leur rupture prématurée. Afin d'éviter ce phénomène, il est préférable de précontraindre les assemblages sans injecter d'efforts de traction longitudinaux dans les avivés. Pour se faire, il serait nécessaire d'utiliser des vérins creux, fréquemment utilisés pour précontraindre des assemblages métalliques. Pour l'essai 7, le protocole décrit sur la figure 75 est utilisé. Avec ce procédé, lors de l'injection de la précontrainte, les avivés de bois sont sollicités uniquement en compression transversale, l'effort de traction étant repris par le bloc rigide (en rouge sur la figure 75), puis par le bâti sur lequel est fixé le vérin.

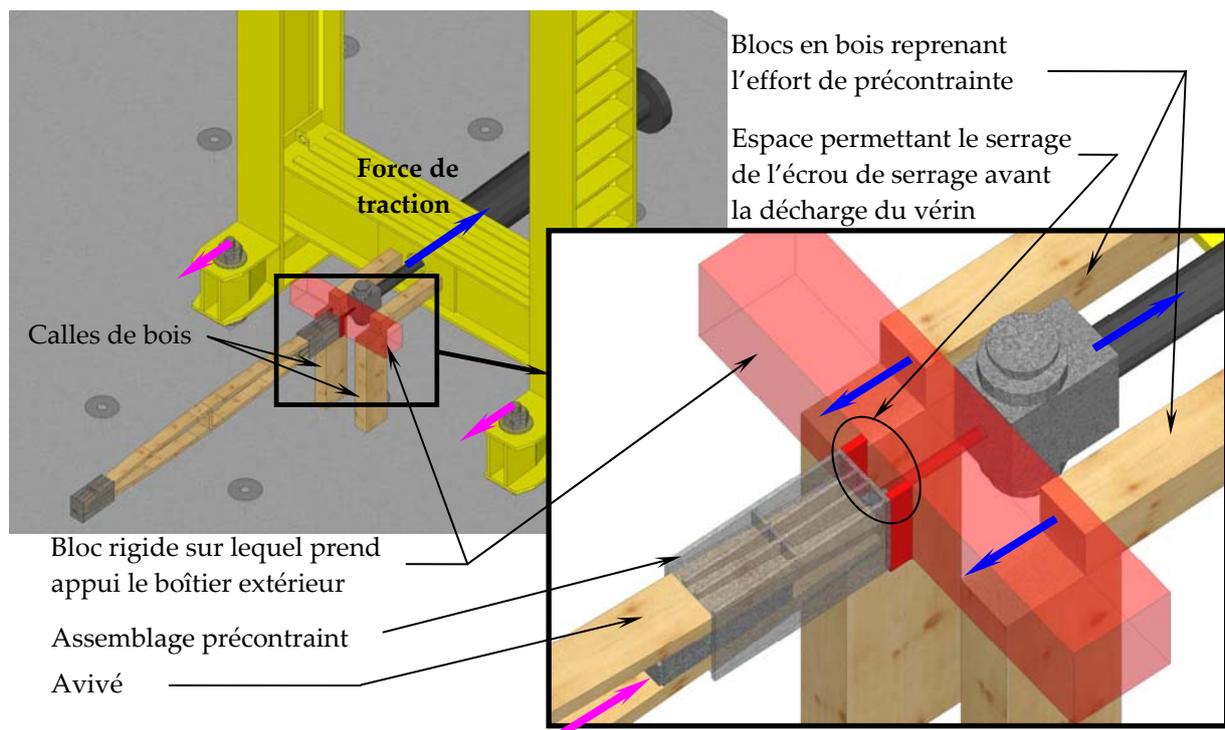


Figure 75 : Montage permettant de précontraindre l'assemblage sans injecter d'effort de traction longitudinale dans les avivés de bois

Chacun des deux assemblages est précontraint à 50 kN puis l'ensemble est testé en traction longitudinale. Un des deux avivés présentait un nœud important ce qui a provoqué la ruine prématurée de l'ensemble à 37 kN. Néanmoins, la seconde courbe de la figure 76 montre que pour arriver à cette valeur, le coin intérieur ne subit pas de

phase de charge – décharge ce qui prouve que la précontrainte appliquée est suffisante pour atteindre 40 kN sans glissement. Ces deux phases distinctes de précontrainte puis de test permettent d'assurer non seulement une rigidité initiale des assemblages relativement importante et une valeur de résistance garantie.

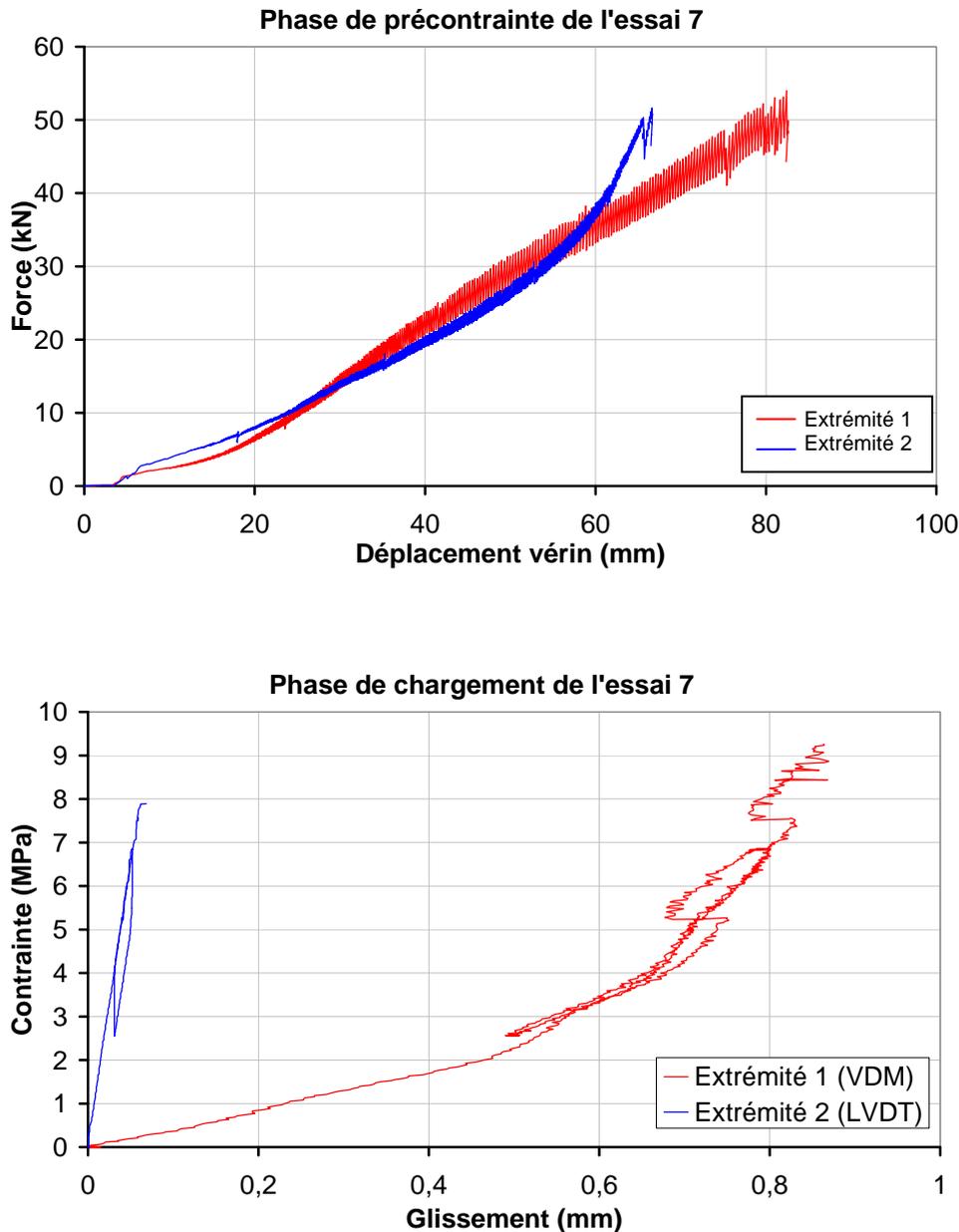


Figure 76 : Précontrainte et chargement de l'ensemble avivés – assemblages précontraints de l'essai 7

L'essai 9, enfin, est réalisé à partir de deux avivés en Frêne. Tout comme les essais 1, 2 et 8, la rupture a lieu au niveau de la tige en acier (Figure 77). Dans la suite de l'analyse, cet essai n'est pas pris en compte.

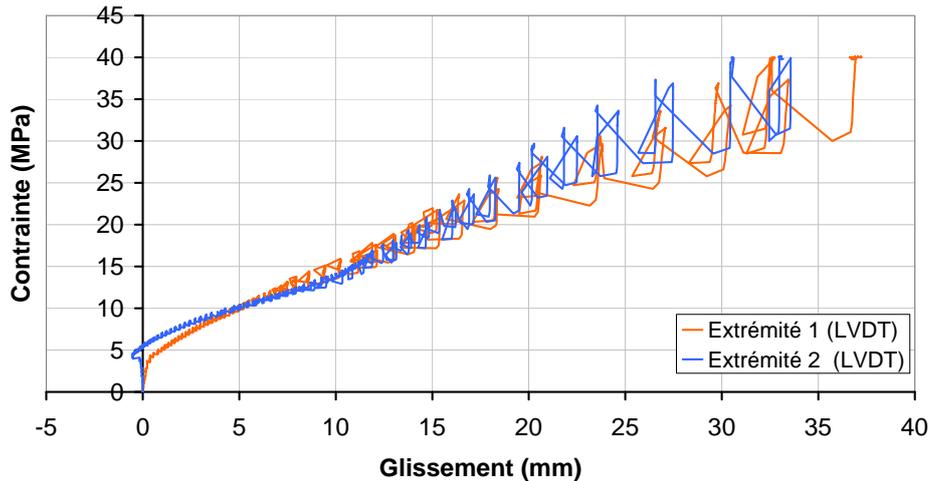


Figure 77 : Comportement d'un ensemble assemblages précontraints – deux avivés de Frêne lors de la phase de mise en place de la précontrainte

5.5. Analyse des résultats obtenus

5.5.1. Analyse de la phase de densification

La phase de densification nécessite d'injecter aux avivés d'importants efforts de compression. Le fait que la densification se fasse de manière progressive est permis par les cales situées en arrière du montage de la figure 67 qui servent de rotule à la plaque métallique supérieure et au fait que la position du vérin soit excentrée. La figure 78 représente la force injectée par le vérin sur quatre avivés lors de leur compression en fonction du déplacement du vérin. L'allure générale de ces courbes s'apparente à l'allure du comportement du bois lors de sa compression transversale (Figure 15) et montre que les avivés sont sollicités en compression largement au-delà du plateau de densification.

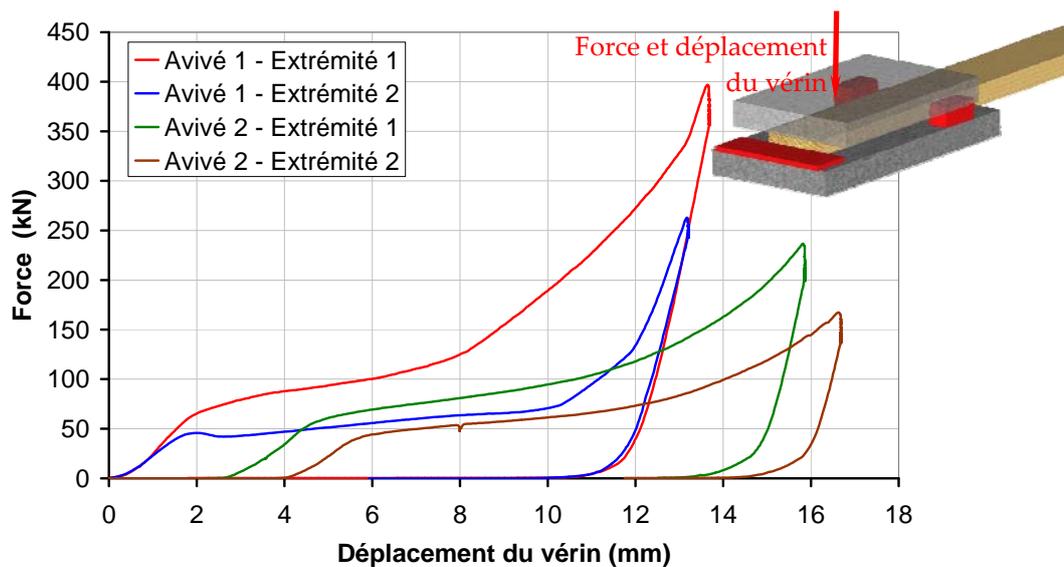


Figure 78 : Comportement des avivés de bois constituant l'éprouvette de l'essai 7 lors de sa phase de densification

5.5.2. Analyse de la rupture

Deux modes de ruptures ont été observés lors des essais réalisés : un mode de rupture en traction des tiges filetées et un mode de rupture du bois en dehors de l'assemblage.

La rupture au niveau du bois se situe en dehors de la zone d'assemblage juste à la sortie du boîtier extérieur (Figure 79). La rupture pour les essais 3, 4, 5 et 9 apparaît de manière prématurée si seule la contrainte de traction longitudinale est considérée dans les avivés. Ainsi, il existe un effort parasite qui provoque la ruine prématurée des assemblages précontraints bois. Pour déterminer la cause de ces efforts parasites et les quantifier, il sera nécessaire de modéliser la phase de mise en place et de traction de l'ensemble avivés – assemblages précontraints.



Figure 79 : Ensemble avivés – assemblages précontraints ayant subit une rupture dans un de ses avivés

Ces efforts parasites sont également présents pour les essais 1, 2 et 8, mais comme les bois utilisés sont de meilleure qualité (absence de défauts et masse volumique plus élevée), le matériau est suffisamment résistant pour ne pas subir de ruine avant la tige métallique.

Pour comprendre, la ruine prématurée apparue pour l'essai 6, il est nécessaire de dessiner les assemblages avant leur mise en place (Figure 80). Le cas (a) de la

figure 80 représente la majorité des cas c'est-à-dire lorsque la hauteur des avivés fait 25 mm. Après une densification maximale de 76%, l'extrémité de l'avivé passe de 25 à 6 mm (Figure 67), mais après suppression de la charge de densification, la matière gonfle et passe à 11 mm. Dans le cas des avivés de 20 mm de haut, (cas (b) de la Figure 80), la hauteur finale après densification est de 6 mm soit un taux de densification de 70% et la hauteur des avivés après la suppression de la charge est de 8 mm.

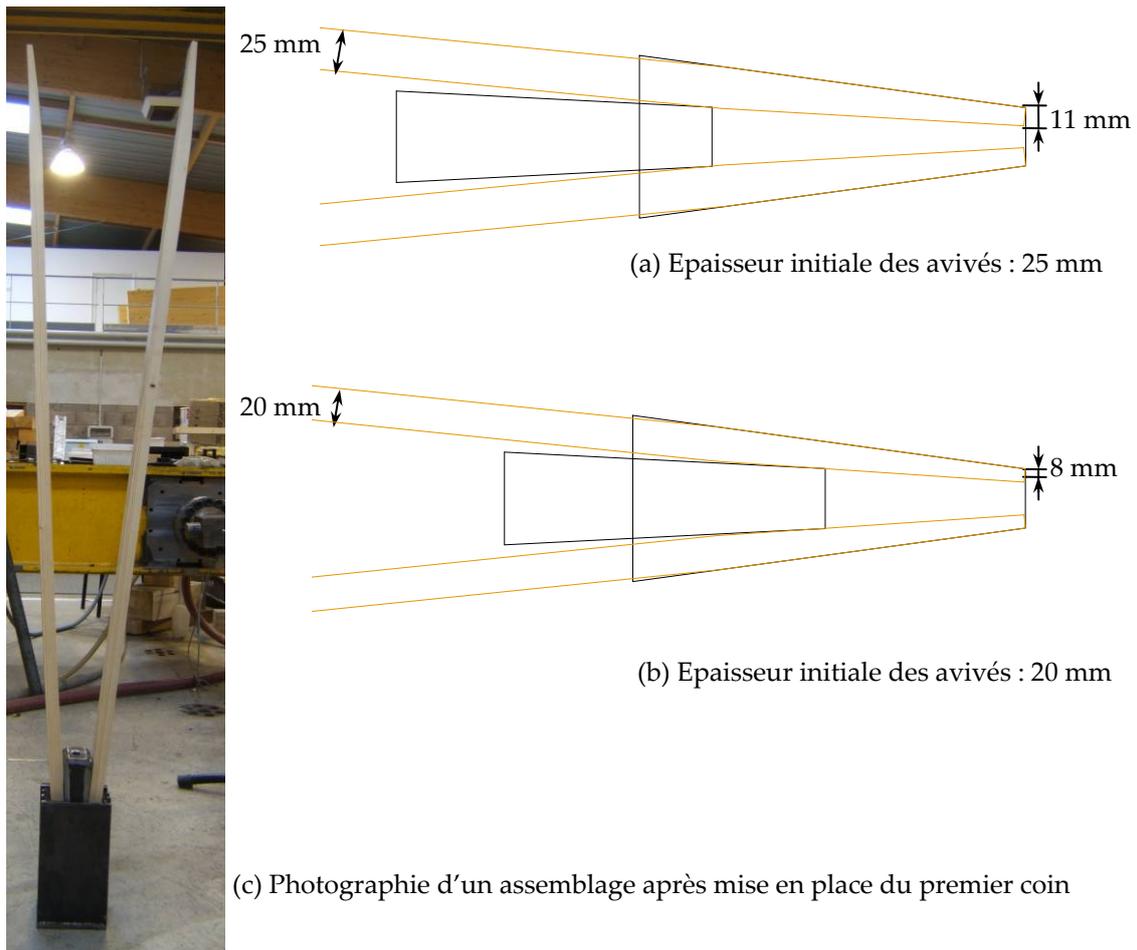


Figure 80 : Assemblages précontraints lors de la mise en place du premier coin :

(a) Essais 1 à 5 et 7 à 9

(b) Essai 6

Dans le cas général (a), le coin intérieur peut se déplacer de 185 mm avant d'atteindre l'extrémité du boîtier. Avant qu'il se déplace entièrement, il injecte dans les avivés des efforts de compression transversale importants permettant le passage des efforts de traction dans la direction longitudinale par frottement. Dans le cas (b), le coin intérieur ne peut se déplacer que de 115 mm ce qui ne permet pas avec un angle de 3° d'injecter un effort de compression transversale suffisant pour faire transiter l'effort de traction par frottement.

5.5.3. Analyse de la raideur et des déplacements

Tout comme pour les assemblages avec des tiges de bambou, une des extrémités de certains essais a été instrumentée pour mesurer leur glissement par analyse d'images : il s'agit des essais 7, 8 et 9. Les cibles et les objets pris en compte dans ce cas sont représentés sur la figure 81. Le glissement de l'assemblage correspond au déplacement relatif de l'objet 1 par rapport à l'objet 3. Ce mode de mesure plus précis permet de montrer que l'imprécision des capteurs LVDT dans ce cas est négligeable.

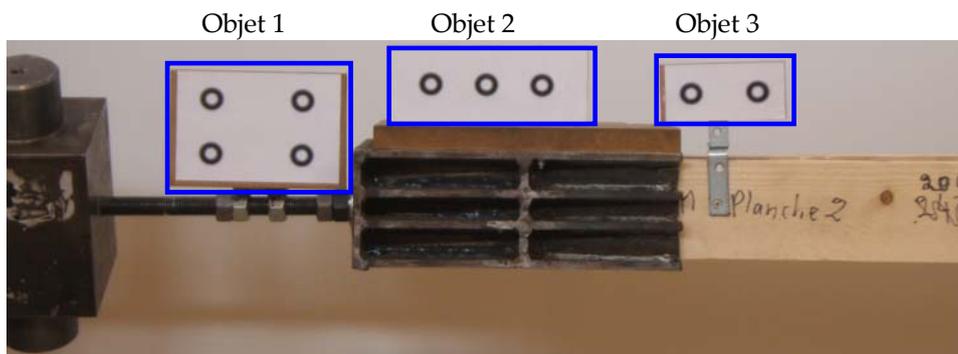


Figure 81 : Instrumentation par analyse d'images d'un assemblage précontraint pour deux avivés de bois

La mesure de la raideur montre une grande disparité suivant la qualité du bois utilisé : pour les essais 3 et 9 qui ont une masse volumique relativement faible de l'ordre de 370 kg/m^3 , la raideur mesurée est basse (18 kN/mm), pour les essais 1, 2 et 7 la masse volumique du bois est plus élevée (450 kg/m^3) ainsi que la raideur des assemblages (46 kN/mm) enfin l'essai 8 est réalisé avec des avivés de bois ayant une masse volumique encore plus élevée (505 kg/m^3) et la raideur pour cet essai est encore plus élevée (98 kN/mm). Lors du fonctionnement normal de l'assemblage (après la phase de précontrainte), le bois est sollicité en traction longitudinale et en compression transversale. Si le module dans cette dernière direction est faible alors le cône intérieur subit un déplacement plus important qui détériore la raideur de l'assemblage. Ce module est lié à la masse volumique du bois ce qui peut expliquer ce résultat.

Tout comme pour les assemblages précontraints appliqués aux chaumes de bambou, il est possible pour les avivés de bois de comparer le déplacement relatif du coin intérieur et du bois par rapport au déplacement relatif du boîtier extérieur et du bois. Lors de la phase de précontrainte, le coin intérieur se déplace en moyenne 200 fois plus que le boîtier extérieur (par rapport aux avivés) ; le boîtier extérieur ne se déplace pas plus que de 4 mm au cours de la mise en place de la précontrainte dans les assemblages. Outre les explications liées aux différences de propriétés mécaniques, les écarts de comportement entre deux essais s'expliquent par la différence de coefficient de frottement entre le bois et le coin extérieur.

6. CONCLUSION SUR LES ASSEMBLAGES PRECONTRAINS

En résonnant sur un matériau naturel fibreux résistant en compression transversale comme le bambou, il a été possible d'imaginer le moyen d'introduire de la précontrainte au niveau d'un assemblage pour un autre type de matériau fibreux naturel comme le bois. Dans ce chapitre, ce procédé est matérialisé par deux assemblages simples avec peu de pièces en mouvement. Ces assemblages montrent que ce soit pour les chaumes de bambou ou les avivés de bois que ce procédé permet d'avoir des assemblages avec une forte raideur initiale sans glissement, de garantir une résistance de l'ensemble matériau fibreux – assemblages, de permettre une dissipation de l'énergie plastique au-delà de ce seuil et permet de monopoliser toute ou une grande partie de la capacité résistante en traction longitudinale de ces matériaux. Pour le bois, il y a apparition d'efforts parasites qui provoquent la ruine prématurée des avivés. Il est nécessaire pour aller plus en avant de comprendre le fonctionnement de ces assemblages et donc de les modéliser.

Il est choisi de réaliser cette simulation par la méthode des éléments finis. Pour nourrir le modèle éléments finis, il est nécessaire de caractériser les matériaux fibreux largement au-delà de leur domaine élastique dans la direction transversale ce qui constitue l'objet du deuxième chapitre.

Chapitre 2.

Caractérisation du bois et du bambou en compression transversale

Pour comprendre les phénomènes mis en jeu dans les assemblages précontraints et permettre au terme de ce travail de les optimiser, il est choisi de modéliser par éléments finis la phase de mise en place de la précontrainte dans les assemblages. Cette démarche de modélisation requiert des paramètres matériaux qu'il est nécessaire de pouvoir renseigner. Dans la plupart des essais réalisés précédemment, cette phase s'effectue en même temps que la sollicitation des éléments en traction longitudinale. Ainsi, lors de cette mise en place, les matériaux fibreux sont sollicités simultanément en traction longitudinale et en compression transversale.

La loi de comportement du bois en traction longitudinale est simple à établir car elle se décrit par une phase élastique caractérisée par un module d'élasticité $E_{0,mean}$ et une rupture fragile à un seuil nommé $f_{t,0,mean}$. En revanche, en compression transversale, le bois a un comportement non linéaire. Il a pu être observé sur les assemblages précontraints en bois de résineux que la phase de densification réduisait l'épaisseur des avivés de 25 à 6 mm soit un taux de densification de 76% : le matériau est emmené jusqu'à sa phase de densification proprement dite (zone C de la figure 15).

Il apparaît donc essentiel pour le travail de modélisation de maîtriser l'évolution de cette loi de comportement pour chacun des matériaux fibreux utilisés pour réaliser des assemblages. Ces matériaux n'étant pas disponibles sous la même forme, cette caractérisation est appréhendée de manière différente pour le bambou et le bois. Comme il a été expliqué précédemment, la ressource et les espèces de bambou à disposition étant très variables, il est choisi de caractériser le bambou de chaque assemblage testé sans aboutir pour autant à une loi générale.

En revanche, pour le bois de résineux, l'établissement d'une loi de comportement générale est proposé. Cette dernière se matérialise comme une fonction continue constituée de plusieurs paramètres qui dépendent de la masse volumique du matériau. Ces informations n'ont pas été trouvées dans les données bibliographiques de manière suffisamment cohérente pour être rassemblées et ainsi permettre d'éviter un travail expérimental conséquent.

A partir des données bibliographiques, un protocole expérimental est présenté pour tester les deux matériaux en compression transversale. Une campagne d'essais est réalisée pour chaque matériau et les résultats analysés.

1. PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

Les chaumes de bambou ayant été testés dans un état très proche de leur état naturel, il s'est avéré nécessaire pour établir des lois de comportement sur ce matériau en compression transversale d'avoir recours à un protocole expérimental bien différent de celui retenu pour le bois. En effet, il est plus commode de façonner des éprouvettes de taille satisfaisante dans le bois que dans le bambou disponible sous forme globalement tubulaire avec une paroi mince.

1.1. Protocole expérimental pour le matériau bois

La difficulté qui apparaît lors de la caractérisation de la loi de comportement du bois en compression transversale dans les trois zones définies sur la figure 15 réside dans le fait qu'il faille atteindre des niveaux élevés de contraintes tout en conservant une précision de mesure suffisante pour en déduire un module d'élasticité. La charge appliquée doit permettre d'atteindre une contrainte supérieure à 50 MPa avec un taux de déformation de l'ordre de 60% alors que le domaine élastique se situe entre 0% et 2% de déformation. Cette plage de mesure pose d'autre part le problème du maintien de l'éprouvette et de ces conditions aux limites pendant le déroulement de l'essai.

1.1.1. *Etat de l'art pour caractériser le bois en compression transversale*

L'état de l'art réalisé montre que différentes solutions ont déjà été proposées. Les avantages et les inconvénients de ces différents travaux pour réaliser cette caractérisation sont résumés ci après.

François [FRA 1992] souligne tout d'abord le fait que la mise au point d'un essai de compression simple est délicat et dépend de l'éclatement de l'éprouvette, du parallélisme des sections et des frottements au niveau de l'interface entre l'éprouvette et le dispositif appliquant la charge. En effet, si ces paramètres sont mal choisis, il peut y avoir introduction de contraintes parasites de cisaillement et favoriser ainsi la rupture par bande de cisaillement. François ajoute que lorsque les éprouvettes normalisées (norme AFNOR $20 \times 20 \times 60 \text{ mm}^3$ [AFN 1985] ou ASTM [AST 2007]) sont sollicitées en grande déformation, la rupture par bande de cisaillement sépare l'éprouvette en deux blocs, ce qui a pour conséquence d'aboutir à un essai qui n'est plus en compression pure. Pour éviter ce problème, il préconise l'utilisation d'éprouvettes parallélépipédiques de section carrée et de hauteur inférieure à la longueur des deux autres côtés. Il utilise donc des éprouvettes peu élancées de section $25 \times 25 \text{ mm}^2$ et 5 mm de hauteur. Pour limiter les problèmes liés au frottement au niveau des plateaux presseurs, il fixe des feuilles anti-adhérentes entre le plateau et les faces des éprouvettes. Pour compenser les défauts d'usinage, le plateau supérieur qui amène l'effort est articulé et peut être bloqué. Le problème principal de ce mode opératoire est lié à la hauteur des éprouvettes qui est faible ce qui rend la mesure de la déformation peu précise.

Tabarsa et Chui [TAB 2000] donnent l'allure de la loi de comportement du bois d'Épicéa qui est présentée sur la figure 15. Cette courbe est déterminée à partir de la densification d'éprouvettes cubiques de $8 \times 8 \times 8 \text{ mm}^3$. Du fait de leurs faibles dimensions, cette méthode permet d'obtenir des éprouvettes parfaitement orientées tangentiellement et radialement. Malgré le fait qu'elles soient cubiques, ces éprouvettes ont une géométrie qui n'entraîne pas l'apparition de bandes de cisaillement. Cependant, la hauteur des éprouvettes étant faible, il est difficile de relever précisément le déplacement.

Bocquet [BOC 1997] propose d'établir la loi de comportement du bois en compression transversale à partir d'éprouvettes confinées dans un moule. Pour limiter les concentrations de contraintes au niveau des coins, des éprouvettes cylindriques sont usinées : leur diamètre et leur hauteur valent 30mm. Le moule pour confiner les éprouvettes est en acier. Le fait de confiner les éprouvettes permet de supprimer les efforts parasites de cisaillement. Ceci permet de densifier des éprouvettes élancées c'est-à-dire de faible section et d'atteindre sans difficulté une contrainte de compression de 50 MPa. En gardant une hauteur importante, une mesure plus précise de la déformation est permise. Le problème lié à cette méthode est l'apparition possible d'efforts de frottement entre l'éprouvette et son moule ce qui peut modifier la loi de comportement du bois.

C'est en se basant sur la méthode de mesure de Bocquet et en affinant son protocole d'essai pour mesurer les déformations du bois en compression transversale que les évolutions de la contrainte en fonction de la déformation sont mesurées ici.

1.1.2. Matériels et méthode

A la différence de Bocquet [BOC 1997], les éprouvettes testées sont des cylindres de 28 mm de diamètre et 36 mm de hauteur. Ces dimensions sont fixées par les capacités du tour à commande numérique utilisé par la fabrication des éprouvettes. Le fait d'avoir une hauteur légèrement supérieure permet d'être un peu plus précis dans la mesure de la déformation et notamment pour mesurer la limite élastique. Pour confiner les éprouvettes, un cylindre d'acier est utilisé (Figure 82). Ce dernier accueille un autre cylindre en Ertalon® (polyamide) de diamètre plus petit et inséré en force. Celui-ci accueille les éprouvettes de bois et offre une surface plus lisse que celle de l'acier, le but étant de limiter l'influence des frottements. Pour limiter encore plus l'effet des frottements, l'Ertalon® est lubrifié à l'aide d'un lubrifiant sec au PTFE (Polytétrafluoroéthylène). L'effort est introduit par une machine universelle Instron® (munie d'une cellule de charge de 100 kN ayant une précision de 0,5%) par l'intermédiaire d'un piston en acier.

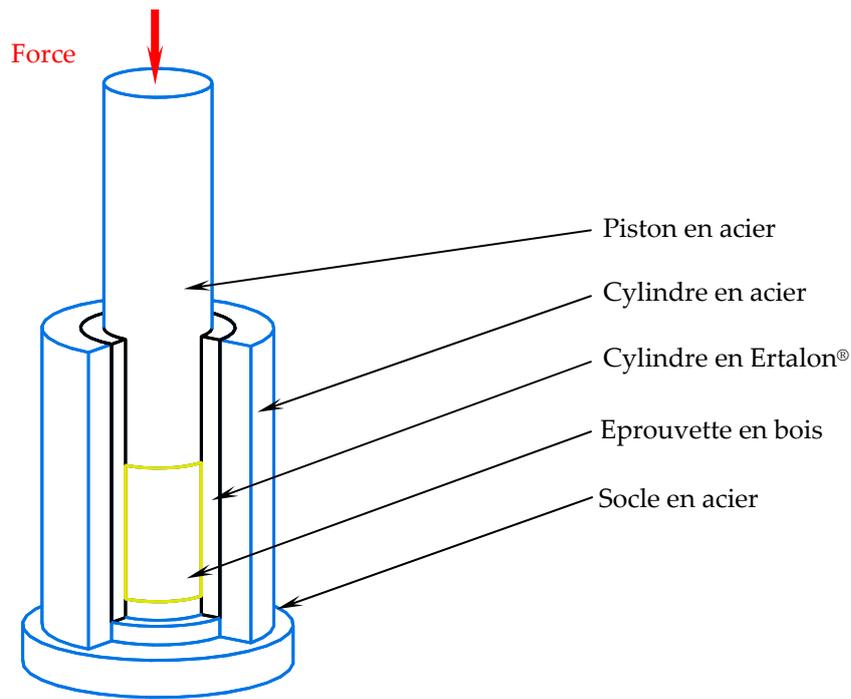


Figure 82 : Dispositif expérimental pour déterminer la loi de comportement du bois en compression transversale (éprouvette cylindrique de 36 mm de hauteur et 28 mm de diamètre)

Comme il a déjà été précisé, la partie cylindrique des éprouvettes est usinée à l'aide d'un tour à commande numérique. La mise à longueur des éprouvettes est réalisée grâce à deux scies montées en parallèle sur un arbre de toupie, ce qui permet d'obtenir deux surfaces parfaitement parallèles pourvues d'un état de surface très satisfaisant. Le bois étant un matériau orthotrope, il est possible de distinguer la compression radiale (Figure 83 (a)) et la compression tangentielle (Figure 83 (b)). Toutes les éprouvettes sont usinées dans des avivés de *Picea Abies* ; 42 d'entre elles sont densifiées dans la direction radiale (effort de compression perpendiculaire au plan tangentiel LT) et 39 sont densifiées dans la direction tangentielle (effort de compression perpendiculaire au plan radial RL).



Figure 83 : Eprouvettes avant puis après compression
(a) direction radiale, (b) direction tangentielle

La prise de mesures des déplacements au cours de l'essai s'effectue à l'aide d'un système de mesure par analyse d'images VDM où quatre objets constitués de deux cibles sont suivis. Dans le mode opératoire présenté sur la figure 84, le déplacement

relatif de l'objet 3 par rapport à l'objet 4 mesure l'écrasement subi par l'éprouvette. En effet, l'objet 3 est fixé sur le piston dont la raideur est suffisamment importante devant celle du bois pour être négligée. L'objet 4 mesure la déformation du bâti de la machine qui n'est pas négligeable (de l'ordre de 2 mm pour une charge de 100 kN). L'objet 2 permet d'avoir un plan de mesure nécessaire à l'étalonnage du logiciel. L'objet 1, quant à lui, permet de comparer les données trouvées par la machine d'essais universelle et celles données par le logiciel de traitement d'images.

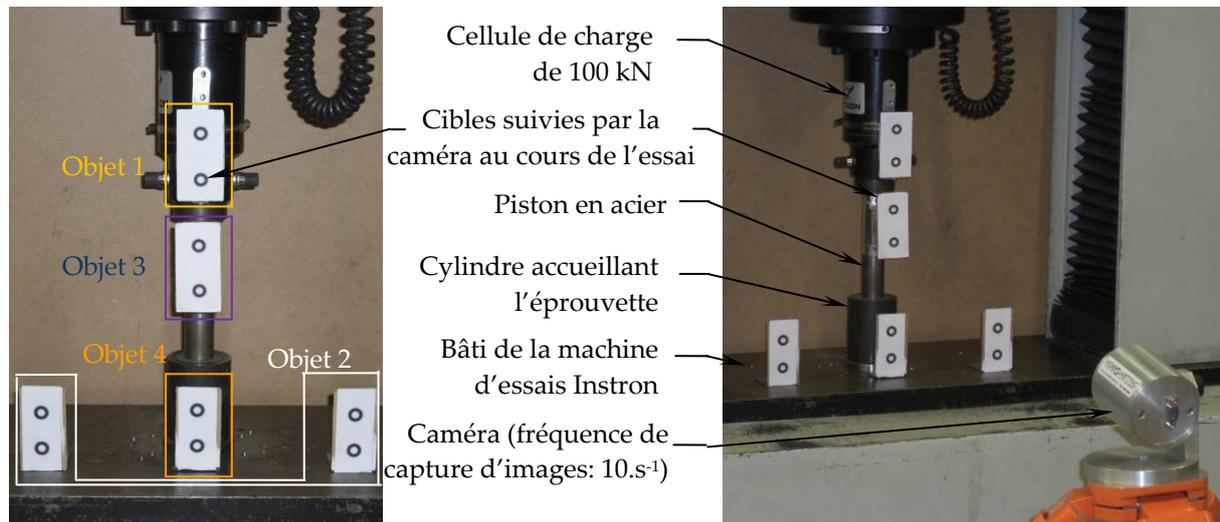


Figure 84 : Dispositif expérimental permettant de mesurer avec précision le déplacement de l'éprouvette soumise à de la compression transversale

Pour chaque éprouvette, la cellule de charge de la machine d'essais universelle donne l'évolution de la force et le logiciel d'analyse d'images indique le déplacement relatif du piston et du bâti de la machine d'essai ce qui permet de caractériser la loi de comportement de l'éprouvette en compression transversale. La contrainte est calculée par le rapport entre la force mesurée par la machine et la section de l'éprouvette. La déformation est calculée comme le rapport entre le déplacement relatif du piston et du bâti et la hauteur de l'éprouvette. Les dimensions exactes de chaque éprouvette ainsi que leur masse sont mesurées ce qui permet de connaître leur masse volumique. Enfin la largeur de cerne moyen de chaque éprouvette est mesurée. Les masses volumiques varient entre 335 et 475 kg.m^{-3} et les largeurs de cernes moyennes entre 1,37 et 5,11 mm.

Le cycle de chargement imposé aux éprouvettes de bois est présenté sur la figure 85. Plusieurs charges et décharges successives sont imposées aux éprouvettes pour mesurer l'influence de la densification sur le module d'élasticité du bois densifié et donc l'endommagement que subit le matériau bois au cours de sa compression transversale. Le premier cycle est réalisé dans la zone élastique pour mesurer le module d'élasticité du matériau bois : un déplacement est imposé jusqu'à 40% de la charge à la limite élastique estimée puis l'éprouvette est déchargée à 10% de cette charge. La force estimée en compression radiale est de 2,5 kN et en compression tangentielle de 4,5 kN. Le système est alors rechargé jusqu'à 5% de la

hauteur de l'éprouvette (taux de densification de 5% soit un déplacement de 1,8 mm pour des éprouvettes de 36 mm de hauteur) puis déchargé jusqu'à 10% de la charge maximale mesurée (cycle 2). Des cycles similaires au deuxième cycle sont réalisés en augmentant de 5% le taux de densification à chaque cycle jusqu'à atteindre la limite de la cellule de charge utilisée soit 100 kN. Le temps d'attente entre chaque changement de direction de chargement est nul.

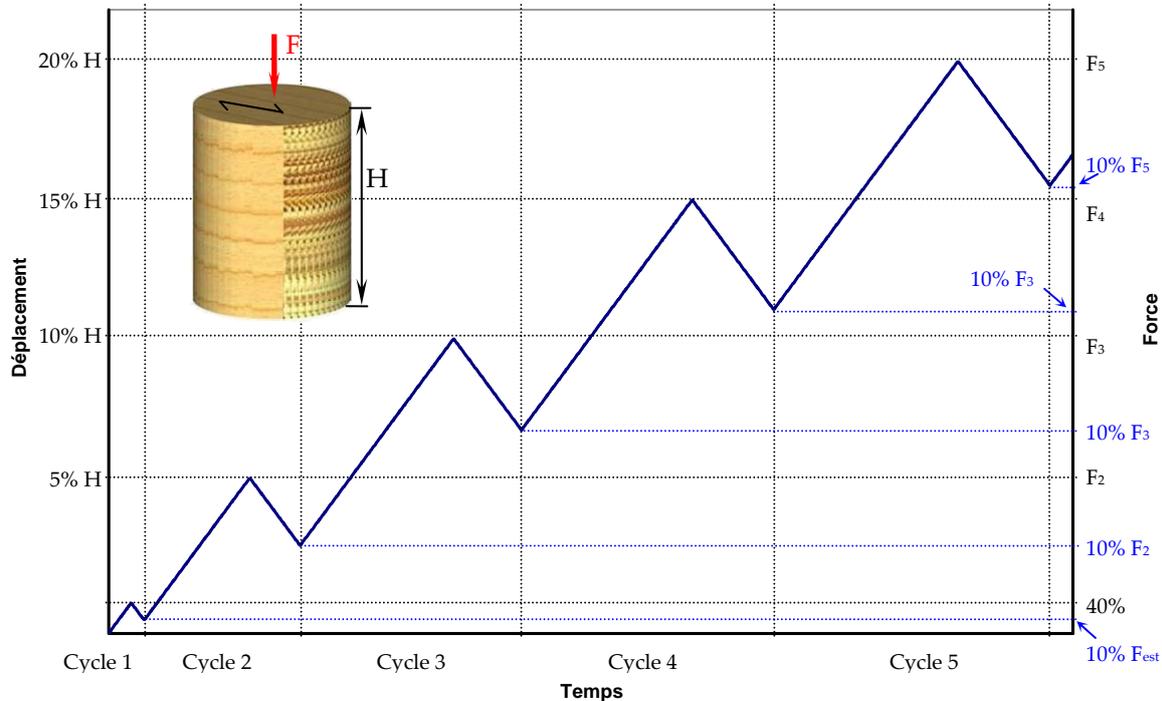


Figure 85 : Cycles de chargement imposés aux éprouvettes de bois de hauteur H testées en compression transversale ($F_{est}=2,5$ kN pour les éprouvettes testées radialement et $F_{est}=4,5$ kN pour les éprouvettes testées tangentiellement)

1.1.3. Validation du protocole expérimental

Le principal problème lié à cette méthode de détermination du comportement du bois en compression transversale est lié à la présence éventuelle de frottement entre l'éprouvette et l'Ertalon®. Pour quantifier ce paramètre, des éprouvettes de différentes hauteurs mais avec le même diamètre sont testées. Les éprouvettes choisies ont une masse volumique proche (349 kg.m⁻³ en moyenne pour un coefficient de variation de 4,2%), et leur hauteur varie entre 6,8 et 36 mm. Les courbes d'essais expérimentales sont présentées sur la figure 86.

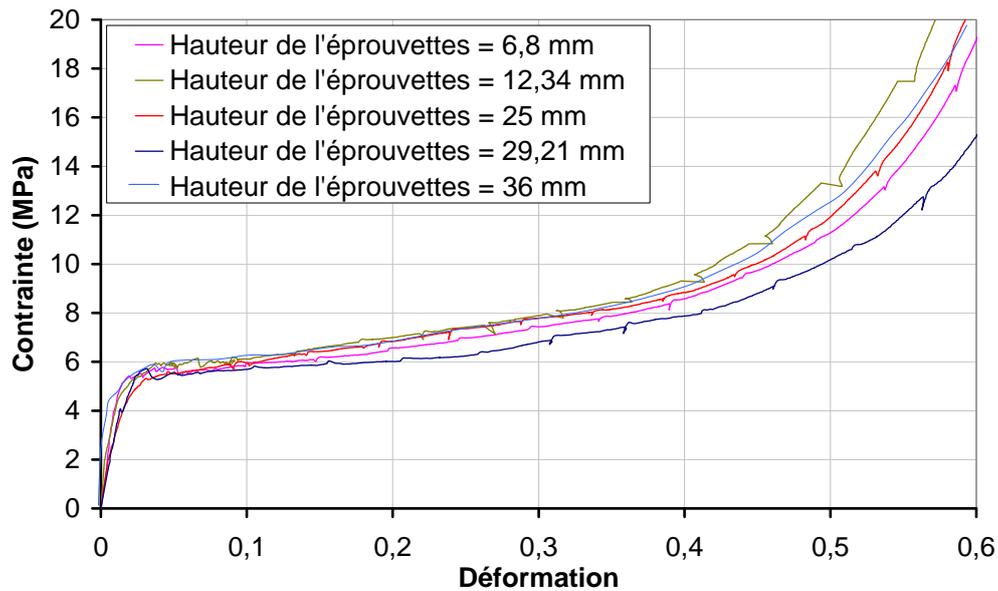


Figure 86 : Loi de comportement d'éprouvettes de masse volumique similaire (349 kg.m^{-3}) mais des hauteurs différentes

Le comportement des différentes éprouvettes testées présente la même évolution malgré leur différence de hauteur. La phase la plus délicate à mesurer est la phase élastique car il y a une grande variation de contrainte pour une faible déformation. Aussi, le tableau 9 compare le module d'élasticité ainsi que la limite élastique pour chacun des cinq essais.

Hauteur de l'éprouvette	Module d'élasticité	Limite élastique
6,8 mm	315,4	5,1
12,34 mm	280	4,89
25 mm	263	5,3
29,21 mm	205,9	5,7
36 mm	255,4	4,5
Moyenne	263,94	5,098
Coefficient de variation	15,09%	8,79%

Tableau 8 : Comparaison des données élastiques en compression transversale des éprouvettes de hauteur différentes utilisant le protocole expérimental décrit

L'allure générale des courbes et les données chiffrées décrivant le domaine élastique montrent que les éprouvettes de grandes hauteurs où le risque de frottement est important ne présentent pas de manière marquée un comportement différent des éprouvettes de faible hauteur. A la fin du plateau de densification, les allures divergent mais aucune tendance significative n'apparaît au regard de la hauteur des éprouvettes. Bien que le problème puisse mériter une étude particulière plus approfondie, le protocole est considéré correct pour conduire l'établissement de la loi de comportement du bois.

1.2. Protocole expérimental pour le matériau bambou

Les problématiques pour mesurer la loi de comportement du bambou en compression transversale sont les mêmes que pour le bois. Le dispositif expérimental doit permettre de mesurer un déplacement faible pour une force appliquée importante. De plus, le matériau doit être confiné pour éviter l'apparition de plans de cisaillement parasites.

Pour mesurer le comportement d'un chaume de bambou en compression transversale, il est nécessaire d'appliquer une charge constante sur sa surface. La tige de bambou ayant une forme tubulaire et irrégulière il est donc nécessaire de l'usiner en retirant de la matière sur sa périphérie. Cependant, les caractéristiques anatomiques et donc mécaniques du chaume de bambou n'étant pas homogènes sur son épaisseur (Figure 28), le fait d'enlever de la matière modifie certainement ses propriétés. Pour limiter ce phénomène, des éprouvettes de largeur réduite sont usinées tout en respectant la « règle » définie par François pour éviter l'apparition de plans de cisaillement (largeur de l'éprouvette supérieure à sa hauteur). Ainsi, des éprouvettes de 14mm de largeur pour 20mm de longueur (dans la direction des fibres) sont usinées. A partir de ce premier usinage, il est possible de réaliser des éprouvettes rectangulaires (Figure 87 (a)) : dans ce cas, pour un bambou de 60 mm de diamètre, la perte de matière (représentée en rouge sur la figure 87) est de 11,5%. Il est également possible d'usiner les éprouvettes en arc de cercle avec un rayon de 15 mm (Figure 87 (b)) : dans ce cas la perte de matière est de 8,6%.

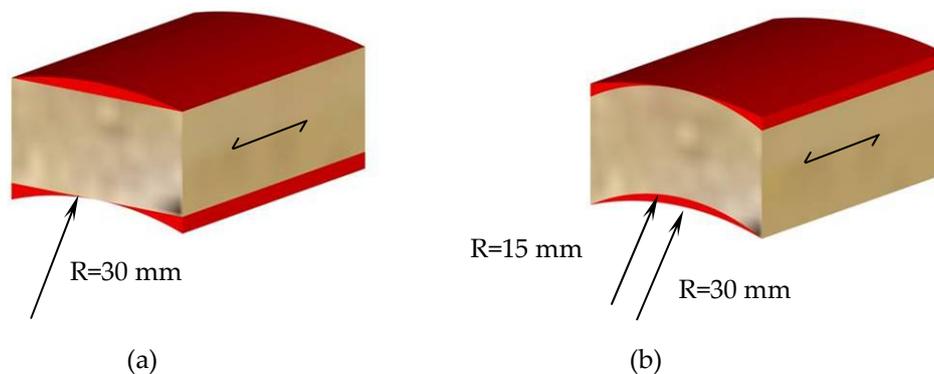


Figure 87 : Géométries possibles des éprouvettes de bambou pour la réalisation des tests en compression transversale : (a) Eprouvette parallélépipédique, (b) Eprouvette courbe

Etant donné la forte inhomogénéité des propriétés du bambou sur son épaisseur, il est préférable d'usiner le moins de matière possible : la deuxième solution est retenue. Il est difficile d'utiliser un rayon d'usinage plus important que 15 mm car le bambou n'est pas réellement cylindrique et est très irrégulier.

Pour appliquer une charge constante sur toute la surface du bambou, ce dernier doit être comprimé entre deux surfaces parfaitement complémentaires au bambou après usinage. Pour ce faire un montage est réalisé pour usiner les éprouvettes de bambou à l'aide d'un tour mécanique. Le même montage est également utilisé pour

tester le matériau en compression transversale. Le protocole expérimental pour usiner et tester le bambou en compression transversale est présenté sur la figure 88 et se décompose en quatre étapes.

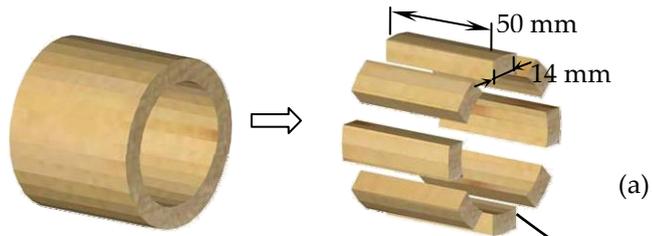
La première étape de ce protocole consiste à découper des lamelles de bambou (Figure 88 (a)). Pour améliorer la précision des mesures, les faces d'une lamelle doivent être parfaitement parallèles, aussi l'usinage se fait par l'intermédiaire de deux scies montées en parallèle sur un arbre de toupie. Après cette première opération, les lamelles de bambou mesurent 50 mm de longueur (dans la direction des fibres) et 14 mm de largeur.

Pour donner à la face inférieure de l'éprouvette de bambou un rayon de courbure de 15 mm, l'échantillon est fixé sur une tige en acier de 30 mm de diamètre par l'intermédiaire d'un jeu de mors et de guide (Figure 88 (c)). L'éprouvette dépasse à une des extrémités du montage de 30 mm (les éprouvettes sont montées par pair sur l'arbre afin d'équilibrer le montage pendant l'usinage). L'autre extrémité du montage est fixée sur le tour mécanique. Le bambou est alors usiné sur ce dernier par un outil à aléser (Figure 88 (b)) ce qui permet de lui donner sur sa face intérieure le même rayon de courbure que la tige en acier. La face extérieure de l'éprouvette de bambou est usinée de la même manière. Le rayon de courbure de la face extérieure est légèrement supérieur à celui de la face intérieure du fait du décalage de l'outil à aléser qui est inévitable du fait de l'épaisseur du bambou.

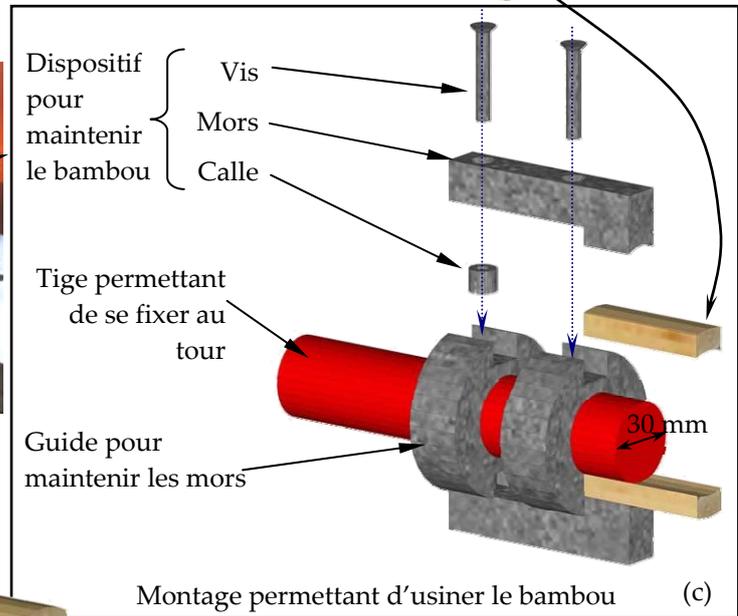
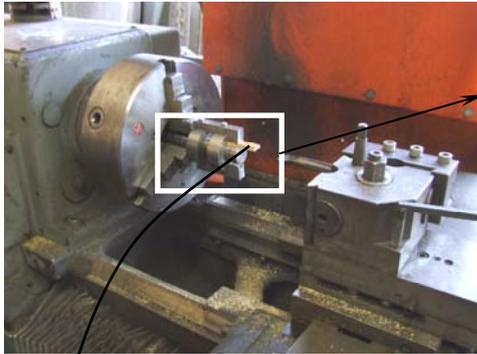
La troisième étape du protocole est la mise à longueur des éprouvettes usinées avec le bon rayon de courbure (Figure 88 (d)). Cet usinage est réalisé par l'intermédiaire de deux scies montées en parallèle sur un arbre de toupie.

Pour la phase de test, le bambou est placé sur la tige ayant servi à son usinage : les deux surfaces sont alors parfaitement complémentaires. L'éprouvette est placée entre deux guides et une pièce métallique l'entoure pour confiner la matière et ainsi empêcher l'apparition de plans de cisaillement (Figure 88 (e)). Un « piston » de compression préalablement usiné en prenant en compte la différence de rayon de courbure entre la face intérieure et extérieure du bambou liée à son épaisseur permet de comprimer l'éprouvette avec une pression constante sur sa surface (Figure 88 (f)). Les épaisseurs des chaumes de bambou testés avec des assemblages précontraints étant proches, un seul piston a été usiné. Le piston est guidé par les pièces métalliques entourant le bambou. L'ensemble est maintenu sur un support (Figure 88 (g)) qui est placé sur le bâti de la machine d'essais universelle Instron qui exerce sur le piston une charge mesurée par une cellule de charge de 100 kN (précision de 0,5%). Le déplacement relatif du piston par rapport au bâti est mesuré par analyse d'images (objet 1 par rapport à l'objet 2 définis sur la Figure 88 (h)).

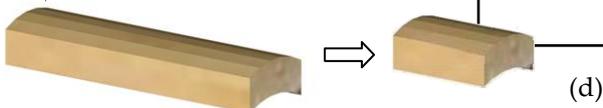
① Usinage de lamelles de bambou



② Mise en place de deux lamelles dans le montage et usinage



③ Mise à longueur de l'éprouvette de bambou



④ Test de l'éprouvette en compression transversale

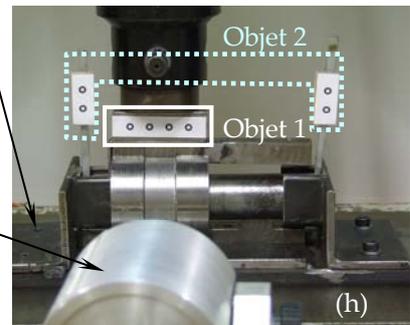
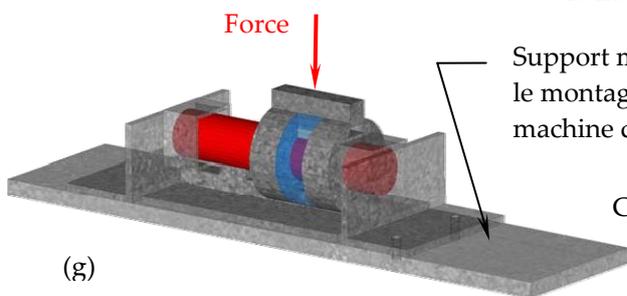
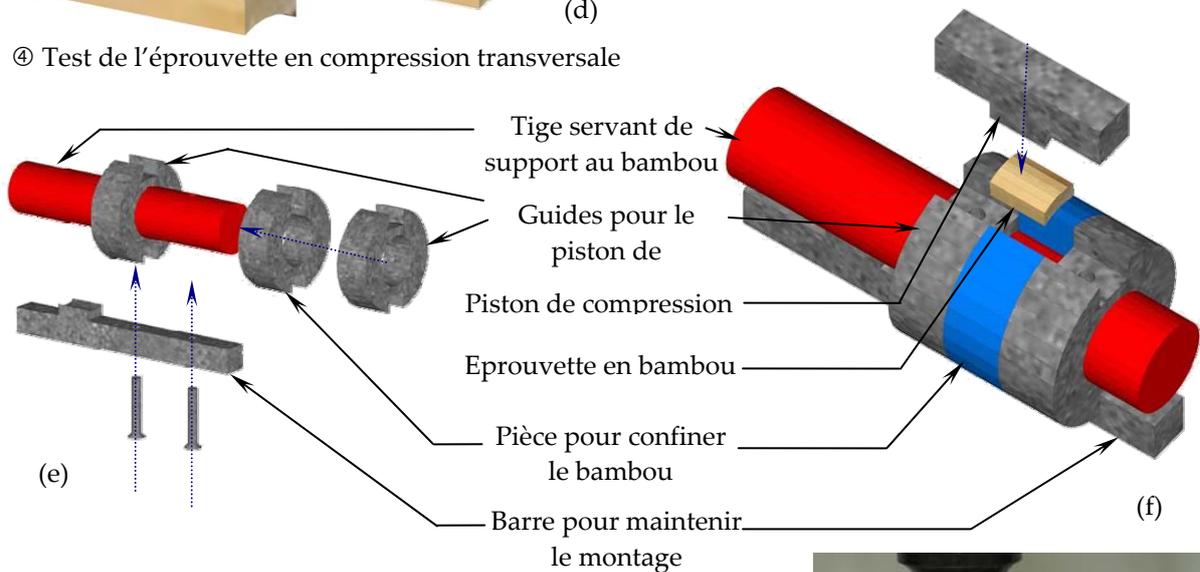


Figure 88 : Protocole expérimental pour tester le bambou en compression transversale

Ne cherchant pas à définir une loi de comportement générale pour le bambou, l'étude de l'endommagement n'a pas été retenue. Le cycle de chargement du bambou est donc réalisé en respectant la norme NF EN 383 [AFN 2007] : l'éprouvette est chargée jusqu'à 40% de la force à rupture estimée (limite élastique) notée F_{est} puis déchargée jusqu'à 10% de F_{est} puis chargée jusqu'à 30 kN (environ 100 MPa) les temps de palier entre chaque étape du cycle sont de 30 secondes.

Le protocole proposé permet de tester des éprouvettes de bambou de différents chaumes d'épaisseur proches avec toujours le même montage. Il nécessite d'usiner le matériau mais cet usinage est léger ce qui permet de limiter la perturbation des résultats liés à l'inhomogénéité du bambou sur son épaisseur. Une autre solution plus précise serait d'usiner pour chaque éprouvette de compression un montage parfaitement complémentaire à son profil. Le protocole qui en résulterait demanderait un temps bien plus important.

2. RESULTATS ET ANALYSES POUR LE BOIS

Les résultats de cette partie sont réalisés à partir des travaux de Beaulieu [BEA 2009]

2.1. Allure générale du comportement du bois en compression transversale

Dans un premier temps, le comportement du bois est étudié sans les différents cycles de charges – décharges successifs évoqués précédemment. Seul le premier cycle est présent pour mesurer de manière précise le module d'élasticité initial. Ce cycle permet d'épurer des mesures la phase d'évolution du contact inévitable lors de la réalisation d'essais mécaniques. Ces jeux peuvent être liés à la machine d'essais, à des défauts d'usinage de l'éprouvette... Pour représenter au mieux la loi de comportement et pouvoir facilement comparer la réponse de chaque éprouvette, cette phase de mise en place est supprimée des courbes par les traitements présentés sur la figure 89. La courbe (a) de cette figure correspond à la courbe expérimentale. A partir de la mesure de la pente de cette courbe au moment de la recharge (entre 10% et 40% de la force estimée, entre les points B et C de la figure 89), la portion de courbe entre le point A et C de la courbe (b) est calculée, le reste de cette courbe étant identique à la courbe (a). La courbe (b) est ensuite translatée pour démarrer à 0 (courbe (c)).

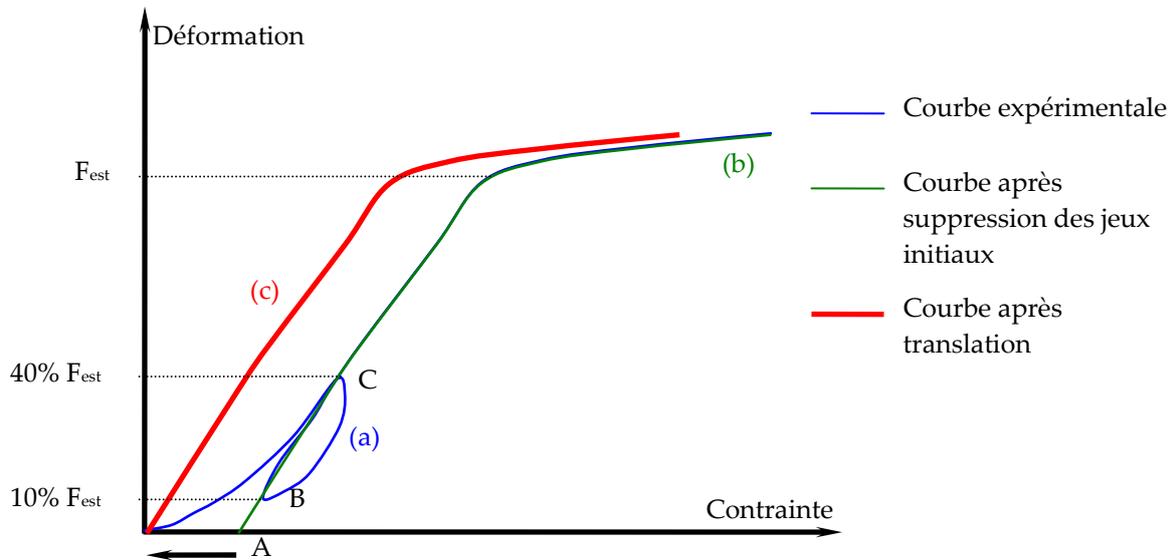
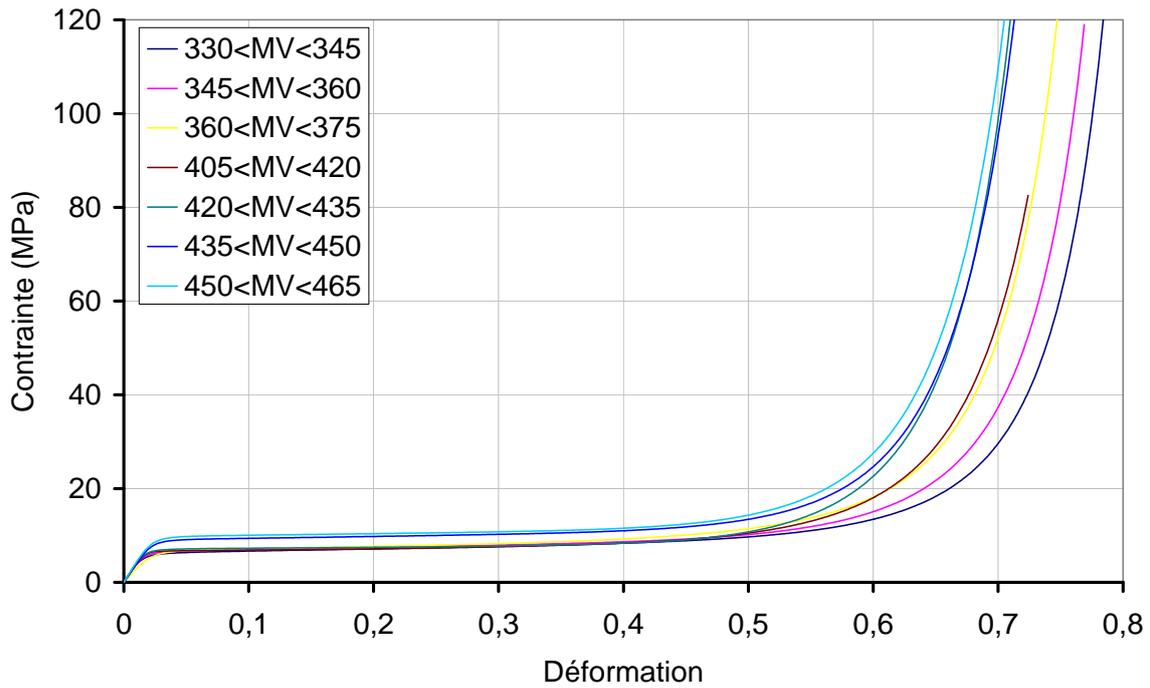


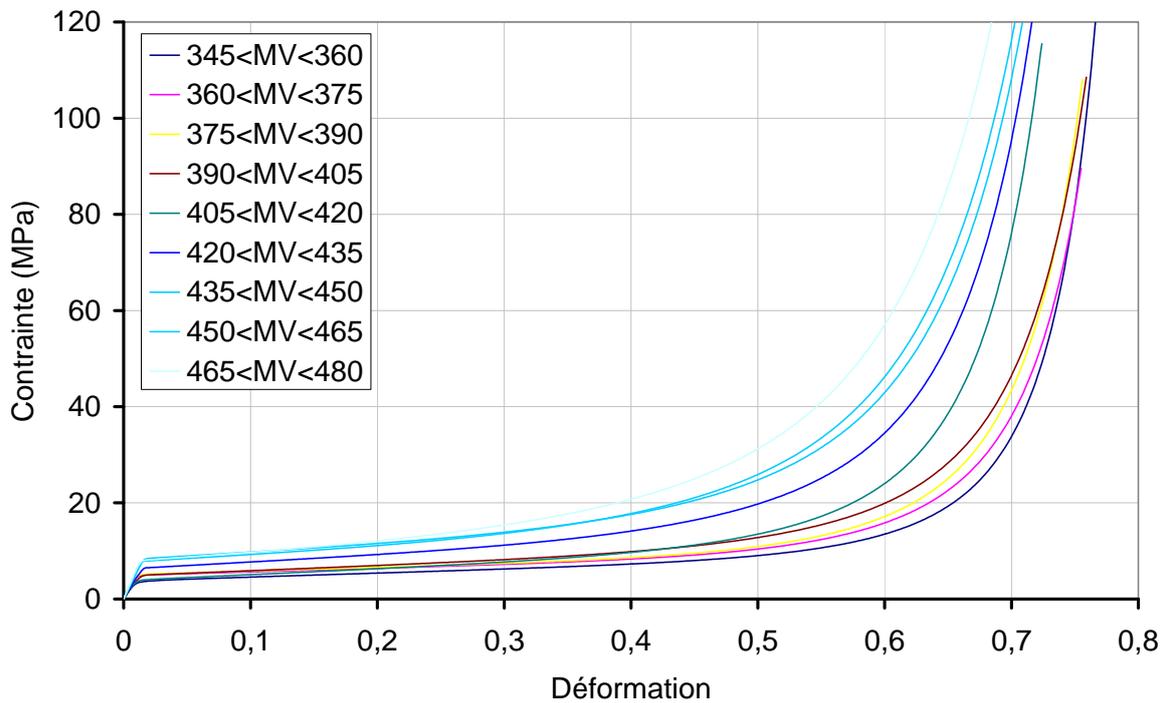
Figure 89 : Opérations réalisées sur les courbes de chaque essai pour supprimer la phase de mise en place et faciliter la comparaison des courbes

Les différentes éprouvettes sont réparties en deux familles suivant l'orientation des cernes (compression radiale et tangentielle). Chacune de ces deux familles est découpée en dix lots suivant leur masse volumique allant de 330 à 480 kg.m⁻³ (un lot s'étend donc sur 15 kg.m⁻³). Pour chaque lot, une courbe moyenne à partir des données expérimentales (sans les différents cycles) est calculée et l'ensemble de ces courbes est présenté sur la figure 90. Pour calculer ces courbes moyennes, un pas de déformation est défini pour l'ensemble des éprouvettes (0,01). Puis par interpolation linéaire, la contrainte correspondant à cette déformation est déterminée pour chacune des éprouvettes. Ainsi, pour chaque déformation, il est possible de calculer une moyenne des contraintes et donc de calculer une courbe faisant la moyenne de plusieurs éprouvettes.

Quelle que soit la masse volumique de l'éprouvette et son orientation, l'allure de son comportement en compression transversale est semblable à celles trouvées dans la bibliographie [TAB 2000]. Trois zones sont distinguables : une zone élastique linéaire, un plateau de densification et une zone de densification proprement dite. Pour une orientation du fil du bois donnée, le passage d'une zone à l'autre est fortement lié à la masse volumique de l'éprouvette choisie. Ainsi, plus l'éprouvette présente une masse volumique forte et plus la contrainte doit être élevée pour dépasser la zone élastique. Ceci a largement été étudié dans la bibliographie : plus un bois est dense et plus sa résistance est importante. La contrainte à laquelle la densification proprement dite commence est également liée à la masse volumique de l'éprouvette. Plus cette dernière est élevée et plus la densification apparaît pour une contrainte faible. Ceci est lié au fait que plus la masse volumique du bois est forte et plus sa part de vide cellulaire est faible et donc plus son plateau de densification est court.



(a) Loi de comportement du bois d'Epicéa en compression tangentielle



(b) Loi de comportement du bois d'Epicéa en compression radiale

Figure 90 : Loi de comportement moyenne en compression transversale du bois d'Epicéa pour différentes masses volumiques (notées MV)

2.2. Détermination de la loi de comportement du bois de *Picea abies* en compression transversale

L'établissement d'une loi de comportement générale du bois de *Picea abies* consiste à trouver une équation générale liant la contrainte à la déformation par l'intermédiaire de coefficients. Ces derniers dépendent des propriétés du bois (les propriétés mesurées pour cette étude sont sa masse volumique et sa largeur moyenne de cernes) et de la direction de sollicitation radiale ou tangentielle.

La loi de comportement est divisée en deux zones, une première qui se situe avant la zone de densification (zones A et B de la figure 15), et une seconde qui correspond à la densification (zone C). Comme l'indique la figure 91, la courbe initiale est caractérisée par un module initial noté K_1 , une limite élastique notée K_2 , un module de flambement des parois cellulaire K_3 , et un rayon de courbure r . Pour modéliser mathématiquement une courbe expérimentale ayant cette allure, Jaspard [LEI 1999] propose une formulation mathématique donnée par l'équation [1]

$$\sigma = \frac{(K_1 - K_3)\varepsilon}{\left\{ 1 + \left[\frac{(K_1 - K_3)\varepsilon}{K_2} \right]^r \right\}^{\frac{1}{r}}} + K_3\varepsilon \quad [1]$$

où σ est la contrainte de compression dans l'éprouvette calculée par le rapport entre la force appliquée par la machine d'essais et la section de l'éprouvette et ε la déformation subie par l'éprouvette c'est-à-dire le déplacement relatif de l'objet 3 par rapport à l'objet 2 de la figure 84 divisé par la hauteur de l'éprouvette.

A cette équation est ajoutée une loi exponentielle passant par l'origine. Caractérisée par une progression lente jusqu'à un certain seuil, défini ultérieurement, et une pente très rapidement croissante après ce seuil, cette équation permet de modéliser la densification du bois. Cette loi peut s'exprimer par la formule [2]

$$\sigma = \exp(\alpha\varepsilon^{\gamma \cdot \varepsilon_d}) - 1 \quad [2]$$

où α , γ et ε_d sont des coefficients à déterminer par rapport aux mesures expérimentales. Ainsi la loi de comportement du bois en compression transversale s'exprime par la fonction mathématique [3].

$$\sigma = \frac{(K_1 - K_3)\varepsilon}{\left\{ 1 + \left[\frac{(K_1 - K_3)\varepsilon}{K_2} \right]^r \right\}^{\frac{1}{r}}} + K_3\varepsilon + \exp(\alpha\varepsilon^{\gamma \cdot \varepsilon_d}) - 1 \quad [3]$$

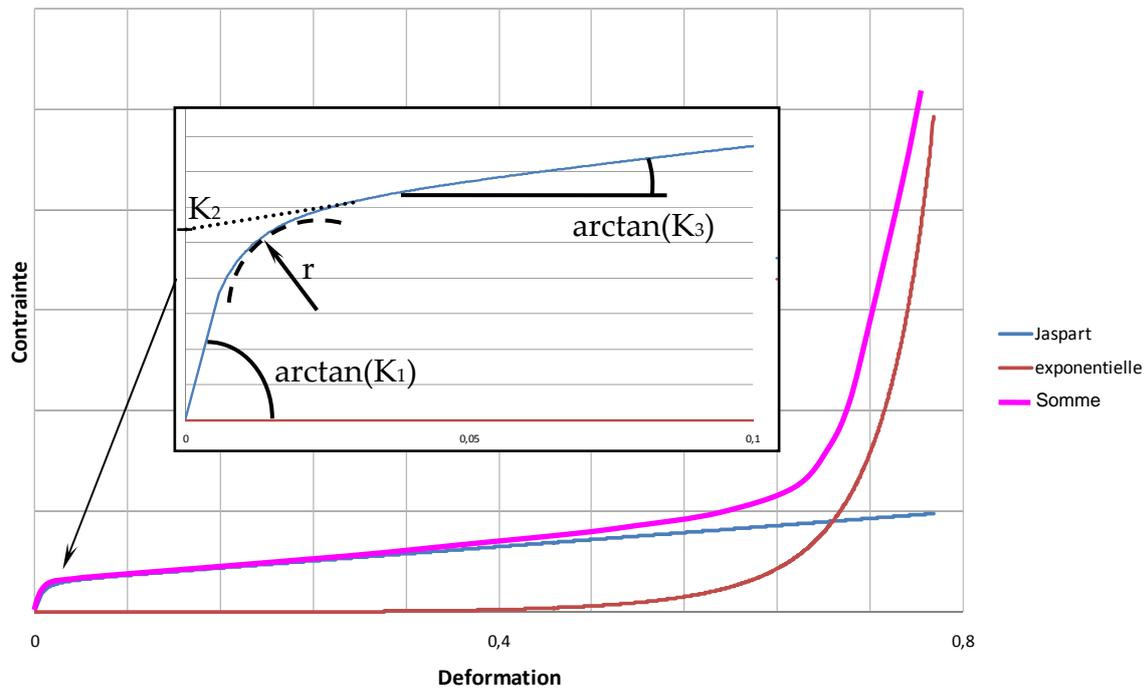


Figure 91 : Caractérisation de la loi de comportement en compression transversale par superposition de deux courbes

Au regard des observations précédentes, tous les paramètres qui caractérisent l'allure de la loi de comportement du bois en compression transversale dépendent soit de la masse volumique, soit de la largeur ou bien de l'orientation des cernes propres au bois de chaque éprouvette. Il est donc nécessaire de déterminer ces paramètres par régression pour chaque essai. La méthode utilisée pour cette opération est la minimisation des moindres carrés.

2.2.1. Détermination du module d'élasticité K_1

Le coefficient K_1 représente le module d'élasticité de l'éprouvette de bois. D'après la figure 93, le nuage de point formé par le traitement de chaque éprouvette ne semble pas évoluer de manière significative, ni en fonction de la masse volumique ni en fonction de l'épaisseur de cerne. L'orientation des cernes n'influence pas non plus l'évolution. Le module d'élasticité ou coefficient K_1 est donc pris égal à une valeur moyenne de 453 MPa. Cette valeur situerait le bois testé en classe C35 ($E_{90,mean} = 430 \text{ MPa}$) ce qui semble normal étant donné que le bois est sans défaut avec un volume très réduit.

2.2.2. Détermination de la limite élastique K_2

La figure 93 montre que la limite élastique est assez bien corrélée à la largeur de cerne. Lors de la densification transversale du bois, la première rupture apparaît au niveau des trachéides de plus faible épaisseur cellulaire [AND 1999 a]. En effet, en compression radiale, cette rupture est due à la compression même de ces trachéides et en compression tangentielle elle est due au flambement de la structure alternant bois de printemps et bois d'été. Cette première rupture correspond à la limite

élastique du bois. Le coefficient K_2 est donc piloté par l'épaisseur de la paroi de la trachéide la plus fine des cernes de l'éprouvette. L'épaisseur des parois des trachéides du bois de printemps est fortement liée à la croissance de l'arbre. Ainsi, un bois à croissance lente voit sa saison végétative commencer plus tardivement : le bois initial qu'il produit alors possède des parois plus épaisses. Si la croissance est très lente, il peut ne pas y avoir de bois de printemps mais uniquement du bois intermédiaire. Ainsi, un Epicéa à croissance lente possède des cellules de bois initial à paroi relativement épaisse et donc plus résistante : sa limite élastique en compression transversale est donc plus élevée que celle d'un Epicéa à croissance rapide. La largeur de cerne étant plus ou moins proportionnelle à la vitesse de croissance des résineux, il est logique que K_2 soit lié à la largeur de cerne.

Il est fréquent de considérer que la largeur de cerne est inversement proportionnelle à la densité du bois. La figure 92 montre l'évolution de la largeur de cerne en fonction de la masse volumique pour les éprouvettes testées. Cette figure montre que la corrélation est loin d'être parfaite mais qu'il existe une tendance vérifiant la constatation précédente. Ainsi la corrélation entre la limite élastique du bois en compression transversale et la masse volumique n'est pas très bonne, notamment pour les points entourés sur le graphique de la figure 93. Même si la corrélation n'est pas parfaite, il existe une tendance tendant à montrer que K_2 est proportionnel à la masse volumique.

Pour caractériser parfaitement le coefficient K_2 , il serait nécessaire de mesurer l'épaisseur de la paroi de la trachéide la plus fine et de trouver une corrélation entre ces deux paramètres. Cette opération demanderait une nouvelle investigation. Cependant, en termes de calcul de structure, il paraît difficile d'introduire des paramètres si pointus pour caractériser le bois. Le même problème se pose pour le paramètre largeur de cerne moyen. Aussi, même si la corrélation n'est pas parfaite, il est choisi de caractériser la limite élastique par rapport à la masse volumique du bois qui reste le paramètre le plus facilement mesurable.

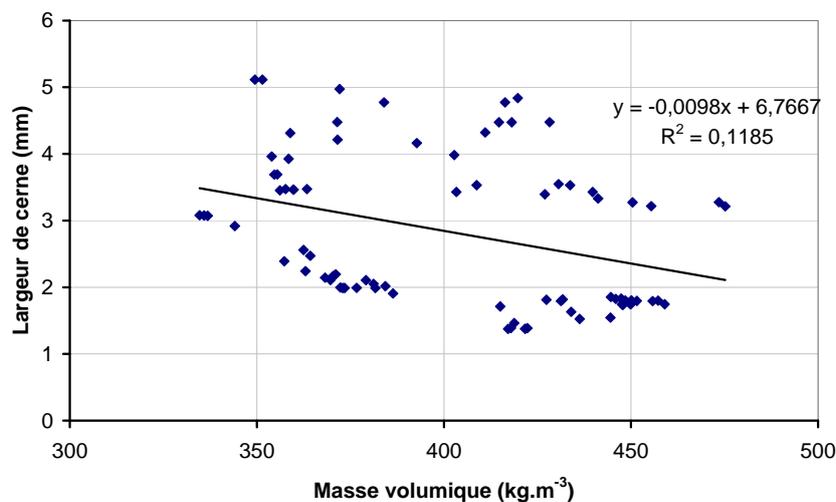


Figure 92 : Evolution de la largeur de cerne en fonction de la masse volumique

2.2.3. Détermination du module de flambement des parois des trachéides K_3

Le graphique de la figure 93 montre clairement une différence de comportement lorsque l'orientation des cernes varie. Le comportement post-élastique est dicté non plus seulement par la rupture d'une rangée de trachéides mais par l'effondrement de la structure entière de l'éprouvette. Lors de cette phase de plateau de densification où le vide cellulaire se comble au fur et à mesure que l'éprouvette s'écrase, le comportement du bois est tout à fait différent suivant l'orientation radiale ou tangentielle de la sollicitation.

Pour les éprouvettes radiales, ce plateau de densification se traduit d'un point de vue anatomique par l'effondrement successif des couches de trachéides du bois de printemps et de bois intermédiaire. Les premières cellules à s'effondrer sont les cellules les plus faibles, une fois effondrées, ces cellules sont plus résistantes ce qui permet de transmettre l'effort aux cellules suivantes qui sont plus résistantes : la charge pour provoquer cet effondrement est faible mais croissante [REI 2001].

Dans la direction tangentielle, pour une tranche, le bois peut être considéré comme une succession de poutres parallèles entre elles ainsi qu'à la force appliquée et liées entre elles par un volume de matériau souple. Les poutres correspondent au bois final et la partie souple correspond au bois initial et intermédiaire (le passage entre les deux bois se fait de manière plus progressive que dans la description de ce modèle). Lors de la densification tangentielle du bois, une fois que la limite élastique est atteinte le bois d'été entre en instabilité et flambe. Ce phénomène d'instabilité explique le fait que le module K_3 est plus faible qu'en densification radiale puisqu'il caractérise un comportement en post flambement.

Pour une orientation de cernes donnée, l'évolution du coefficient K_3 est plus corrélée à la masse volumique qu'à l'épaisseur des cernes. Ceci s'explique par le fait que cette phase d'effondrement cellulaire est liée non plus seulement à la rupture d'une rangée de trachéides (comme K_2) mais à un effondrement de l'ensemble de l'éprouvette. En compression radiale, l'effondrement cellulaire est lié uniquement au bois de printemps. Plus la masse volumique est importante plus les trachéides du bois de printemps ont une épaisseur de paroi importante ce qui explique que K_3 augmente avec la masse volumique. En compression tangentielle, l'effondrement est piloté par le flambement du bois d'été. Il est utile de rappeler ici que la largeur du bois final est peu variable quelle que soit l'épaisseur du cerne considéré. Ainsi lorsqu'il y a beaucoup de bois de printemps, celui-ci retient le bois d'été lorsque ce dernier flambe. L'effondrement est alors progressif : la pente du plateau de densification est similaire au comportement radial. Pour les éprouvettes de masse volumique plus importante, la proportion de bois d'été est plus grande du fait d'une présence diminuée de bois de printemps, le flambement du bois d'été est moins progressif et devient plus instable d'où généralement une diminution de la pente du

plateau de densification. Lorsque la masse volumique est encore plus forte, l'instabilité est telle que cette pente peut devenir négative.

2.2.4. Détermination du rayon de courbure r

Ce paramètre permet de lier de manière continue la zone élastique et le plateau de densification. Ce paramètre caractérise l'homogénéité de la rupture des parois cellulaires. La figure 93 montre que ce paramètre n'est corrélé ni à la masse volumique ni à la largeur de cerne. Il semble plus grand lorsque la compression est radiale. Ce paramètre ayant une dispersion importante une valeur moyenne est retenue, r est pris égal à 7,42. Des observations précises au niveau des trachéides permettraient sans doute de comprendre la réelle phénoménologie au moment de la rupture. Cette étude semble cependant trop pointue par rapport à l'objectif de modélisation.

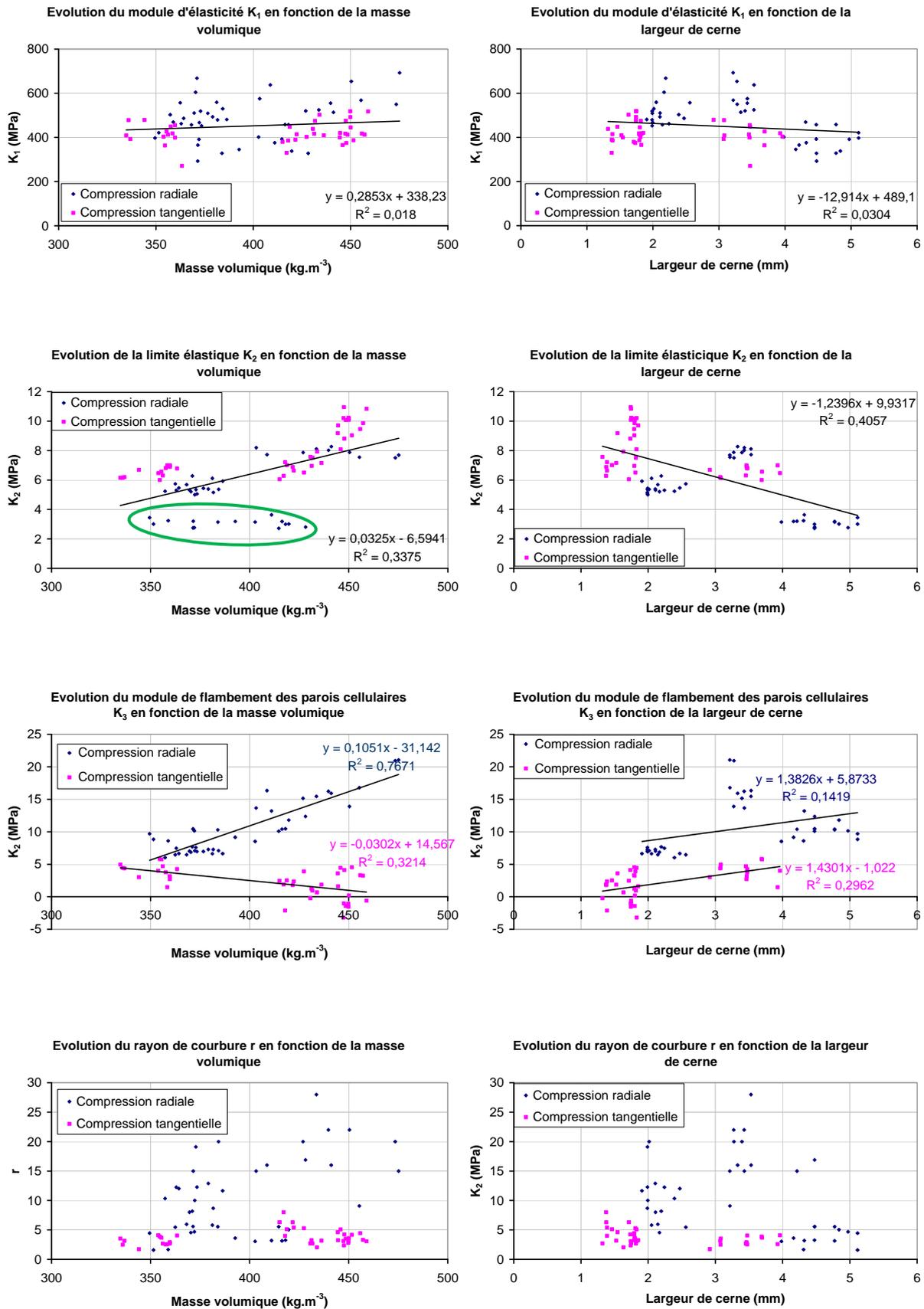


Figure 93 : Evolution des différents coefficients permettant de caractériser la loi de comportement du bois en compression transversale avant la zone de densification

2.2.5. Détermination des coefficients α , γ et ε_d

Ces coefficients sont déterminés de la même manière que les autres. Ils sont, de plus, indépendants des autres coefficients. La figure 94 montre l'évolution du coefficient α en fonction de la masse volumique et de la largeur de cerne. Il semble ne pas y avoir de variation notable, le coefficient α sera donc pris égal à une valeur moyenne de 12,25 pour du *Picea abies*.

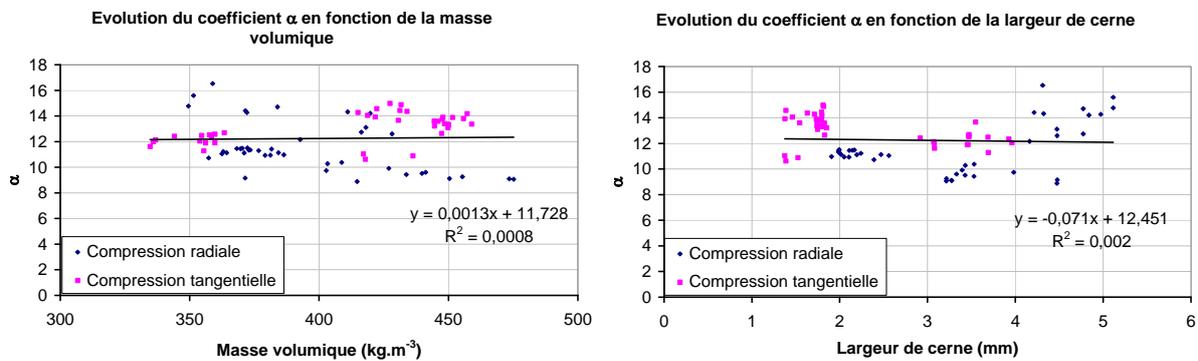


Figure 94 : Evolution du coefficient α en fonction de la largeur de cerne et de la masse volumique de *Picea abies*.

A partir de cette valeur constante de α , il est possible de déterminer les coefficients γ et ε_d . La figure 95 montre que le produit de ces deux coefficients évolue avec la masse volumique et la largeur de cerne. En apparaissant en terme de puissance dans la fonction mathématique proposée, $\gamma.\varepsilon_d$ permet de faire varier le début de la phase de densification.

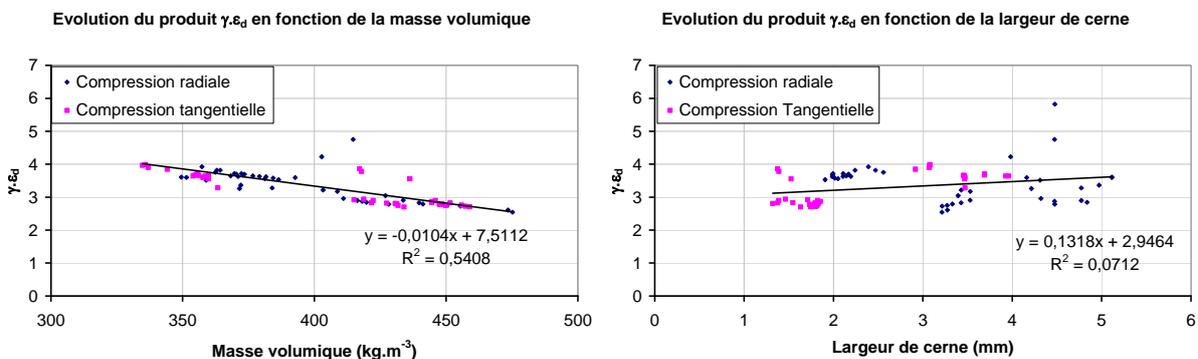


Figure 95 : Evolution du produit $\gamma.\varepsilon_d$ en fonction de plusieurs paramètres

Pour donner un sens physique à ce produit $\gamma.\varepsilon_d$, il est nécessaire de comprendre cette phase de densification. Cette phase dépend de deux paramètres principaux : le module de densification K_3 (pente de la courbe $\sigma=f(\varepsilon)$ dans sa phase de densification) et la déformation notée ε_d à partir de laquelle la phase de densification débute (Figure 96). Dans la phase de densification il n'y a presque plus de vide cellulaire. Aussi le module dans la phase de densification dépend principalement de la matière ligneuse qui a des propriétés mécaniques plus ou moins

constantes pour une essence donnée. Ainsi, seule la déformation ϵ_d est à prendre en compte pour évaluer le coefficient γ .

Afin que l'estimation de la valeur de ϵ_d soit établie de manière pertinente, il est retenu qu'un écart significatif de 10% devait séparer l'équation de la loi de comportement globale (constituée de l'équation de Jaspert et de la fonction exponentielle) de l'équation mathématique de Jaspert seule (Figure 96).

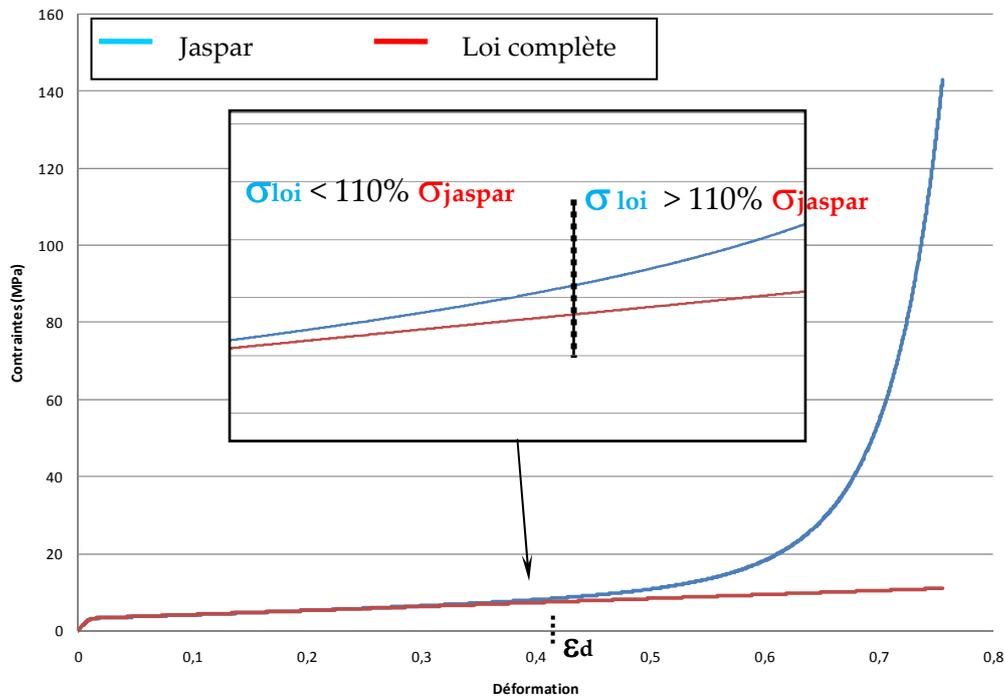


Figure 96 : Détermination du coefficient ϵ_d à partir de la courbe de Jaspert et de la courbe complète

La figure 97 montre l'évolution du coefficient ϵ_d en fonction de la masse volumique et de la largeur de cerne. Cette figure montre que plus la masse volumique est importante plus la densification commence tôt. Ceci est dû au fait que lorsque le bois est dense, sa part de bois d'été est importante et donc sa part de vide cellulaire est faible.

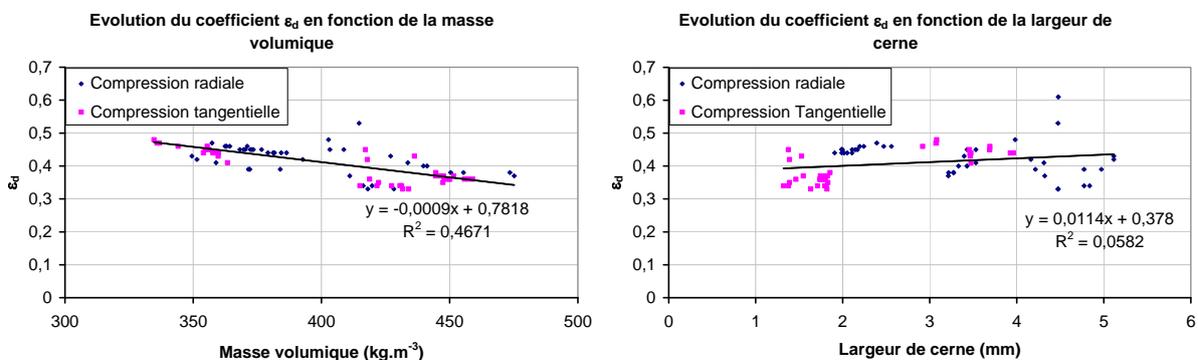


Figure 97 : Evolution du coefficient ϵ_d en fonction de différents paramètres

Le coefficient γ qui caractérise la phase de densification est lié au coefficient ε_d comme le montre la figure 98. Ainsi, le bois d'Épicéa en compression transversale peut être caractérisé par cinq coefficients ayant un sens physique qui sont des fonctions linéaires de la masse volumique.

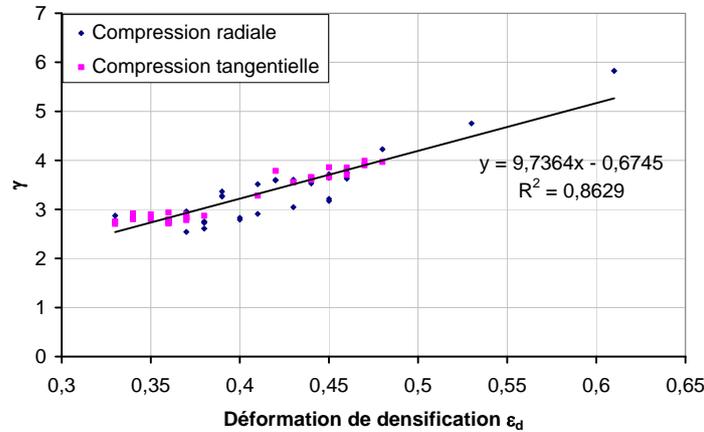


Figure 98 : Evolution du coefficient γ en fonction de ε_d

La loi de comportement générale de la compression transversale est décrite par l'équation [4].

$$\sigma = \frac{(K_1 - K_3)\varepsilon}{\left\{ 1 + \left[\frac{(K_1 - K_3)\varepsilon}{K_2} \right]^r \right\}^{\frac{1}{r}}} + K_3\varepsilon + \exp(\alpha \cdot \varepsilon^\gamma \cdot \varepsilon_d) - 1 \quad [4]$$

avec K_1 , K_2 , K_3 , r , ε_d les coefficients définis précédemment et α , γ et ε_d des coefficients liés à la phase de densification qui valent respectivement 12,25 et 8,12 pour du *Picea abies*.

Le tableau 9 donne les différents coefficients qui caractérisent l'équation ci-dessus pour les directions radiale, tangentielle et transversale en fonction de la masse volumique en kg.m^{-3} . La direction transversale correspond à la moyenne des directions radiale et tangentielle. Ce cas est nécessaire car dans la plupart des applications, une orientation des cernes purement radiale ou purement tangentielle n'est pas envisageable industriellement. De plus, dans de nombreux modèles, le bois est considéré comme isotrope transverse avec des propriétés identiques dans les directions radiale et tangentielle.

		Radial	Tangentiel	Transversal
K_1		453		
$K_2 = a_{K2} \cdot \rho + b_{K2}$	a_{K2}	0,0325		
	b_{K2}	-6,5941		
$K_3 = a_{K3} \cdot \rho + b_{K3}$	a_{K3}	0,1051	-0,0302	0,0325
	b_{K3}	-31,142	14,567	-6,5941
r		7,42		
$\varepsilon_d = a_{\varepsilon d} \cdot \rho + b_{\varepsilon d}$	$a_{\varepsilon d}$	$-9 \cdot 10^{-4}$		
	$b_{\varepsilon d}$	0,7818		

Tableau 9 : Coefficients nécessaires à la formulation de la loi de comportement du bois en compression transversale

2.3. Analyse de l'évolution du module d'élasticité du bois densifié

Au cours de l'essai, l'éprouvette est chargée et déchargée plusieurs fois ce qui permet de mesurer le module d'élasticité du bois densifié à différents taux de densification. D'après Adalian [ADA 1998], il est nécessaire de définir neuf paramètres pour définir la compression du bois dans n'importe quelle direction. Ces paramètres sont représentés sur la figure 99. Pour la compression transversale, les paramètres σ_{pic} et σ_{pl} sont identiques.

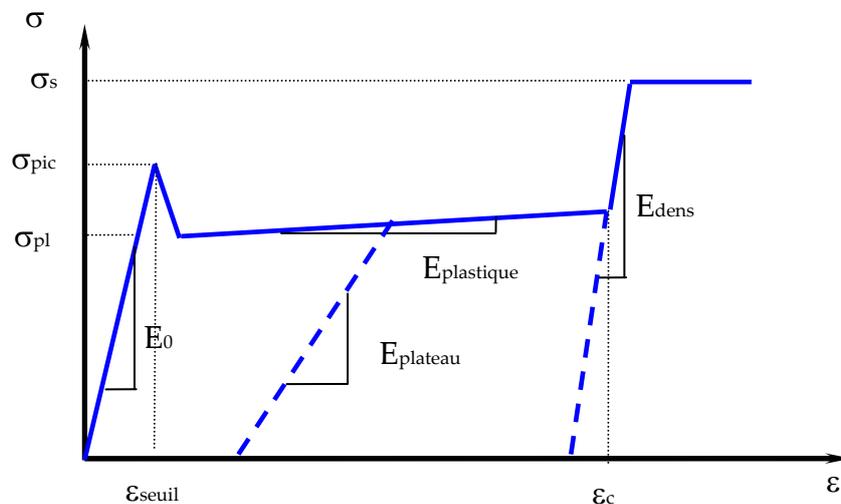


Figure 99 : Modélisation du comportement du bois en compression [ADA 1998]

D'après Adalian, le module d'élasticité du bois lorsqu'il est densifié jusqu'au plateau de densification est plus faible que le module d'élasticité du bois. Une fois la zone de densification proprement dite atteinte, le module d'élasticité augmente pour dépasser le module d'élasticité du bois initial. Ce phénomène est également observé sur les essais réalisés. Par exemple, pour une éprouvette de 350 kg.m^{-3} , testée en compression radiale, la figure 100 montre la courbe expérimentale ainsi que l'évolution du module d'élasticité en fonction de la densification de l'éprouvette.

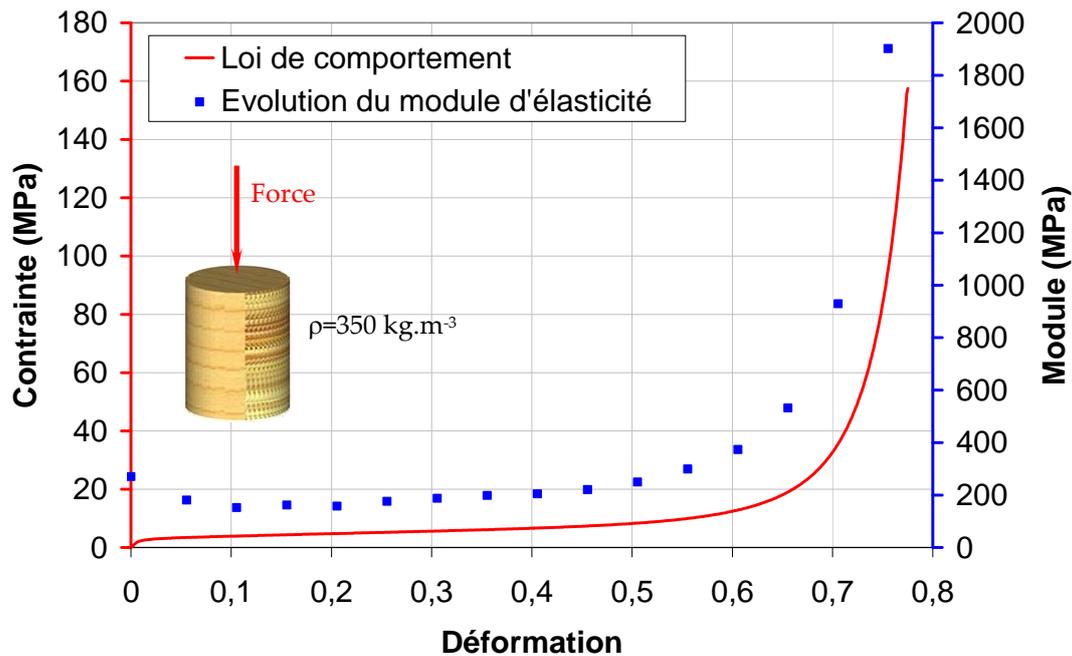


Figure 100 : Loi de comportement d'une éprouvette de bois (Epicéa) en compression radiale avec l'évolution de son module d'élasticité au cours de sa densification

Expérimentalement, le passage de la zone B à la zone C est plus progressif que dans le modèle d'Adalian. Ainsi, dans cette zone de transition, le module d'élasticité en compression passe progressivement d'une valeur basse (E_{plateau}) à une valeur haute (E_{dens}).

Pour chaque éprouvette, il est possible de comparer la diminution de module entre la zone élastique et la zone du plateau de densification ce qui correspond à un endommagement du module. Il est possible également de comparer l'augmentation maximale du module entre la zone élastique et la zone de densification proprement dite. Ces variations des modules d'élasticité en fonction du taux de densification sont présentées sur la figure 101 en classant les éprouvettes par rapport à leur masse volumique et l'orientation des cernes.

Que ce soit pour les éprouvettes comprimées radialement ou tangentiellement, l'augmentation du module d'élasticité (passage dans la zone de densification proprement dite) possède une variabilité importante mais ne dépend ni de la masse volumique ni de l'orientation des cernes. Ce paramètre est lié à la matière ligneuse du bois qui est plus ou moins la même d'une éprouvette à l'autre. Ainsi, le module dans la zone de densification dépend uniquement du module d'élasticité du bois sans densification est vaut avec les notations de la figure 99 :

$$E_{\text{dens}} = 8 \times E_0 .$$

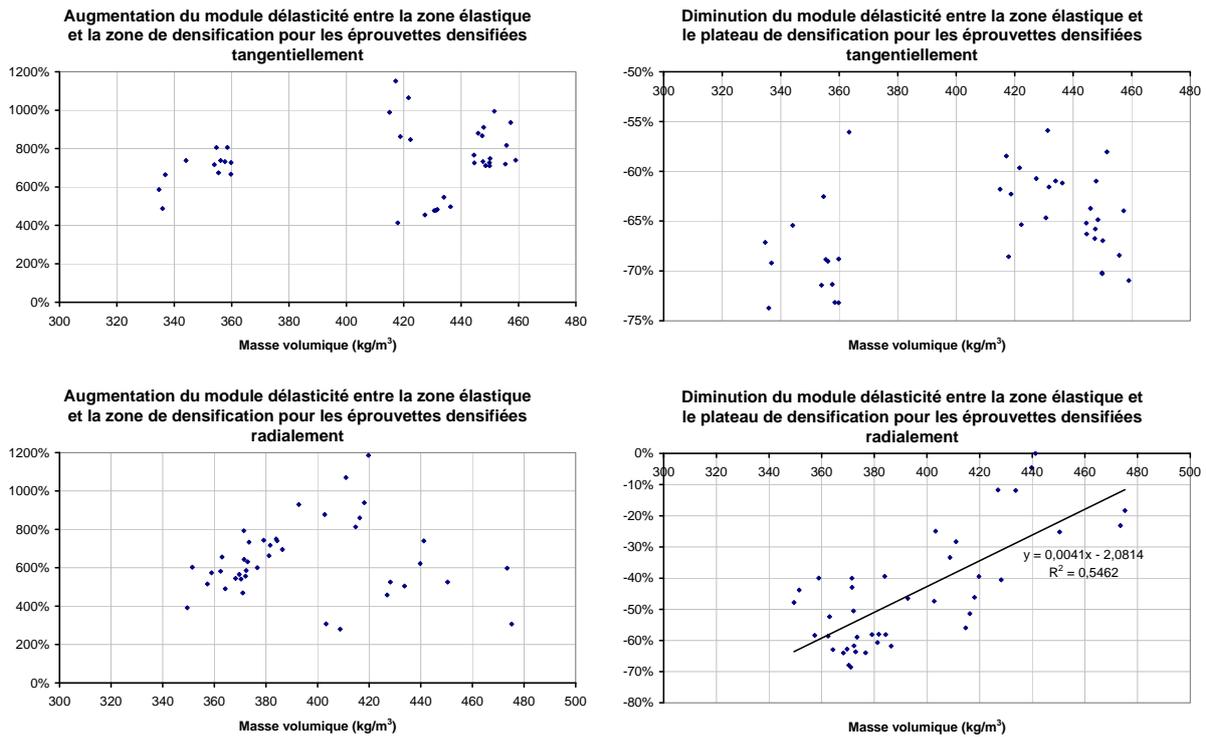


Figure 101 : Evolution du module d'élasticité du bois en fonction de sa densification

La diminution du module entre la zone élastique et le plateau de densification correspond à son endommagement. Cet endommagement ne dépend pas de la masse volumique des éprouvettes comprimées tangentiellement mais est fortement lié à ce paramètre lorsque la densification est radiale. Dans ce dernier cas, plus la masse volumique des éprouvettes est grande et moins il y a d'endommagement. Ceci s'explique par le fait que lorsque les éprouvettes sont denses, il y a peu de vide cellulaire, ainsi en compression radiale le bois subit peu d'effondrement avant sa densification proprement dite ce qui se traduit par une faible diminution de son module. En compression tangentielle en revanche, il y a toujours un phénomène de flambement global de la structure quelle que soit la masse volumique du bois ce qui se traduit par un endommagement constant. Ainsi, pour la compression radiale, le module sur le plateau se calcule avec les notations de la figure 99 par la formule suivante :

$$E_{plateau} = (0,0043\rho - 1,144)E_0$$

avec ρ la masse volumique de l'éprouvette en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et les modules en MPa. En compression tangentielle :

$$E_{plateau} = 0,35E_0.$$

3. RESULTATS ET ANALYSES POUR LE BAMBOU

Pour le bambou, il est choisi de caractériser en compression transversale chaque chaume testé avec un assemblage précontraint. Six tiges de bambou différentes ont été utilisées pour les essais et chacune de ces tiges a fait l'objet d'une caractérisation. Cette reconnaissance des propriétés est réalisée à partir de six éprouvettes prélevées à différents endroits du chaume testé. Chaque comportement expérimental peut s'illustrer par une courbe contrainte – déformation. Tout comme pour le comportement du bois, pour chaque éprouvette, un pas de déformation est défini (pas constant de 0,01), puis par interpolation linéaire, la contrainte correspondant à cette déformation est déterminée. Ce procédé permet de calculer une courbe moyenne de loi de comportement en compression transversale pour chaque chaume. Les courbes expérimentales et moyennes sont données sur la figure 102 et la figure 103.

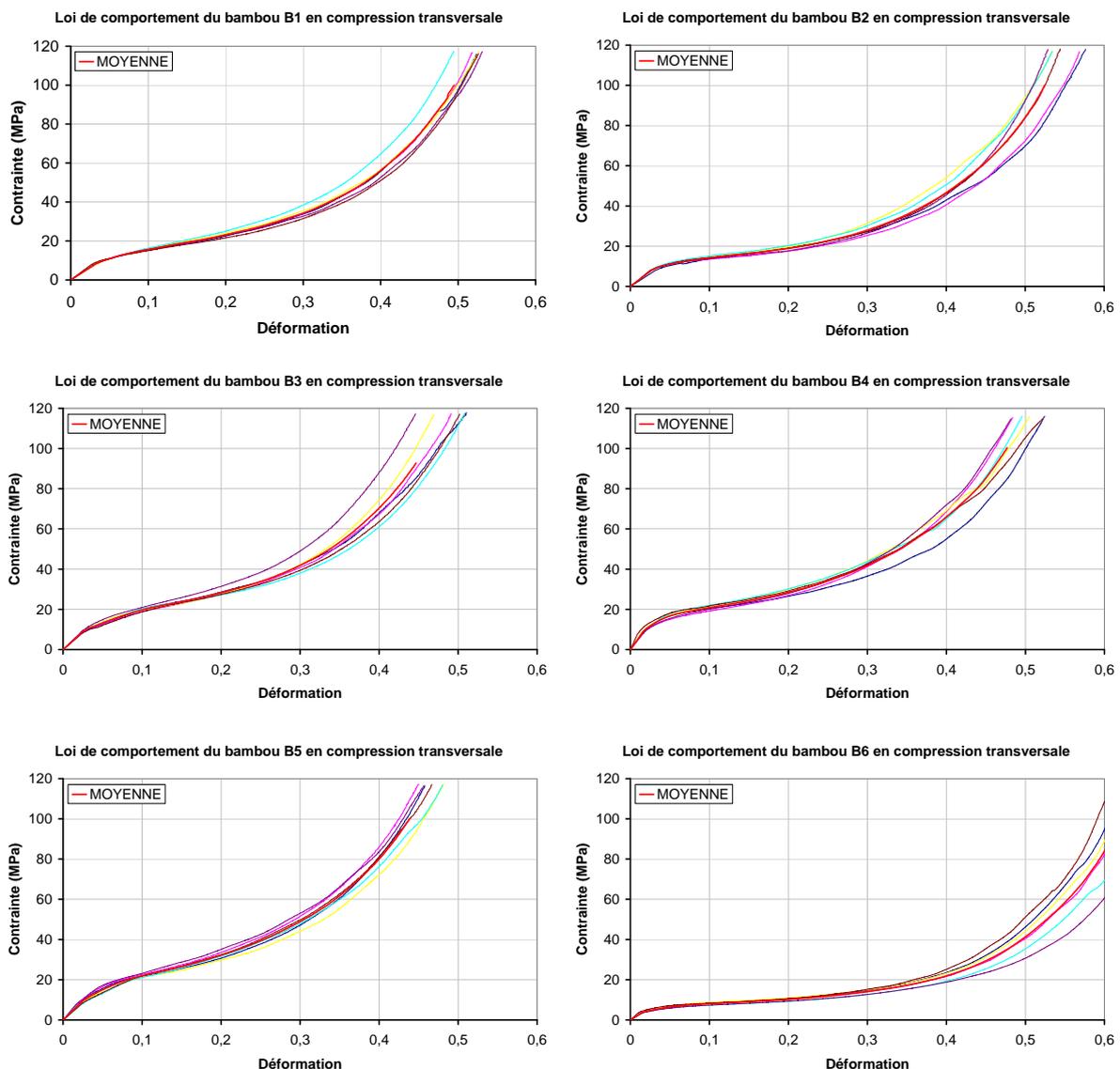


Figure 102 : Comportement des chaumes de bambou testés pour les assemblages précontraints en compression transversale

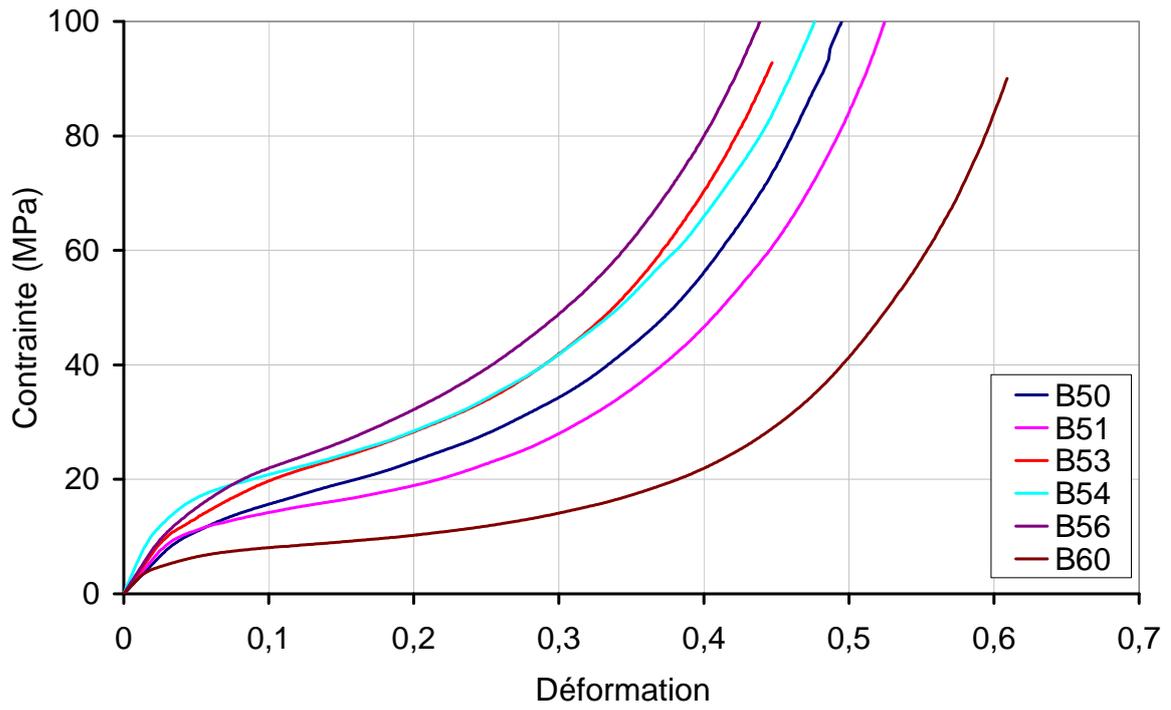


Figure 103 : Comportement moyen des chaumes de bambou testés pour les assemblages précontraints en compression transversale

Chapitre 3.

Caractérisation du bois en sollicitation mixte : traction longitudinale compression transversale

Dans les essais présentés au Chapitre 1, les matériaux fibreux dans la zone d'assemblage, sont sollicités à la fois en compression transversale et en traction longitudinale. Ces sollicitations sont importantes non seulement en traction mais également en compression puisque, pour le matériau bois, le taux de déformation imposé est tel qu'une partie du bois est contraint au-delà du plateau de densification (zone C de la figure 15). L'objectif de ce chapitre est de mesurer et quantifier l'influence de la compression transversale du matériau fibreux sur sa résistance en traction longitudinale. Etant donné que seul le matériau bois subit une phase de densification forte et que la résistance du bambou en compression transversale est importante, il est choisi de réaliser cette étude uniquement sur le bois.

Quelques études expérimentales ont été réalisées pour mesurer l'influence de différentes sollicitations sur la résistance du matériau. Une des dernières études sur le sujet est celle menée par, Eberhardsteiner [EBE 2002] qui a réalisé une machine permettant de solliciter le bois en traction et en compression simultanément, ce qui lui a permis de réaliser des sollicitations biaxiales sur des éprouvettes de résineux sans défaut (Figure 104). Ces essais ont montré que jusqu'au plateau de densification, la contrainte de compression transversale a peu d'influence sur la résistance du bois en traction longitudinale. Les essais d'Eberhardsteiner ne vont pas au-delà de ce plateau. C'est pourquoi, une campagne d'essais plus poussée en phase de densification est nécessaire.

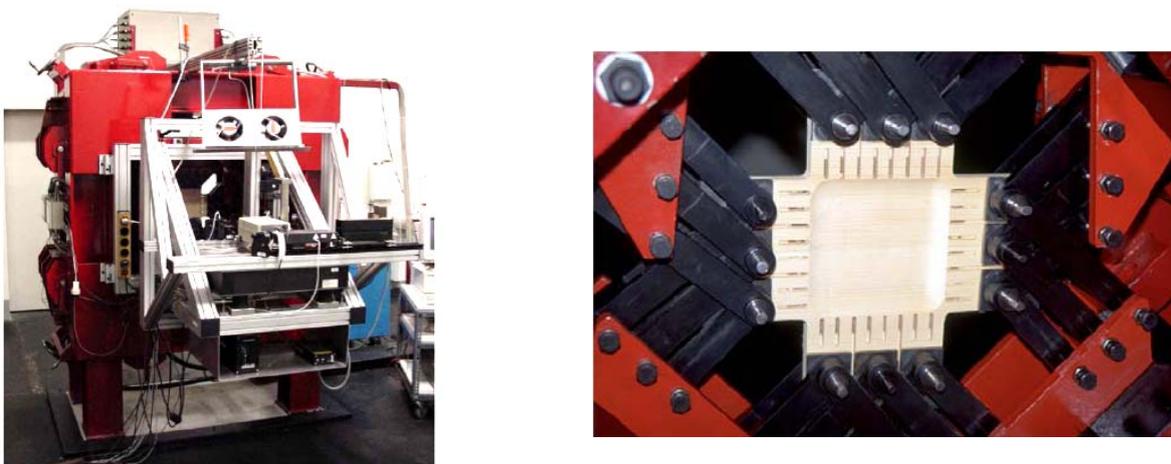


Figure 104 : Dispositif expérimental permettant de réaliser les essais de caractérisation biaxiaux du bois [EBE 2002]

1. CARACTERISATION MECANIQUE DU BOIS EN SOLLICITATION MIXTE : COMPRESSION TRANSVERSALE – TRACTION LONGITUDINALE

1.1. Protocole expérimental

Etant donné la complexité de réalisation d'un montage équivalent à celui de Eberhardsteiner à faible taux de densification, il est choisi de réaliser un protocole plus simple. Le protocole proposé se décompose en trois phases : une phase de densification transversale du bois, une phase de maintien du taux de déformation et une phase de traction longitudinale. Le protocole se découpe en neuf étapes qui sont résumées sur la figure 105 :

1. Usinage du bois brut en un parallélépipède rectangle de 20x12 mm² de section (dans les deux directions transversale) et de 300 mm de longueur (dans la direction longitudinale).
2. Profilage de l'éprouvette de telle manière à ce que sa section soit réduite de manière continue en son milieu.
3. Renforcement de l'éprouvette par de la fibre de verre collée sur ses faces extérieures ce qui permet d'assurer que la rupture se produise au milieu de l'éprouvette.
4. Compression de l'éprouvette profilée par l'intermédiaire de deux moules dont les profils sont complémentaires à ceux de l'échantillon.
5. Maintien du taux de déformation par un dispositif de serrage précontraint.
6. Mesure de la hauteur de l'éprouvette après compression ce qui permet de donner le taux de déformation réel de l'éprouvette.
7. Test en traction de l'ensemble éprouvette - dispositif permettant le maintien du taux de densification.
8. Une fois l'éprouvette cassée, elle est reformée et replacée dans le dispositif permettant la compression. La même charge de densification appliquée lors de l'étape 4 est injectée au système, le taux de déformation est maintenu et l'ensemble est testé à nouveau en traction. L'éprouvette ne présentant plus de résistance en traction longitudinale, seule les efforts de frottement parasites liés au dispositif expérimental sont mesurés.
9. La contrainte de rupture ramenée à la section avant compression est alors calculée en soustrayant la force maximum mesurée lors de l'étape 8 à celle mesurée lors de l'étape 7.

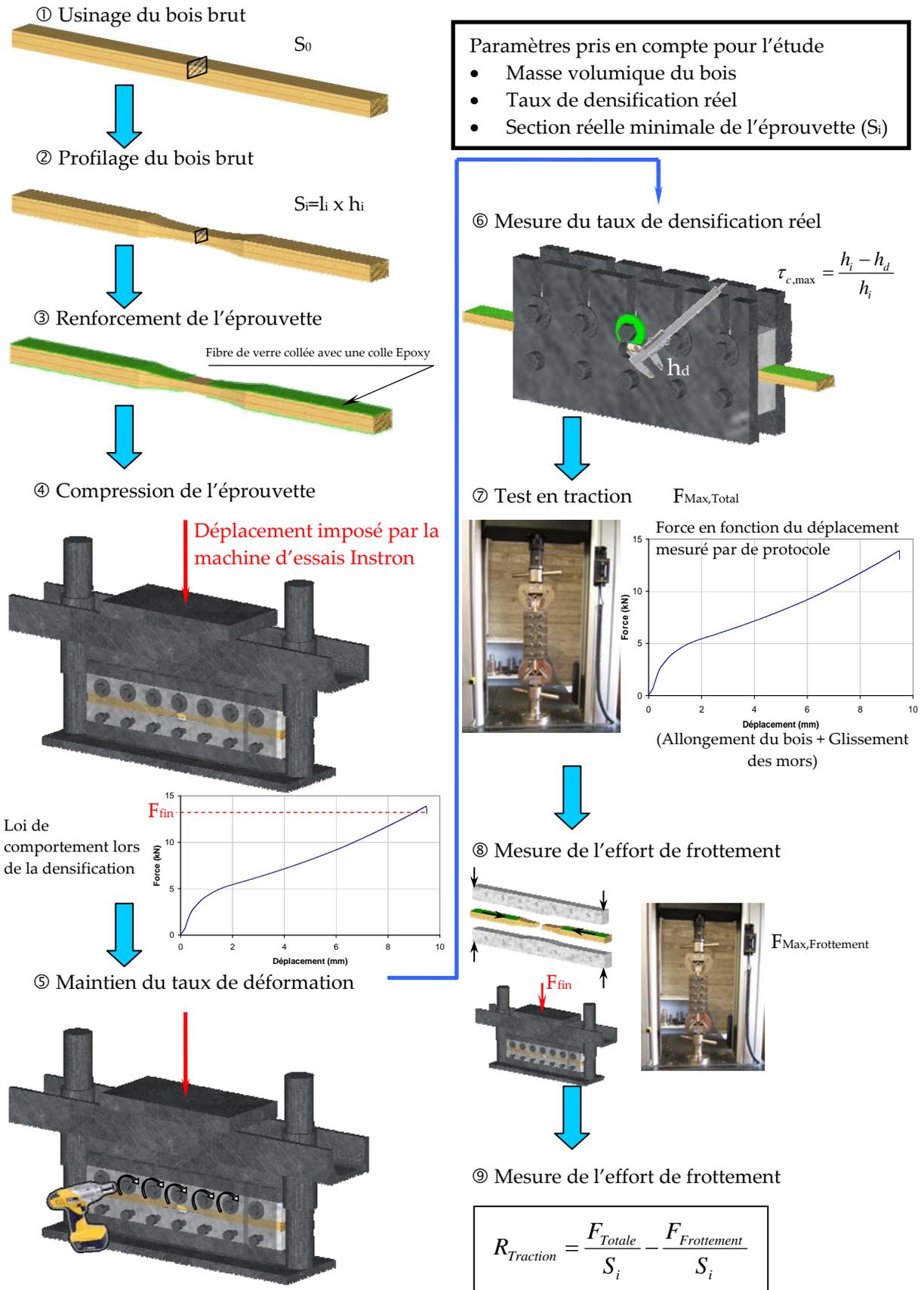


Figure 105 : Protocole expérimental permettant la caractérisation du bois en sollicitation mixte : compression transversale et traction longitudinale

1.1.1. Préparation des éprouvettes (Etape 1 à 3)

La préparation des éprouvettes commence par la réalisation de parallélépipèdes rectangles de 20x12 mm² de section et de 300 mm de longueur. L'orientation des cernes dans la section n'est pas prise en compte dans cette étude : la densification se fait de manière non différenciée dans la direction radiale ou tangentielle.

Le profil donné aux éprouvettes est adapté de celui proposé par Kultikova [KUL 1999] (Figure 66) pour le matériel expérimental mis à disposition lors de cette étude. Il est choisi de réaliser des éprouvettes de 300 mm de long (deux fois plus longues de celles de Kultikova) pour que le dispositif permettant de maintenir le taux de déformation soit efficace. La figure 106 donne les dimensions des éprouvettes de traction avant leur densification. Le profilage des éprouvettes permet d'assurer que la rupture se produise au milieu de l'échantillon au niveau d'une zone parallélépipédique centrale parfaitement calibrée (mesure précise de la section). De plus, le profil est réalisé de manière continue pour qu'il n'y ait pas d'amorce de rupture. Contrairement, aux éprouvettes proposées par Kultikova, celles réalisées pour cette étude possèdent deux profils : un dans chaque direction transversale. Ceci s'explique par le fait que le dispositif expérimental permettant le maintien du taux de déformation dans l'éprouvette impose des efforts de frottement parasites qui peuvent entraîner la rupture en dehors de la zone désirée si cette dernière n'est pas suffisamment réduite en section.

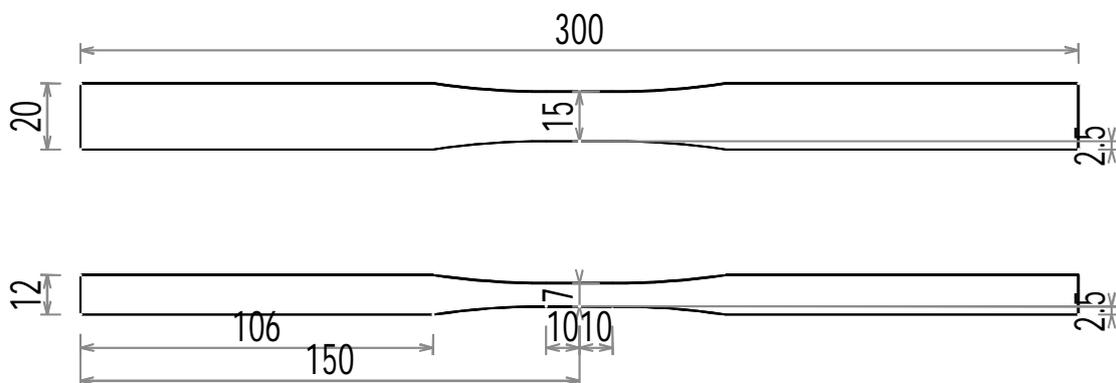


Figure 106 : Dimension des éprouvettes pour tester le bois densifié en traction longitudinale

Etant donné la longueur relativement importante des éprouvettes, il est difficile de garantir l'absence de défaut le long des 300 mm (absence totale de nœuds, fil du bois droit...). Aussi, pour contourner ce problème, il est choisi de coller sur la grande face de l'éprouvette (20 mm de large), de part et d'autre de la zone centrale linéaire de 20 mm une couche de fibre de verre de 1 mm collée par une colle époxy bicomposante (Figure 107). Cette étape est nécessaire pour que la charge de traction transite jusque dans la zone linéaire de l'éprouvette qui est constituée de bois sans défaut.

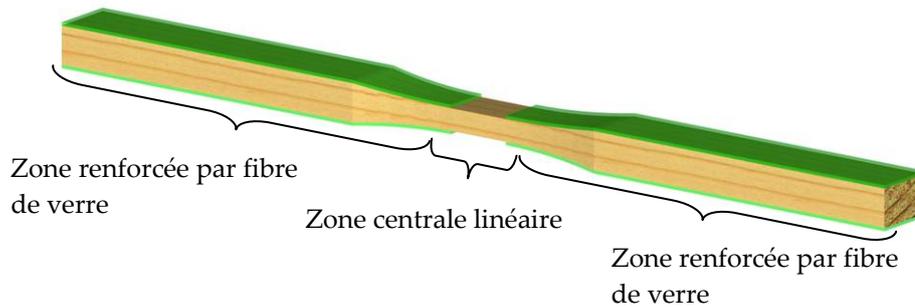


Figure 107 : Trois zones des éprouvettes de traction (sans densification)

Il est utile de préciser qu'avant toutes ces étapes, le bois est maintenu dans une atmosphère stable amenant son humidité relative à 12%. Après la première étape, les dimensions exactes ainsi que la masse de l'éprouvette sont mesurées pour en déduire sa masse volumique. Après l'étape de profilage, la section exacte de l'éprouvette dans sa partie linéaire est relevée pour le calcul de la contrainte de rupture.

1.1.2. Densification des éprouvettes (Etape 4)

Pour que la charge soit uniformément répartie sur l'éprouvette profilée, il est nécessaire de la placer entre deux moules aux profils complémentaires de ceux de l'éprouvette (Figure 108). Ces moules sont réalisés en aluminium à l'aide d'une fraiseuse à commande numérique. L'éprouvette repose sur le moule inférieur qui est fixe. Le moule supérieur est quant à lui mobile et permet d'appliquer sur l'éprouvette le taux de densification désiré. Pour que l'ensemble moules – éprouvette soit stable lors de la densification, celui-ci est disposé au milieu de deux ensembles de trois plaques métalliques (plaques de guidage 1, 2 et 3 de la figure 108). Ces dernières sont fixées à l'aide de boulons au moule inférieur. Le moule supérieur est guidé par des boulons montés libres dans des encoches réalisées dans les guidages ce qui lui permet de se déplacer verticalement.

Cet ensemble éprouvette – moules – plaques de guidage est placé dans un dispositif permettant à une machine d'essai universelle de type Instron d'appliquer au bois une contrainte de compression transversale. Ce dispositif est décrit sur la figure 108. Pour appliquer l'effort de compression, la machine est équipée d'une cellule de charges 100 ou 150 kN (précision $\pm 0,05$ kN) et est pilotée en déplacement. Ceci permet d'imposer précisément un déplacement au bois dans son sens transversal et donc de maîtriser au mieux le taux de déformation imposé. Cependant, les jeux dans le dispositif expérimental et dans la machine d'essai elle-même ne permettent pas d'imposer un taux de densification avec autant de précision souhaitée, c'est pourquoi une ouverture au milieu de la plaque de guidage n°2 est prévue pour mesurer la hauteur de l'éprouvette dans sa zone linéaire centrale (zone où la rupture en traction doit avoir lieu). Le taux de densification réel de l'éprouvette est ainsi déterminé.

CHAPITRE 3

CARACTERISATION DU BOIS EN SOLLICITATION MIXTE : TRACTION LONGITUDINALE COMPRESSION TRANSVERSALE

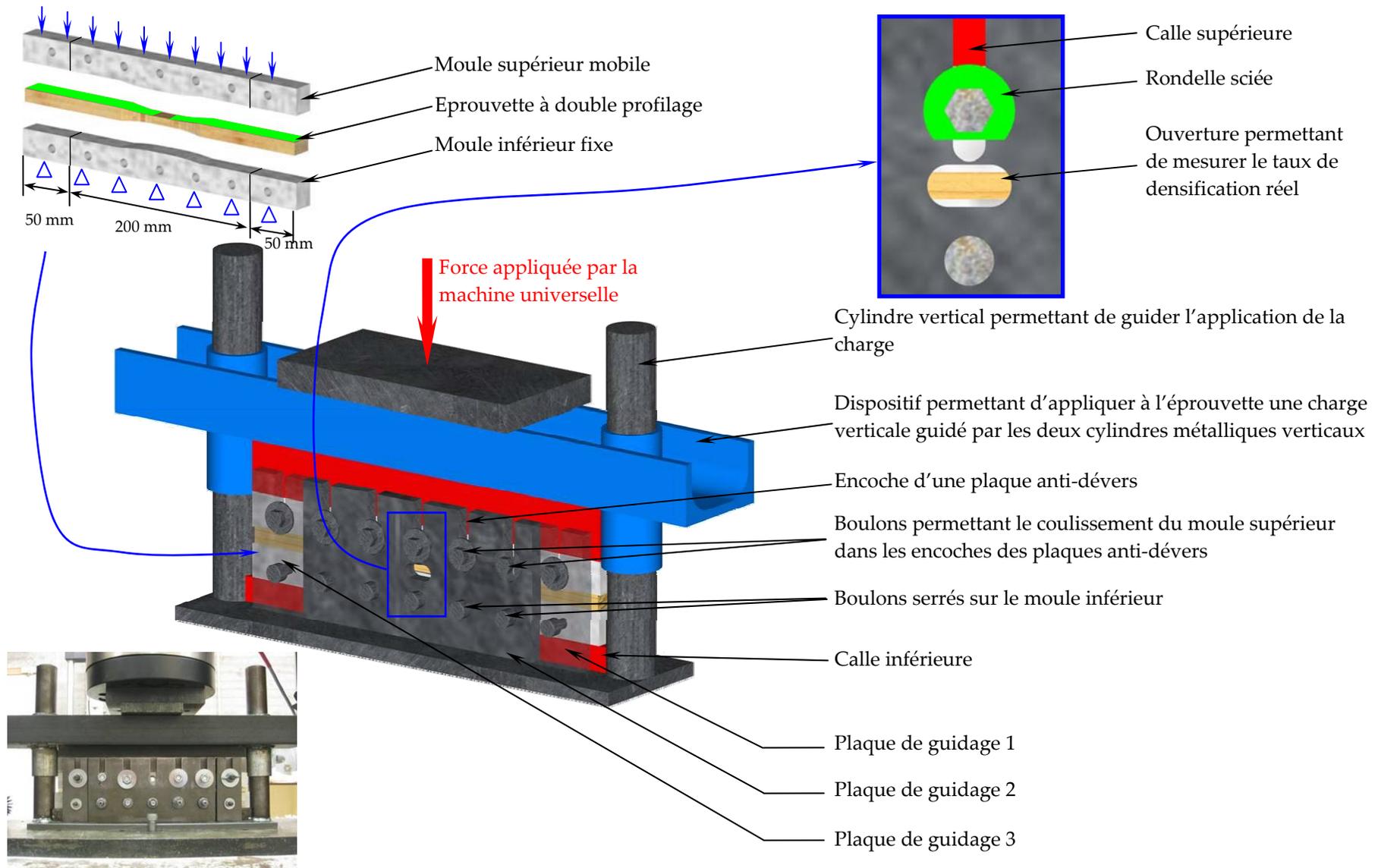


Figure 108 : Dispositif expérimental pour la densification du bois (étape 4 du protocole)

L'utilisation d'une machine d'essais avec capteur de charge permet de connaître également la force appliquée au matériau lors de sa compression. Cette charge augmente tout au long de la densification et une fois cette dernière terminée, le déplacement imposé est maintenu. La figure 109 montre que lors de cette dernière opération, la charge diminue au cours du temps ce qui s'explique par le fait que le bois est un matériau viscoplastique lorsqu'il est soumis à une compression transversale. La figure 109 montre qu'après 30 minutes d'attente, la contrainte de compression transversale diminue très lentement. Ainsi, il est montré qu'il est possible de s'affranchir du paramètre temps de pressage en maintenant la déformation pendant 30 minutes puisque après ce temps, la contrainte dans l'éprouvette est stable (à l'échelle de temps de l'essai).

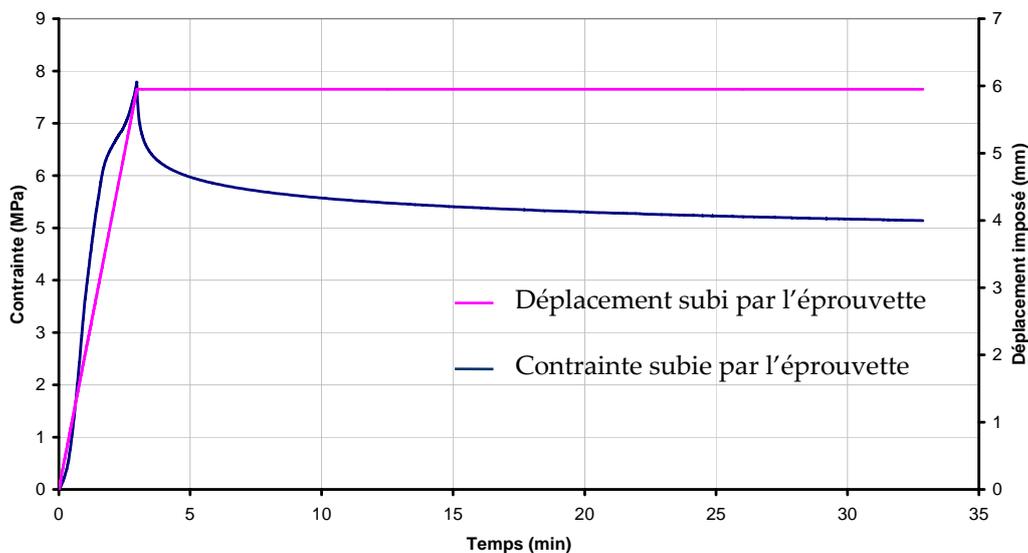


Figure 109 : Evolution de la contrainte de compression transversale pour un déplacement imposé.

1.1.3. Maintien et mesure du taux de déformation de l'éprouvette (Etapas 5 et 6)

Une fois que l'éprouvette a atteint le taux de densification désiré et que la contrainte dans le matériau bois est stable, les boulons liant le moule supérieur à la plaque de guidage n°2 sont serrés à l'aide d'une clé à chocs (durant cette opération la charge appliquée par la machine d'essais est maintenue). Cette étape permet de maintenir le taux de déformation imposé à l'éprouvette de bois. La charge appliquée par la machine d'essai est alors supprimée. Les calles ainsi que les plaques de guidage 1 et 2 sont retirées. Il ne reste alors plus que l'éprouvette, les moules et les plaques de guidage 2 (Figure 110).

Grâce à l'ouverture dans une des deux plaques de guidage n°2, il est possible de mesurer la hauteur finale de l'éprouvette grâce à un pied à coulisse. Le taux de densification se calcule comme le rapport entre la variation de hauteur de l'éprouvette de bois dans la partie centrale linéaire avant et après densification et la hauteur de bois avant densification.

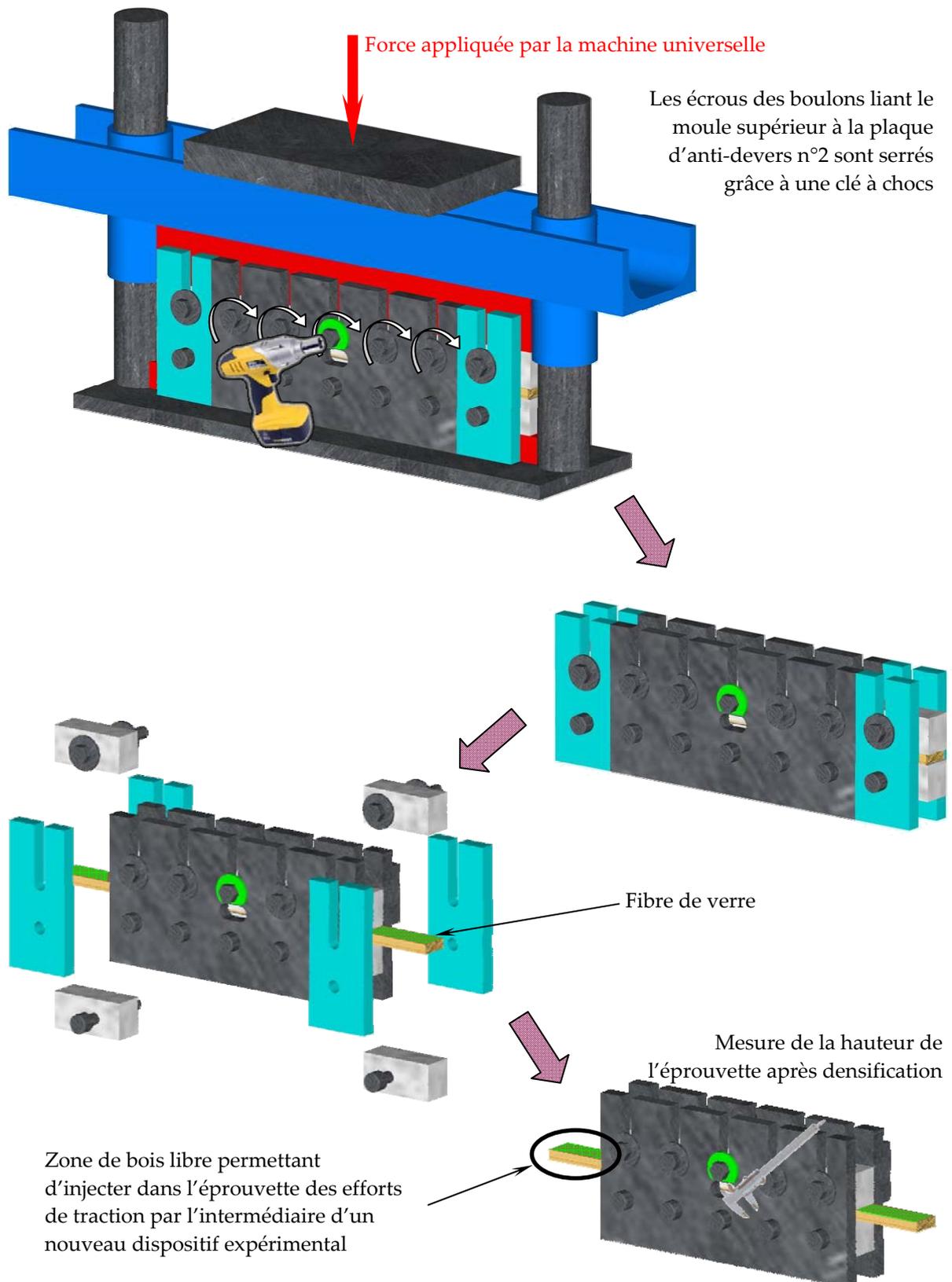


Figure 110 : Différentes étapes pour le maintien et la mesure du taux de déformation dans les éprouvettes de bois

1.1.4. Test en traction de l'éprouvette sous contrainte de compression transversale (Etapas 7)

L'ensemble éprouvette – moule – plaques de guidage présente à chacune de ses extrémités du bois « libre ». Par l'intermédiaire de ces extrémités, un effort de traction est injecté dans l'éprouvette et grâce au renforcement par fibre de verre, cet effort se transmet jusqu'à la zone linéaire au milieu de l'éprouvette.

Le dispositif expérimental pour solliciter l'ensemble en traction longitudinale est proche de celui employé par Kultikova [KUL 1999] (Figure 66). Une machine d'essai universelle de type Instron avec une cellule de charge de 30 kN (précision $\pm 0,05$ kN) est munie sur son bâti d'une pince fixe et sur sa traverse d'une pince mobile. Ces deux pinces permettent d'injecter l'effort de traction dans le bois entouré du dispositif imposant un taux de densification (Figure 111 (a)).

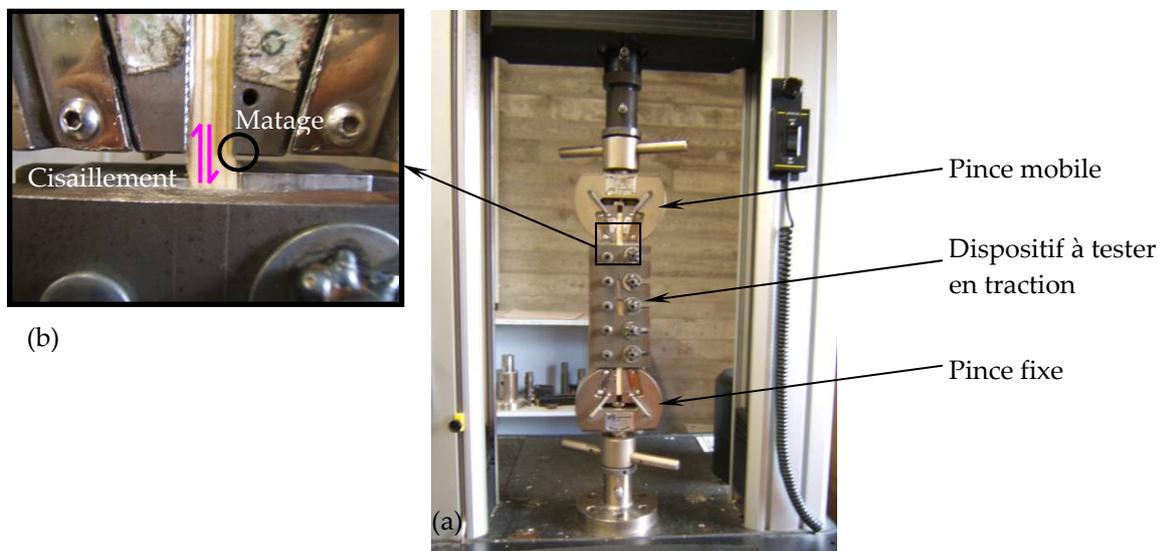


Figure 111 : Dispositif expérimental permettant de tester le bois contraint en compression transversale en traction longitudinale

(a) Vue d'ensemble

(b) Détail sur la liaison entre une pince et l'éprouvette de bois

Sur le détail (b) de la figure 111, il est possible de voir qu'au niveau de la zone de préhension de la pince sur le bois, il y a présence d'efforts parasites de cisaillement et un matage important du matériau en compression transversale. Ces efforts parasites sont toujours présents avec ce type de montage même pour les éprouvettes témoins (sans le montage de compression transversale) : dans ce cas, ces efforts parasites ne sont pas problématiques lorsque l'éprouvette est profilée et la rupture apparaît bien en traction longitudinale. Dans le cas du protocole proposé, étant donné les efforts non négligeables de frottement dans la zone de bois comprimée qui s'ajoutent à la résistance en traction du matériau, la résistance du bois dans la direction longitudinale est augmentée et la rupture peut apparaître par cisaillement au niveau des pinces. Le fait de renforcer les éprouvettes de part et

d'autre de leur zone linéaire centrale par de la fibre de verre et de réduire leur section centrale par un double profilage permet de contourner ce problème.

Le protocole tel qu'il est proposé ici ne permet pas de mesurer l'allongement de l'éprouvette pour en déduire un module d'élasticité. La machine d'essai permet de mesurer la force de traction injectée dans le système.

1.1.5. Mesure des efforts parasites de frottement (Etape 8)

La force de traction mesurée précédemment prend en compte à la fois la résistance en traction de l'éprouvette mais également les efforts de frottement entre l'éprouvette et les moules. Ainsi, il est nécessaire d'estimer ces efforts de frottement parasites pour connaître la résistance en traction longitudinale du bois densifié transversalement.

Il est choisi de mesurer la force de frottement pour chaque éprouvette testée. Pour se faire, après rupture en traction (étape 7), l'éprouvette est reconstituée et remise dans le montage de compression (Figure 112). Une charge égale à celle appliquée en fin de cycle présenté sur la figure 109 est fournie à l'éprouvette et l'ensemble éprouvette – moules – plaques d'anti-dévers est bloqué puis testé en traction. L'éprouvette ayant déjà subi une rupture en traction, elle n'a plus de résistance pour cette sollicitation. L'effort de traction mesuré alors correspond à la force de frottement entre l'éprouvette et les moules.



Figure 112 : Différents profils de rupture observés après les essais de traction

1.1.6. Calcul de la résistance en traction longitudinale du bois contraint en compression transversale (Etape 9)

Pour mesurer l'influence de la compression transversale sur la résistance en traction longitudinale du bois, il est nécessaire de pouvoir comparer cette résistance à des éprouvettes témoins, c'est-à-dire des éprouvettes n'ayant pas subi de compression. Des essais de traction longitudinale sont réalisés sur des éprouvettes préparées selon le même procédé que pour le protocole de la figure 105 (Etape 1 à 3). Ces éprouvettes sont testées en traction longitudinale avec le même procédé que

l'étape 7 de la figure 105 sauf que la zone linéaire des éprouvettes est dans ce cas munie d'un extensomètre capable de mesurer la déformation du bois. Dans le cas des éprouvettes témoins, la contrainte ultime du matériau bois en traction longitudinale est mesurée comme la force maximum atteinte lors du test en traction divisé par la surface de l'éprouvette dans la zone linéaire centrale.

Pour le calcul de la capacité résistante en traction longitudinale du bois sous contrainte transversale, la force prise en compte est la force maximale mesurée lors de l'étape 7 moins celle mesurée lors de l'étape 8. Pour mesurer l'influence de la compression transversale sur la résistance du bois en traction longitudinale, il est choisi de calculer la contrainte non pas en divisant cet effort de traction par la surface réelle de l'éprouvette mais par celle avant densification. Par ce procédé, il est possible de comparer la résistance du bois à celle du bois sous contrainte transversale à différents taux de densification.

1.2. Essais réalisés

En tout 216 éprouvettes sont testées : 177 sont des éprouvettes densifiées et 39 sont des éprouvettes témoins. Ces 216 éprouvettes se répartissent en trois groupes suivant leur masse volumique ; cette répartition est résumée dans le tableau 10.

Lots	Masse volumique (kg/m ³)	Nombre d'éprouvettes		
		Totales	Témoins	Densifiées
Lot 1	$360 \leq \rho \leq 420$	67	14	53
Lot 2	$420 < \rho < 460$	65	11	54
Lot 3	$460 \leq \rho \leq 520$	83	14	69

Tableau 10 : Répartition des 216 éprouvettes testées pour mesurer l'influence de la contrainte de compression transversale sur la résistance en traction longitudinale du bois

1.3. Résultats et analyse

Chaque essai réalisé peut se résumer comme un point sur un graphique donnant la résistance en traction longitudinale en fonction du taux de densification de l'éprouvette. Ainsi, pour chaque lot (correspondant à des éprouvettes aux masses volumiques et donc à des propriétés mécaniques relativement proches), un graphique de ce genre est réalisé. En parallèle de ces points est ajoutée la loi de comportement du bois en compression transversale. Cette loi est donnée à partir de la formule [4] du Chapitre 2 pour un bois sollicité transversalement et ayant une masse volumique de 390 kg/m³ pour le Lot 1, 440 kg/m³ pour le Lot 2 et 490 kg/m³ pour le Lot 3.

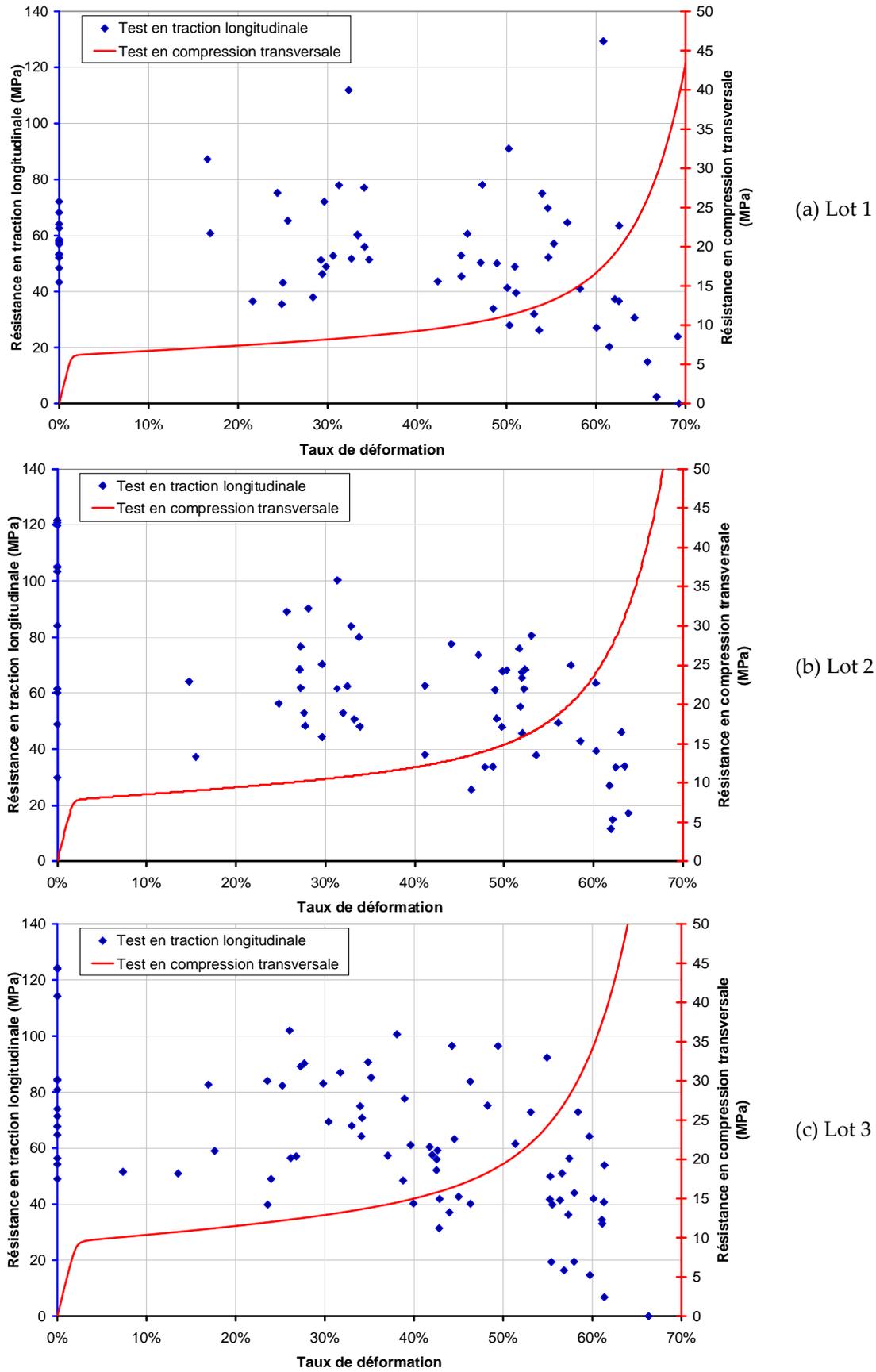


Figure 113 : Influence du taux de densification transversale du bois sur sa résistance en traction longitudinale

La première remarque qu'il est possible de formuler en analysant les résultats de la figure 113 est que, quel que soit le taux de densification (noté τ_{dens} dans la suite du document) pris en compte, la dispersion des résultats est assez importante. Ainsi, pour les éprouvettes témoins ($\tau_{dens} = 0\%$) les coefficients de variation trouvés pour les lots 1 à 3 valent respectivement 13%, 37% et 30%. De plus en traçant la résistance des éprouvettes témoins en fonction de leur masse volumique, le coefficient de corrélation n'est que de 18% (Figure 114). Etant donné que le taux de dispersion des résultats trouvés est aussi important pour les éprouvettes témoins que pour les éprouvettes comprimées, le protocole n'est pas remis en cause.

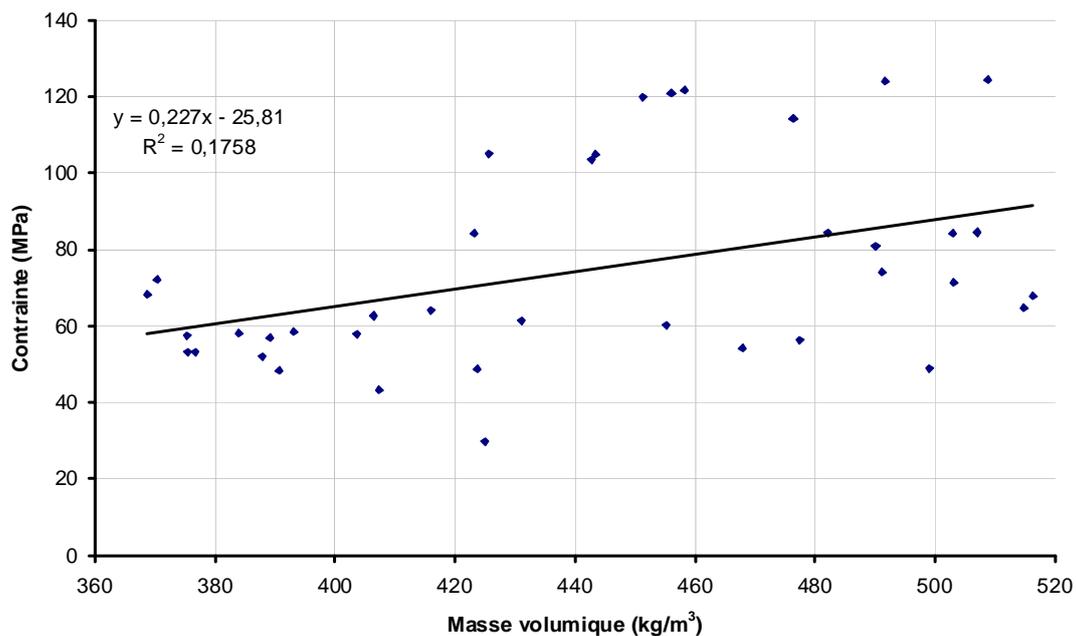
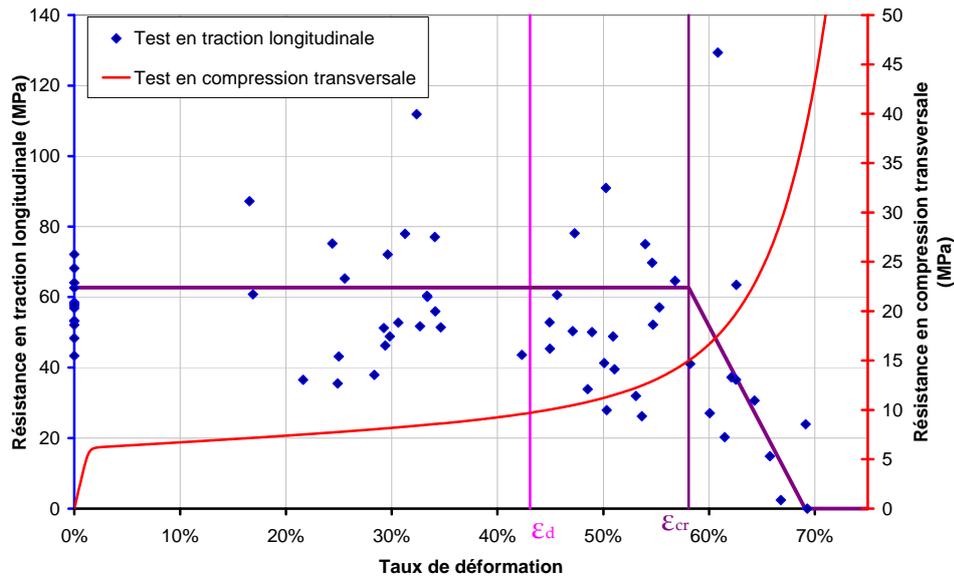


Figure 114 : Résistance du bois en traction longitudinale en fonction de sa masse volumique

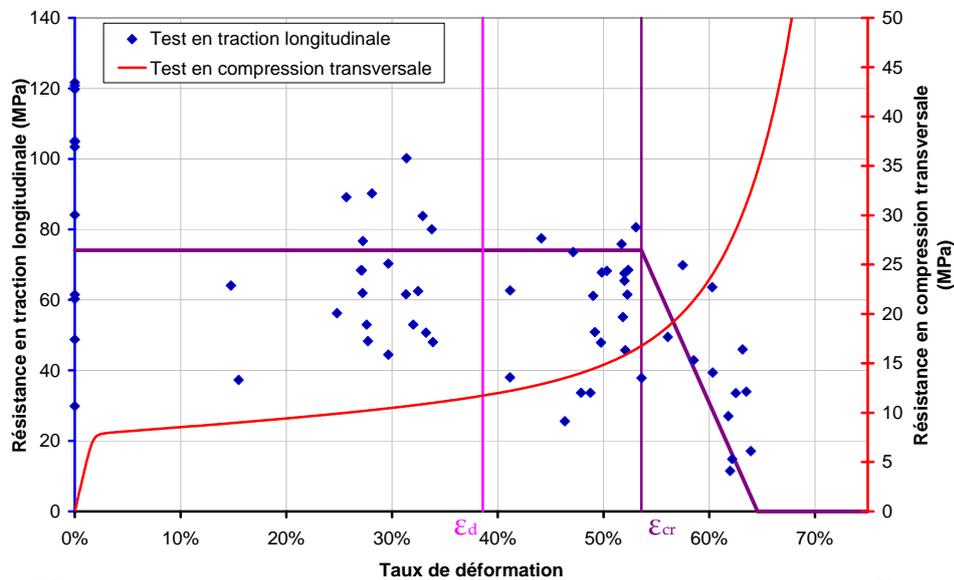
Pour les trois lots, la résistance en traction longitudinale ne change pas tant que le taux de compression ne franchit pas un « point critique ». Une fois ce point critique dépassé, la résistance du bois d'Épicéa chute rapidement pour atteindre une valeur nulle ou presque. Ce point critique correspond à la zone C de la figure 15 c'est-à-dire à l'étape de densification proprement dite. Pour déterminer ce point critique, il est choisi de se baser à partir du taux de densification ε_d défini dans le paragraphe 2.2.5 du Chapitre 2. Ce point est défini comme étant le début de la phase de densification proprement dite (Figure 96).

Sur la figure 115 sont représentés la résistance en traction longitudinale du bois sous différente contrainte de compression transversale, le comportement du bois en compression transversale ainsi que le point ε_d . Ce dernier est calculé à partir de la masse volumique moyenne des différents lots (notée ρ) par la formule :

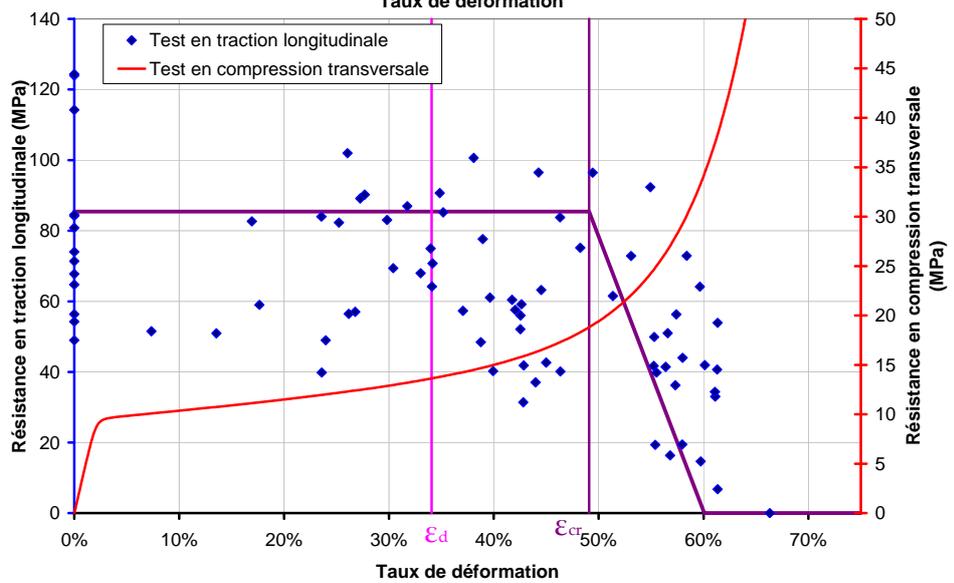
$$\varepsilon_d = -9.10^{-4} \rho + 0,7818.$$



(a) Lot 1



(b) Lot 2



(c) Lot 3

Figure 115 : Proposition d'une loi de comportement en trois parties linéaires du bois sous contrainte de compression transversale en traction longitudinale

Au regard de la figure 115, il est clair que le point critique ne correspond pas à un taux de densification ε_d , c'est-à-dire ne correspond pas au début de la densification proprement dite. Ce point critique se produit à un taux de densification plus élevé : en moyenne à un taux de densification valant : $\varepsilon_{cr} = \varepsilon_d + 0,15$.

A partir de la détermination de ce point critique, il est possible de définir une loi de comportement linéaire en trois parties. La première partie se situe avant ce point critique : dans ce cas la résistance en traction longitudinale de l'éprouvette est égale à sa résistance sans contrainte de compression transversale. La deuxième partie est une zone de transition où la résistance en traction longitudinale diminue de manière linéaire entre ε_{cr} et $\varepsilon_{cr} + 0,11$. Au-delà de ce taux de densification, la résistance du matériau en traction longitudinale est nulle. La résistance moyenne en traction longitudinale sous contrainte de compression ε est notée $f_{t,0,mean}^\varepsilon$ et se calcule par la formule [5].

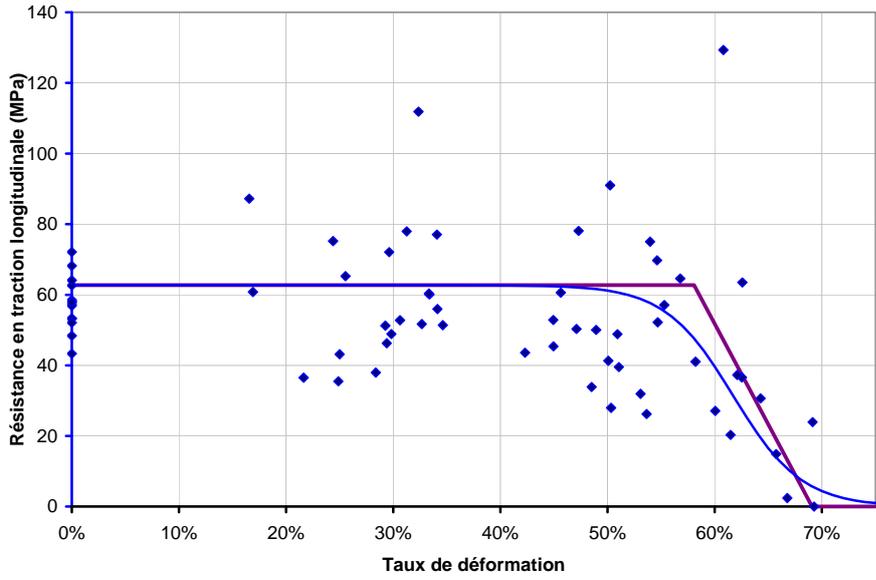
$$\begin{aligned} \text{Si } \varepsilon \leq \varepsilon_d(\rho) + 0,15 & \Rightarrow f_{t,0,mean}^\varepsilon(\rho) = f_{t,0,mean}^{\varepsilon=0}(\rho) \\ \text{Si } \varepsilon_d(\rho) + 0,15 < \varepsilon \leq \varepsilon_d(\rho) + 0,26 & \Rightarrow f_{t,0,mean}^\varepsilon(\rho) = \frac{f_{t,0,mean}^{\varepsilon=0}(\rho)}{0,11}(\varepsilon_d(\rho) + 0,26 - \varepsilon) \\ \text{Si } \varepsilon > \varepsilon_d(\rho) + 0,26 & \Rightarrow f_{t,0,mean}^\varepsilon(\rho) = 0 \end{aligned} \quad [5]$$

avec $f_{t,0,mean}^{\varepsilon=0}$ la résistance en traction longitudinale du bois non sollicité en compression transversale et qui peut être définie en fonction de la masse volumique du matériau par la formule $f_{t,0,mean}^{\varepsilon=0} = 0,227 \rho - 25,81$ pour des éprouvettes ayant une masse volumique comprise entre 360 et 520 kg/m³.

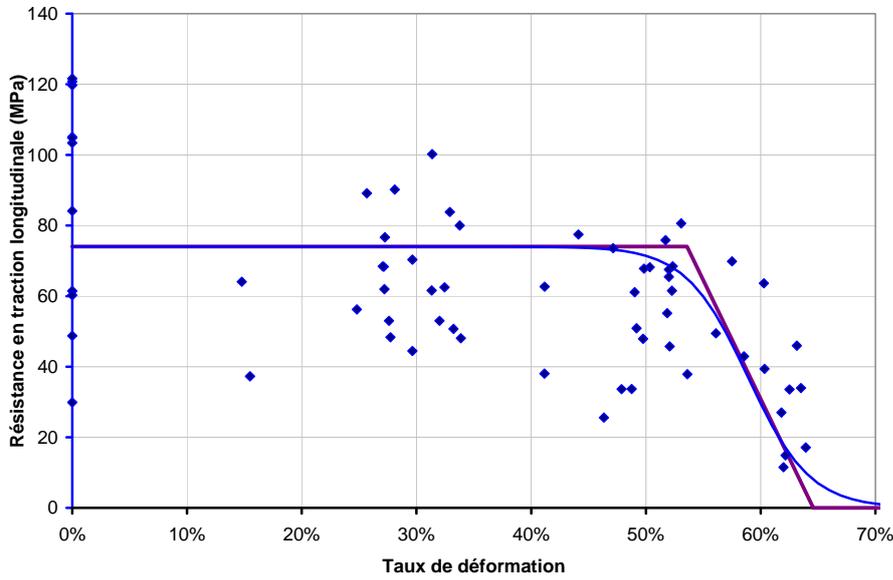
Une forme d'équation continue peut également être proposée pour décrire la résistance en traction longitudinale du bois d'Épicéa sollicité en compression transversale. Dans ce cas, avec les mêmes notations que précédemment, cette résistance se calcule par la formule [6].

$$f_{t,0,mean}^\varepsilon = f_{t,0,mean}^{\varepsilon=0}(\rho) \times \left(\frac{\exp\left(\varepsilon - (f_{t,0,mean}^{\varepsilon=0}(\rho))^{0,716}\right) - 1}{\exp\left(\frac{f_{t,0,mean}^{\varepsilon=0}(\rho)}{2} \varepsilon - (f_{t,0,mean}^{\varepsilon=0}(\rho))^{0,716}\right) + 1} \right) \quad [6]$$

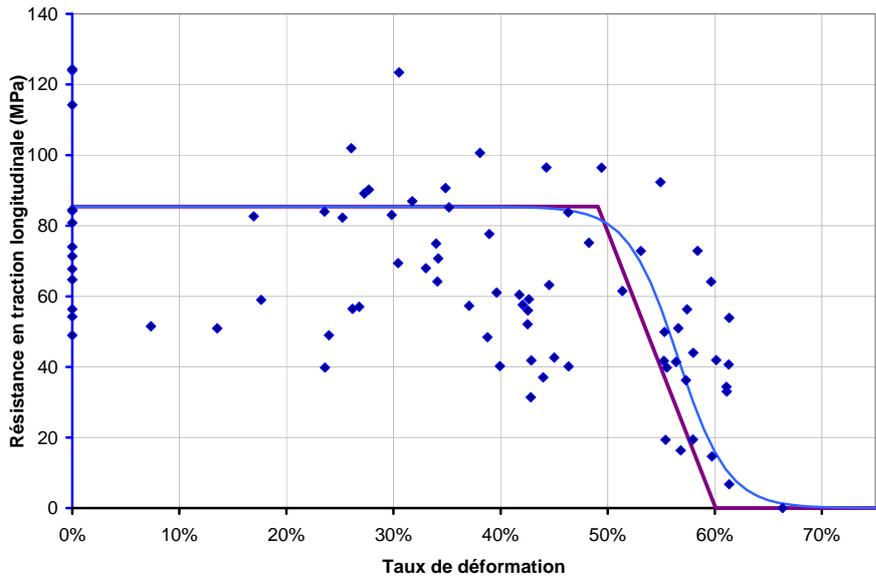
Les données expérimentales de la résistance du bois d'Épicéa en sollicitation mixte traction longitudinale compression transversale ainsi que les deux formulations mathématiques proposées pour décrire ce comportement sont résumées sur la figure 116.



(a) Lot 1



(b) Lot 2



(c) Lot 3

Figure 116 : Données expérimentales sur la résistance du bois en sollicitation mixte et formulations mathématiques de ce comportement

1.4. Critiques du protocole expérimental

Le protocole proposé prévoit trois phases bien distinctes : une phase de densification, une phase de mesure de la résistance en traction de l'éprouvette avec les efforts parasites de frottement et une phase où les efforts de frottement sont mesurés. A chacune de ces étapes, des erreurs de mesures apparaissent inévitablement ce qui risque d'augmenter la variabilité des résultats.

De plus, le dispositif expérimental ne permet pas de maintenir un effort de compression durant l'essai de traction mais seulement un taux de déformation. Etant donné le caractère viscoplastique du matériau et le réarrangement des contraintes lors de la sollicitation mixte de l'éprouvette, ce protocole est discutable. Pour une caractérisation complète, il serait nécessaire de réaliser les essais de traction sur des éprouvettes de plus grandes tailles et sollicitées en compression transversale en même temps que l'essai de traction. Cette caractérisation demanderait des investigations bien plus poussées qu'il n'a pas été possible de mener. Cependant, les résultats obtenus semblent satisfaisants et correspondent aux données bibliographiques : d'après Eberhardsteiner [EBE 2002], la compression transversale n'a pas d'influence sur la résistance en traction longitudinale tant que la contrainte de compression ne dépasse pas le plateau de densification et d'après Perkitny et Jablonski [PER 1984], au-delà de 50% de densification (après le plateau de densification), la résistance du bois est fortement altérée.

Lors de la phase de densification, le fait d'avoir réalisé un double profilage de l'éprouvette lui donne un degré de liberté supplémentaire : dans la zone centrale linéaire, la matière peut s'écouler dans la direction perpendiculaire à la force de compression appliquée. Ce phénomène est le même lors de la densification du bois pour la réalisation des assemblages précontraints. Cependant, lorsque la contrainte de compression est importante (dans la phase de densification proprement dite), le fait que la matière ne soit pas confinée a une influence sur l'éprouvette (Figure 117) : la matière s'écoule de manière importante sur les bords. Comme les échantillons proposés sont de petites tailles, cet effet de bord n'est pas négligeable contrairement à des éprouvettes de grandes tailles.



« Bourrelet » de matière dans la zone linéaire centrale de l'éprouvette non confinée après une compression de l'ordre de 75%

Figure 117 : Problème lié au double profilage de l'éprouvette : fluage important de la matière lors de la phase de densification

Pour limiter les problèmes de mesures liés à la dispersion des résultats et pour mesurer l'influence de cet effet de bord, un nouveau protocole expérimental est proposé (protocole B). Dans celui-ci, le test en traction se fait sur des éprouvettes densifiées c'est-à-dire ayant subit une compression mais qui ne sont plus sous contrainte. De plus, pour aller plus loin dans les investigations et comprendre à quoi correspond le seuil critique ϵ_{cr} , des observations au microscope électronique à balayage (MEB) sont réalisées. Ces différentes étapes sont résumées sur la figure 118.

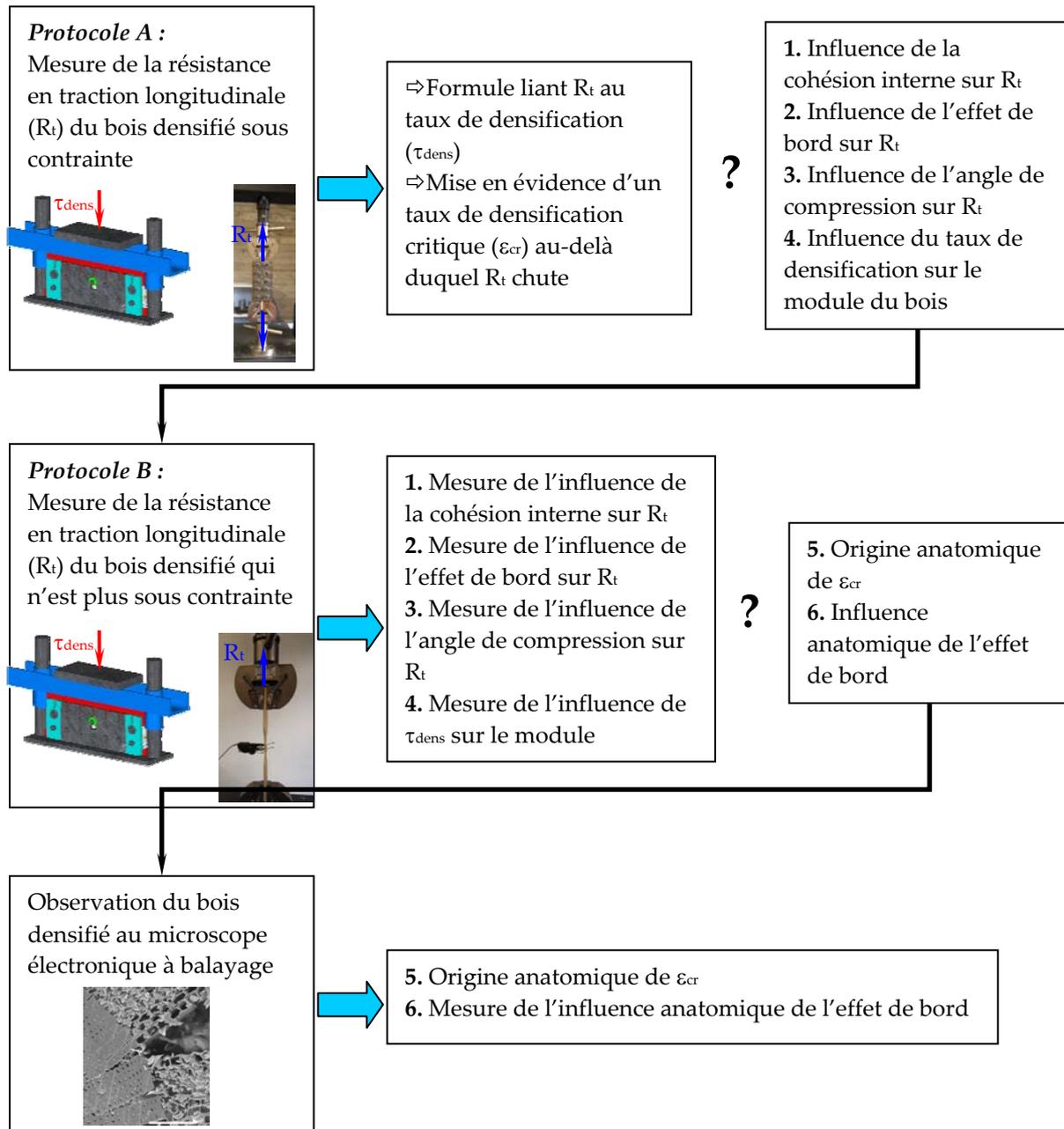


Figure 118 : Récapitulatif des différentes étapes réalisées pour caractériser l'influence de la compression transversale sur la résistance en traction longitudinale du matériau bois

2. CARACTERISATION MECANIQUE DU BOIS DENSIFIE MECANIQUEMENT A FROID EN TRACTION LONGITUDINALE

Dans la partie 1 de ce Chapitre, un protocole expérimental est décrit. Il permet de réaliser une campagne d'essai sur trois lots d'éprouvettes pour caractériser le bois en sollicitation mixte compression transversale traction longitudinale. Il est appelé protocole A. Un nouveau protocole expérimental est imaginé : le protocole B (Figure 118). Ce dernier consiste à densifier transversalement le bois et le tester après relâchement en traction longitudinale. Il est réalisé sur un seul lot d'éprouvettes : des éprouvettes ayant une masse volumique comprise entre 360 et 420 kg/m³ ce qui correspond au lot 1 du protocole A. Le protocole B permet de confirmer les résultats obtenus précédemment mais permet surtout de répondre aux trois problématiques décrites ci-dessous.

Tout d'abord, lors des essais de tractions réalisés en respectant le protocole A, il faut souligner que comme le taux de densification est maintenu constant dans l'éprouvette, il existe une cohésion interne importante. Du fait de cette cohésion, les trachéides sont maintenues ensemble pour des sollicitations plus importantes. Cette cohésion interne a peut-être une influence sur la résistance du bois en traction longitudinale. En comparant les résultats obtenus entre les deux protocoles expérimentaux, il est possible de quantifier l'influence éventuelle de ce paramètre.

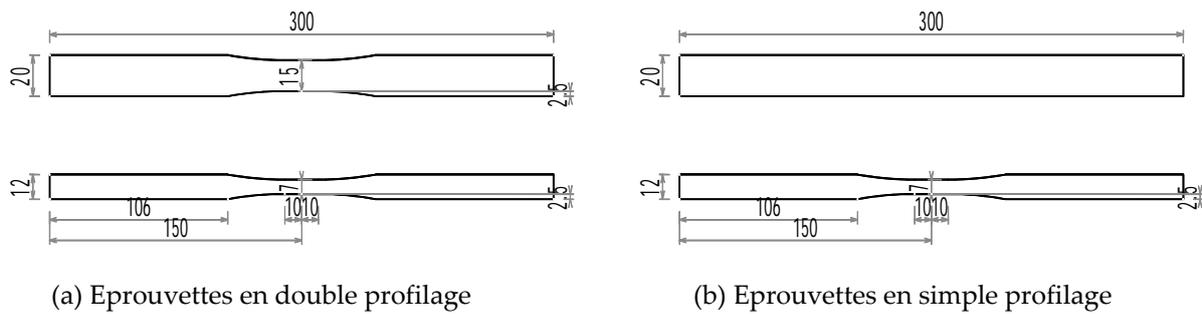
De plus, le fait de confiner ou ne pas confiner les éprouvettes lors de leur densification peut avoir des conséquences sur leur résistance en traction longitudinale. Aussi, pour mesurer ce facteur, des éprouvettes densifiées avec ou sans confinement sont réalisées, testées et les résultats obtenus sont comparés.

Le protocole B permet de mesurer le module d'élasticité du bois densifié : l'influence de la densification du bois est donc vérifiée sur ce paramètre.

Enfin, jusqu'alors l'angle de la densification n'a pas été pris en compte. Ce paramètre est mesuré et analysé lors du protocole B.

2.1. Protocole expérimental

Le protocole expérimental B utilise le même matériel que le protocole A. Il se déroule en huit étapes comme le montre la figure 123. Les quatre premières étapes sont pour la fabrication et la caractérisation des éprouvettes. Deux types d'éprouvettes sont réalisés : des éprouvettes en double profilages avec la même géométrie que celles utilisées lors du protocole précédent (Figure 106) et des éprouvettes en simple profilage (Figure 119 (b)).



(a) Eprouvettes en double profilage

(b) Eprouvettes en simple profilage

Figure 119 : Deux types d'éprouvettes testées pour caractériser l'influence de la densification mécanique à froid du bois sur sa résistance en traction longitudinale

Lors de l'étape 1, l'éprouvette est mesurée et pesée ce qui permet d'en déduire sa masse volumique. Lors de l'étape 2 sa section minimale est mesurée ce qui permet de calculer la contrainte de traction dans la partie linéaire centrale de l'échantillon. L'étape 3 est une étape supplémentaire au regard du protocole A et permet de mesurer l'angle du fil du bois par rapport à la direction de l'effort de compression transversale. Un angle α est alors défini comme l'indique la figure 120. La mesure de cet angle permet de quantifier l'influence éventuelle de la direction de la compression sur la résistance du bois densifié en traction longitudinale. Etant donné la grande dispersion des résultats obtenus lors du protocole précédent, ce paramètre est difficile à prendre en compte.



Figure 120 : Définition de l'angle α

Les étapes 5 et 6 correspondent aux phases de densification et à la mesure du taux de densification précisément imposé au matériau. Ces deux étapes se déroulent de la même manière que pour le protocole précédent pour les éprouvettes à double profilage. Pour les éprouvettes à simple profilage, la matière doit être confinée, aussi l'ouverture prévue pour mesurer la hauteur de bois après densification est obstruée. Dans ce cas, la mesure du taux de densification est réalisée comme l'indique la figure 121.

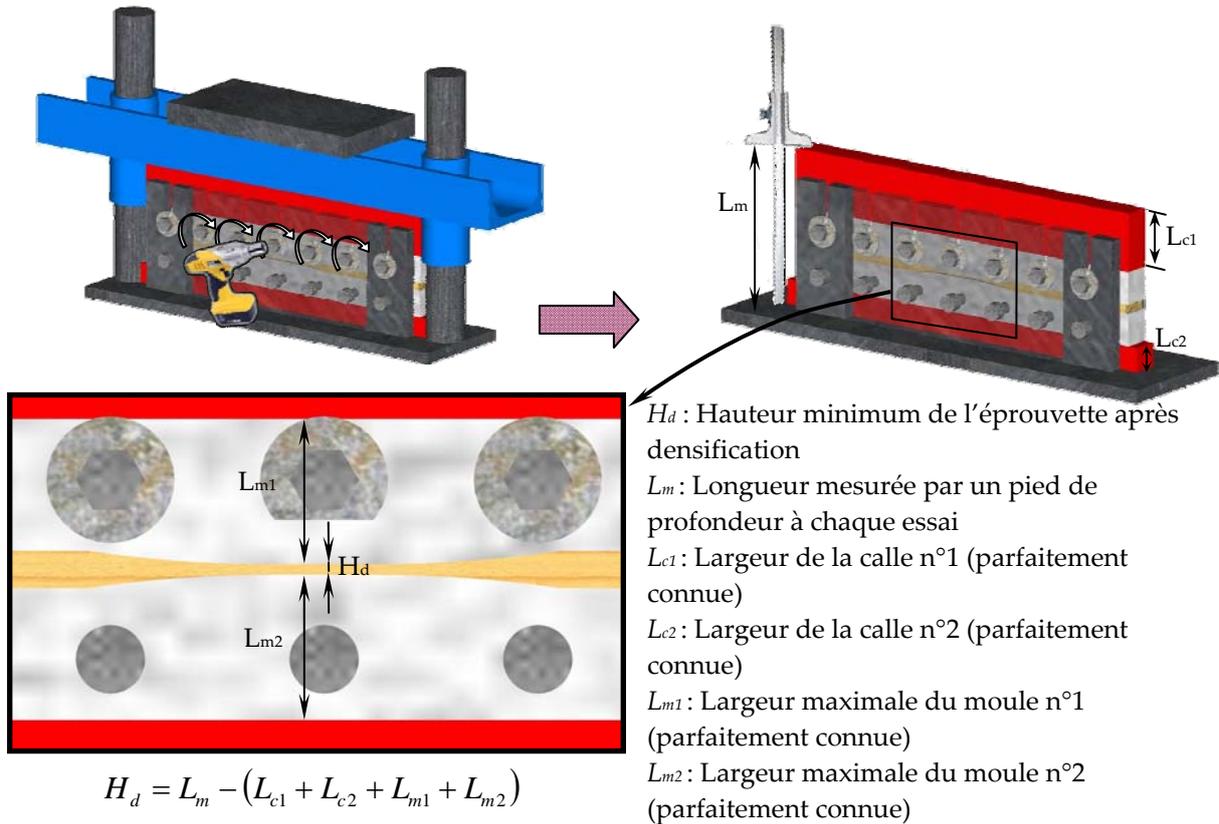


Figure 121 : Mesure du taux de densification du bois pour les éprouvettes confinées

Une fois la mesure du taux de densification réel appliqué à l'éprouvette réalisée, cette dernière est relâchée. Le dispositif expérimental utilisé pour le protocole A est reconduit pour solliciter l'éprouvette en traction longitudinale (Figure 122). Une cellule de charge de 30 kN (précision $\pm 0,05$ kN) est utilisée pour calculer la force dans l'éprouvette. Au moment de la rupture, cette force est divisée par la section de l'éprouvette avant densification ce qui donne la résistance de l'éprouvette en traction longitudinale. L'allongement de la matière est mesuré par l'intermédiaire d'un extensomètre.

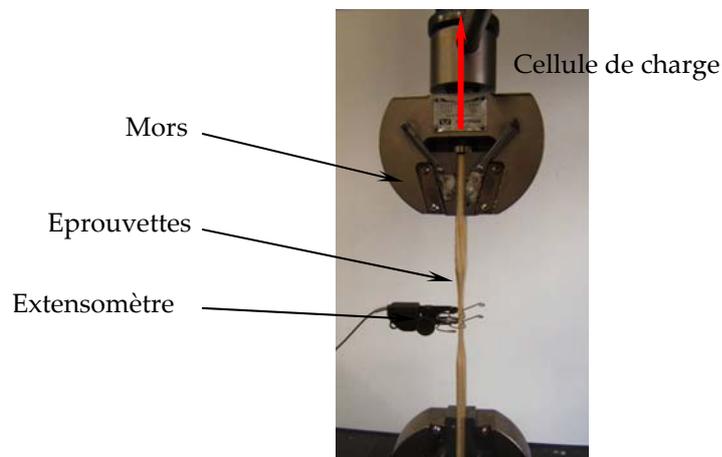


Figure 122 : Montage permettant d'appliquer l'effort de traction sur l'éprouvette densifiée et permettant de mesurer son allongement

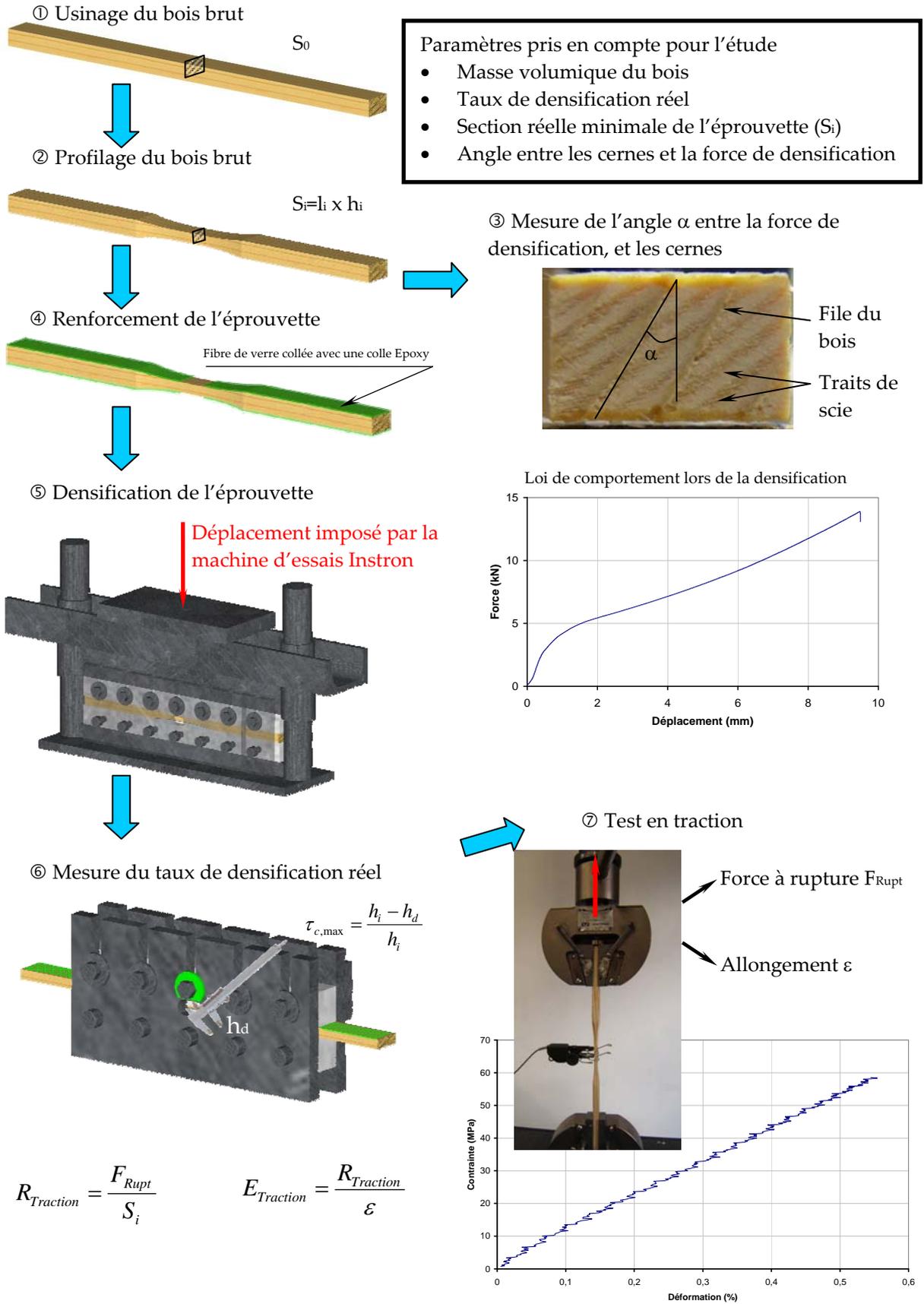


Figure 123 : Présentation des différentes étapes du protocole expérimental employé pour caractériser le bois densifié en traction longitudinale

2.2. Influence de la cohésion interne sur la résistance du bois densifié en traction longitudinale

Dans le protocole A, le montage autour de l'éprouvette permet de maintenir un taux de densification constant lors de l'essai de traction. Ce montage ajoute à l'éprouvette des efforts de frottement qui sont pris en compte dans le calcul de la résistance mais également des efforts de cohésions internes des trachéides. Pour une éprouvette avec un double profilage réalisée en respectant le protocole B, lors du test en traction longitudinale, il n'y a pas de cohésion interne. L'influence de ce paramètre peut être mesurée en comparant les résultats du lot 1 issus du protocole A avec les résultats des éprouvettes à double profilage du protocole B.

Il est possible de reporter la résistance en traction longitudinale du bois densifié issu du protocole B sur le même genre de graphique que ceux de la figure 113. Dans ce cas, l'allure de ce graphique est le même que ceux de la campagne d'essais précédente (Figure 124).

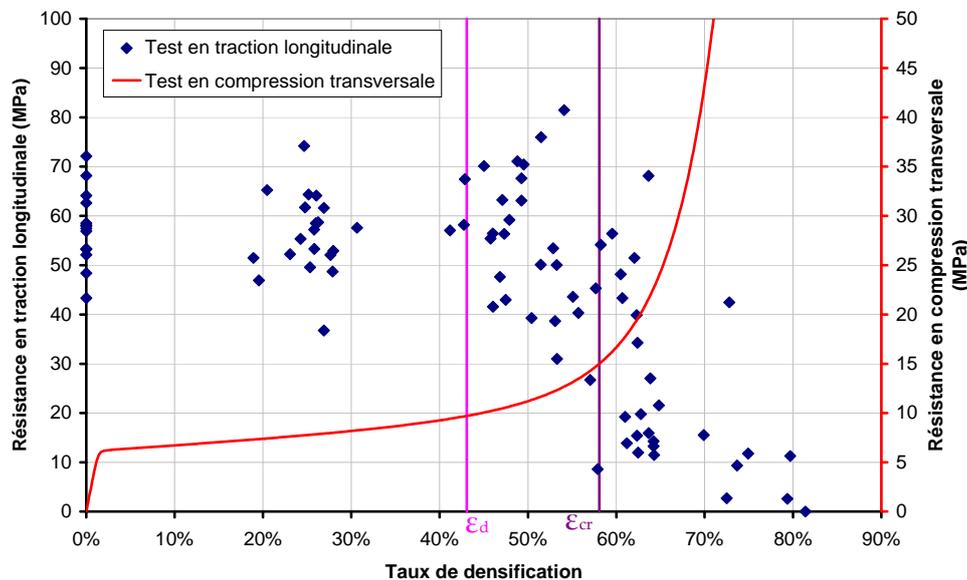


Figure 124 : Influence de la densification transversale du bois sur sa résistance en traction longitudinale

La figure 124 montre que la densification du bois ne détériore pas la cohésion interne du matériau jusqu'au taux de densification ε_{cr} . Ainsi, le fait de conserver le taux de densification lors de l'essai de traction longitudinale (Protocole A) n'apporte rien par rapport au Protocole B. Dans les deux cas, il existe un point critique au-delà duquel la résistance en traction longitudinale chute. Ce point est le même quel que soit le protocole utilisé :

$$\varepsilon_{cr} = \varepsilon_d + 0,15.$$

Au-delà de ce point critique, le fait de conserver le taux de densification lors de l'essai en traction longitudinale (Protocole A) permet d'ajouter par frottement de la cohésion interne qui permet d'allonger la zone transitoire au-delà de ε_{cr} entre la

résistance maximale en traction longitudinale et la résistance minimale (assimilée à 0). Dans le cas du protocole A, cette zone s'étend sur une plage de 11% de déformation et dans le cas du protocole B, cette plage se réduit de moitié soit 5,5%. Dans le cas, où le bois n'est pas soumis à un taux de déformation imposé lors de l'essai de traction, les formules s'écrivent, en conservant les notations déjà adoptées :

$$\begin{aligned} \text{Si } \varepsilon \leq \varepsilon_d(\rho) + 0.15 & \Rightarrow f_{t,0,mean}^\varepsilon(\rho) = f_{t,0,mean}^{\varepsilon=0}(\rho) \\ \text{Si } \varepsilon_d(\rho) + 0.15 < \varepsilon \leq \varepsilon_d(\rho) + 0.26 & \Rightarrow f_{t,0,mean}^\varepsilon(\rho) = \frac{f_{t,0,mean}^{\varepsilon=0}(\rho)}{0,055} (\varepsilon_d(\rho) + 0,205 - \varepsilon) \\ \text{Si } \varepsilon > \varepsilon_d(\rho) + 0.26 & \Rightarrow f_{t,0,mean}^\varepsilon(\rho) = 0 \end{aligned} \quad [7]$$

et :

$$f_{t,0,mean}^\varepsilon = f_{t,0,mean}^{\varepsilon=0}(\rho) \times \left(\frac{\exp(\varepsilon - (f_{t,0,mean}^{\varepsilon=0}(\rho))^{0,88}) - 1}{\exp(f_{t,0,mean}^{\varepsilon=0}(\rho)\varepsilon - (f_{t,0,mean}^{\varepsilon=0}(\rho))^{0,88}) + 1} \right) \quad [8]$$

Il est possible de superposer aux données expérimentales de la figure 124 les deux formulations mathématiques proposées ci-dessus (Figure 125).

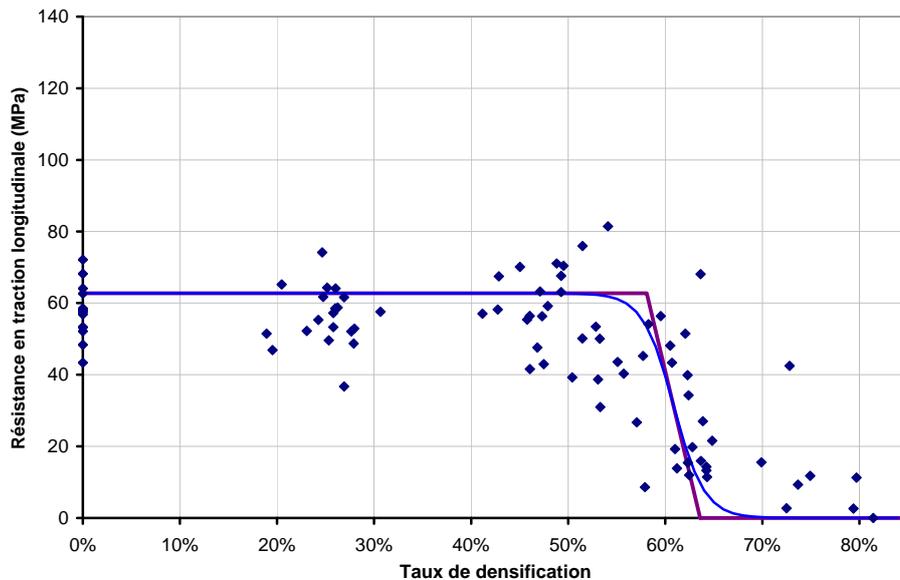


Figure 125 : Données expérimentales sur la résistance du bois densifié en traction longitudinale et formulations mathématiques de ce comportement

2.3. Influence de l'effet de bord sur la résistance du bois densifié en traction longitudinale

Au-delà du plateau de densification, le fait de confiner ou pas les éprouvettes sur toute leur longueur lors de leur densification a une influence sur la forme de l'échantillon après sa compression. En effet, après un certain taux de densification la matière non confinée du bord a tendance à s'écouler de manière prononcée et à provoquer des microfissures importantes. Ces microfissures sont visibles sur des éprouvettes de petites tailles sur la figure 19. Pour constater leur influence sur des éprouvettes de plus grandes tailles, des éprouvettes de 25×75 mm² ont été densifiées

sans confinement (Figure 126) et sont observées au stéréomicroscope Olympus SZW12 (Figure 127).

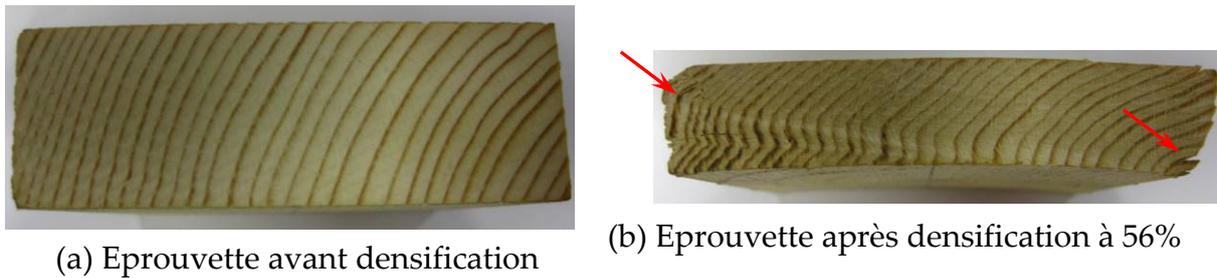


Figure 126 : Photographies d'éprouvettes densifiées par compression tangentielle

A l'œil nu, l'éprouvette densifiée connaît quelques dommages notables mais uniquement sur les bords de l'éprouvette : décollement de cernes (Figure 126 (b)) et fissuration dans le sens radial. Au centre de l'éprouvette, le matériau a flambé sans causer de discontinuités apparentes. Au microscope, les mêmes observations sont faites à savoir que seuls les bords de l'éprouvette présentent des macrofissures (Figure 127). Ainsi, le fait de ne pas confiner les éprouvettes de bois lors de leur densification a une influence sur leur macrostructure uniquement sur leur bord : ce phénomène est appelé ici « effet de bord ». Pour les avivés densifiés pour les assemblages précontraints, cet effet de bord est négligeable car leur largeur est importante. Cependant, pour les éprouvettes testées en respectant les protocoles A et B de ce chapitre, cet effet de bord est important du fait de la largeur réduite des éprouvettes.

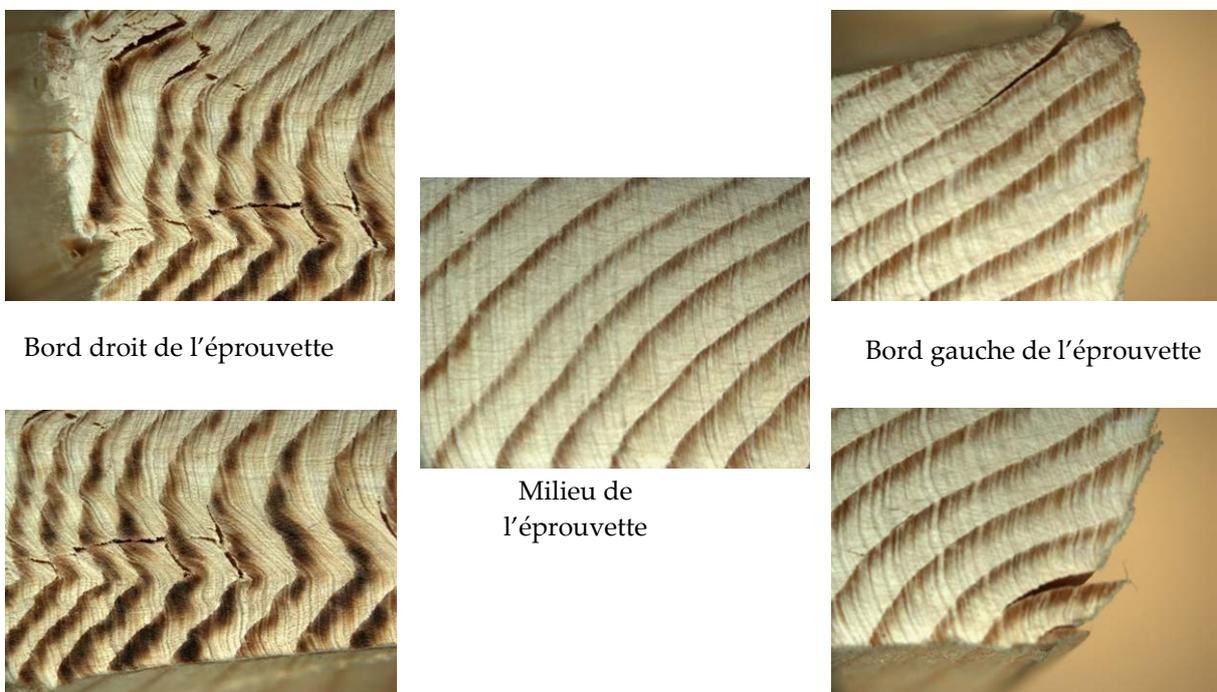


Figure 127 : Observations au stéréomicroscope Olympus SZW12 (zoom=×11,2) d'une éprouvette densifiée tangentielle

Pour contourner ce problème, il est choisi de confiner les éprouvettes lors de leur densification. En effet, par cet artifice, il n'y a pas d'apparition de microfissures comme l'indique la Figure 128.

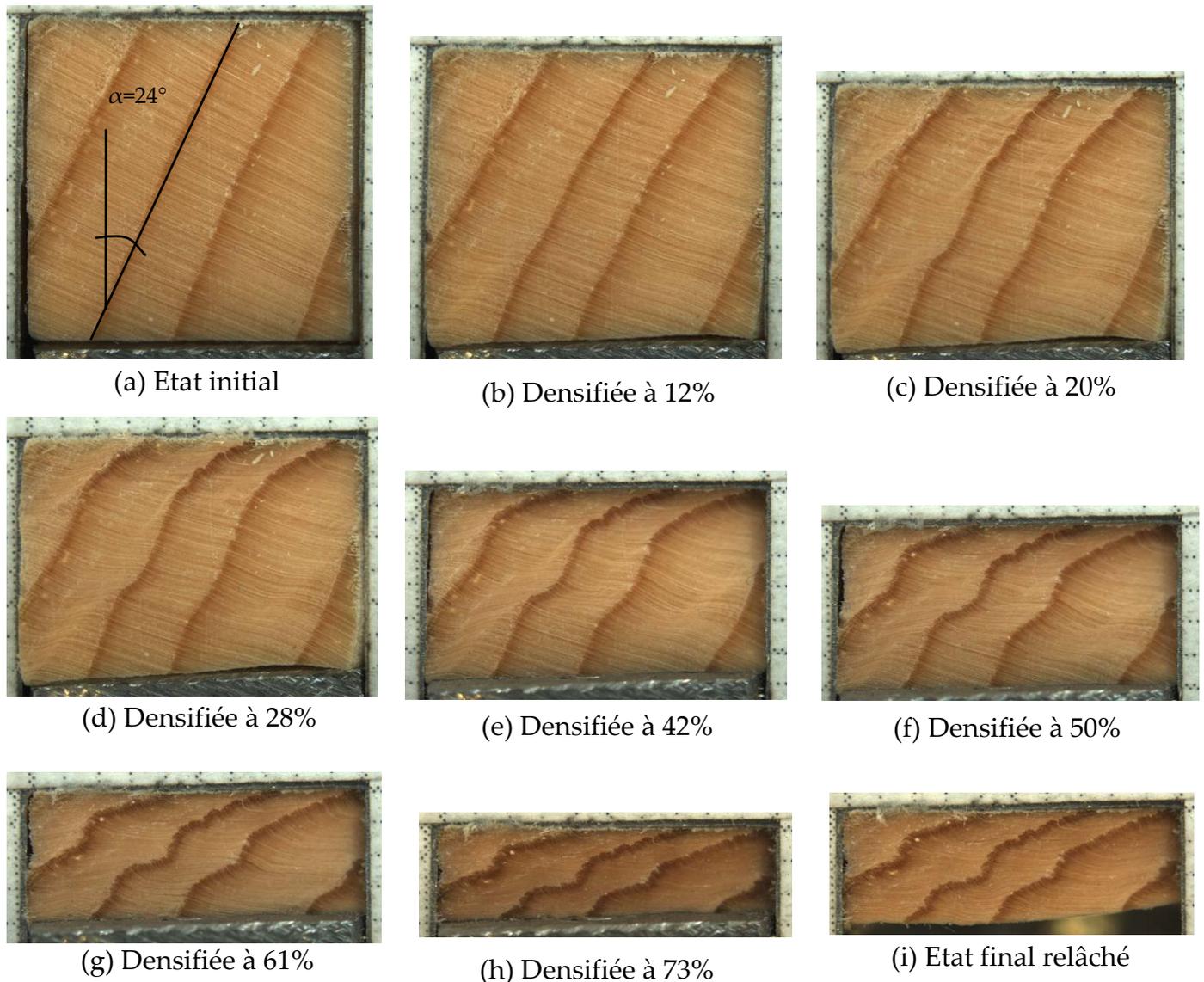


Figure 128 : Observations au stéréomicroscope Olympus SZW12 (zoom= $\times 11,2$) d'une éprouvette en cours de densification par compression mixte à différents stades.

Pour vérifier l'influence éventuelle de l'effet de bord sur la résistance du bois en traction longitudinale, des éprouvettes usinées en simple profilage et testées suivant le protocole B sont réalisées : les éprouvettes sont alors confinées sur toute leur longueur. Les résultats obtenus sont comparés à ceux trouvés avec des éprouvettes usinées en double profilage par le protocole B. Pour se faire, ils sont reportés sur le même graphique que celui de la figure 125 (Figure 129). Ce graphique montre que le fait de confiner ou pas la matière lors de sa densification n'a pas d'influence sur sa résistance en traction longitudinale.

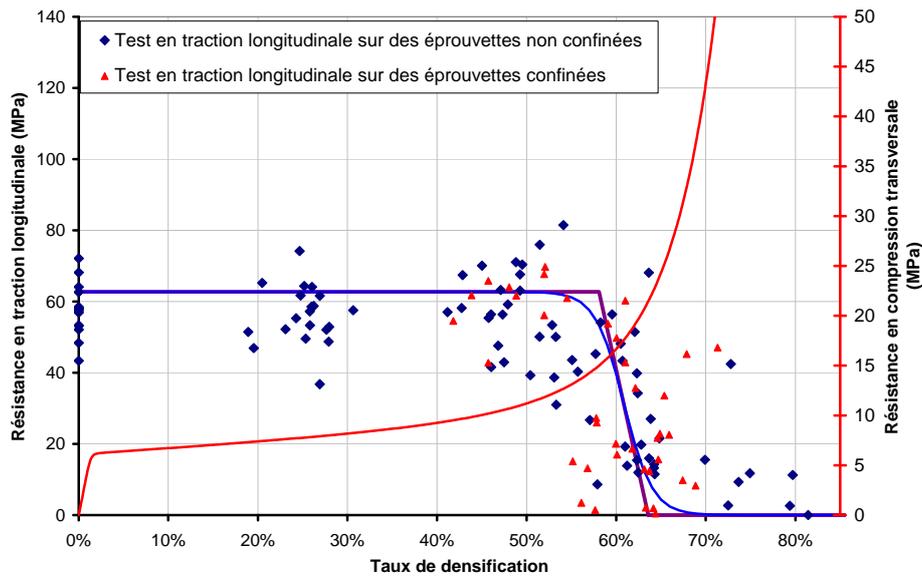


Figure 129 : Influence de l'effet de bord sur la résistance en traction longitudinale du bois densifié

2.4. Influence de l'angle de compression avec les cernes (α) sur la résistance du bois densifié en traction longitudinale

Les différentes interprétations présentées jusqu'alors ont été réalisées sans prise en compte de l'orientation de l'éprouvette lors de sa densification. Lors du protocole B ce paramètre est mesuré. Le graphique de la figure 130 présente la résistance en traction transversale de différentes éprouvettes en fonction de l'angle α défini sur la figure 120.

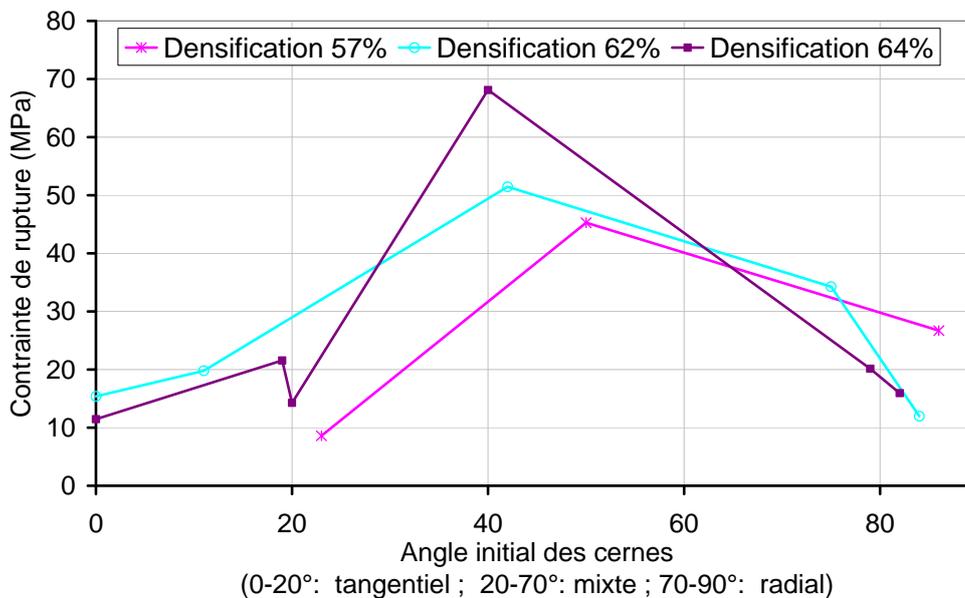


Figure 130 : Contrainte de rupture en traction longitudinale d'éprouvettes ayant subi une compression transversale en fonction de l'angle initial des cernes par rapport à la direction de compression pour trois taux de densification

La figure 130 montre que la compression mixte ($\alpha = 45^\circ$) est moins destructrice que la compression radiale ou tangentielle. En effet, le taux de densification critique pour la compression mixte semble apparaître plus tardivement que pour les angles extrêmes. Cette constatation peut expliquer en partie la dispersion des résultats. Pour aller plus loin dans cette analyse, une campagne d'essais plus poussée autour de ce paramètre α serait nécessaire. Les formulations mathématiques proposées pourraient alors prendre en compte ce paramètre.

2.5. Influence de la densification sur le module d'élasticité du bois

Pour chaque essai réalisé avec le protocole B ainsi que les essais sur les éprouvettes témoins, une courbe linéaire liant la contrainte de traction dans l'éprouvette en fonction de son allongement est réalisée. Ces courbes ont toutes l'allure de celle présentée sur la figure 131.

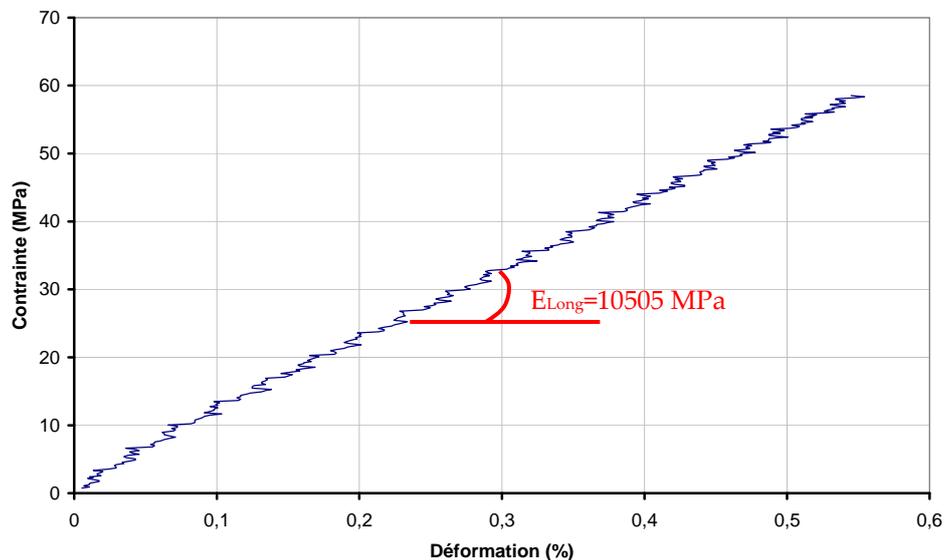


Figure 131 : Exemple d'une loi de comportement du bois densifié en traction longitudinale

Il est donc possible de déterminer pour chaque essai le module d'élasticité de l'éprouvette et de tracer ce module en fonction du taux de densification (Figure 132).

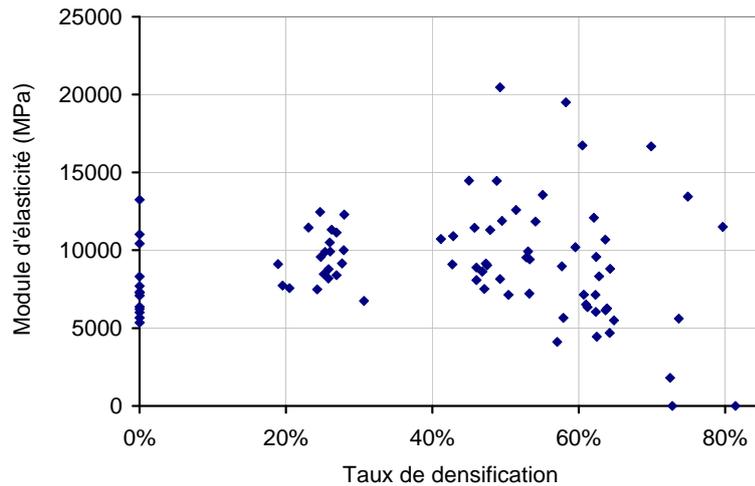


Figure 132 : Evolution du module d'élasticité du bois densifié en fonction de son taux de densification

La moyenne des modules mesurés ainsi que leur coefficient de variation sont présentés dans le tableau 11. Le taux de densification diminue légèrement le module d'élasticité moyen (diminution d'environ 20% du module de bois densifié par rapport aux éprouvettes témoins). De plus, au-delà du taux de densification critique défini précédemment, la dispersion devient très importante.

	Module d'élasticité moyen	Coefficient de variation
Eprouvettes témoins	10085 MPa	25 %
$\varepsilon \leq \varepsilon_{cr}$	7804 MPa	29 %
$\varepsilon > \varepsilon_{cr}$	7644 MPa	48 %

Tableau 11 : Valeurs moyennes obtenues pour la variation du module équivalent en fonction du taux de densification

A l'issue de cette partie, il est montré que le fait de densifier le bois jusqu'au taux de densification critique n'a pas d'influence sur sa cohésion interne. Il est montré également que la phase de densification est primordiale quant à la valeur de ce taux de densification critique. En effet, ce dernier semble lié à l'orientation des cernes lors de la phase de compression. Lors de la densification sur des éprouvettes confinées qui ne présentent donc pas de macrofissures, ce point critique ne varie pas par rapport à des éprouvettes non confinées présentant des macrofissures. Cette dernière constatation est surprenante et soulève une question : pourquoi existe-t-il un taux de densification critique au-delà duquel la résistance en traction longitudinale du bois densifié chute-t-il ? Pour répondre à cette question, des observations anatomiques au microscope électronique à balayage (MEB) sont réalisées.

3. OBSERVATIONS ANATOMIQUES DU BOIS LORS DE SA PHASE DE DENSIFICATION

La diminution des propriétés mécaniques du bois densifié en traction longitudinale commence au-delà de ε_{cr} : des éprouvettes dans cette zone de densification sont observées au MEB. Des échantillons issus de la même planche ont été prélevés de manière à présenter différentes orientations de cernes par rapport à la direction de densification. L'angle entre la direction de chargement et le cerne est noté α (Figure 120). Ainsi trois directions de densification sont distinguées : compression radiale (Figure 17), tangentielle (Figure 18) et mixte (Figure 19). Les dimensions de ces échantillons ($40 \times 30 \times 12 \text{ mm}^3$ ou $40 \times 40 \times 12 \text{ mm}^3$) permettent aux éprouvettes de subir une densification sans apparition de plans de cisaillement parasites (largeur et longueur suffisamment grande par rapport à la hauteur). Ainsi, sur la même éprouvette, il est possible d'observer non seulement les éventuels effets de bord mais également du bois confiné en milieu quasi infini. Après avoir subi une densification de 64% sur une machine d'essai universelle Instron, le bois densifié est observé au MEB (modèle Hitachi S520).

Les photographies prises au MEB qui sont présentées dans ce document sont orientées de manière à ce que la direction verticale corresponde à la direction de la densification.

3.1. Influence de la compression radiale sur le bois

La figure 17 montre un échantillon de *Picea abies* non confiné lors de sa compression dans la direction radiale sous le stéréomicroscope. Dès le début de la compression, des lignes claires apparaissent dans le bois initial successivement dans chacun des cernes (Figure 17 (b) à (d)). Ces lignes sont le plus souvent situées en début de cerne à une certaine distance de la limite de cerne. Elles correspondent aux premières rangées tangentielles de cellules endommagées. Les photographies prises au MEB (Figure 133) montrent que cet endommagement correspond à un effondrement sans fracture des cellules, qui peut être qualifié de *collapse*.

Ces zones de premier *collapse* se propagent radialement au fur et à mesure de la compression dans le bois initial de tous les cernes (Figure 17 (d) à (h)). La figure 133 (a) et (b) montre que seule une dizaine de rangées de trachéides situées en fin de cerne semble conserver leur forme initiale. Dans ce bois final, les rayons ligneux restent rectilignes alors qu'ils sont déformés en forme de zigzag partout ailleurs (flèche grise sur la figure 133 (b)). Le bois final ne subit donc pas de *collapse* dans les conditions expérimentales décrites ici. Par contre, des microfissures apparaissent entre les trachéides du bois final, au niveau de la lamelle moyenne (flèches blanches sur les figure 133 (a) et (b)). Par ailleurs, la figure 133 (a) montre un canal résinifère situé dans la zone intermédiaire entre bois initial et bois final : il subit un écrasement dû à la compression mais ne constitue pas une amorce de fissure.

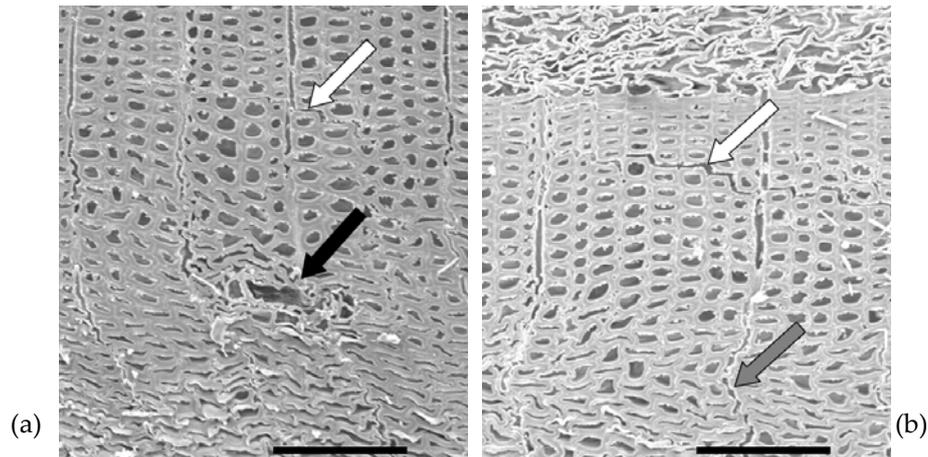


Figure 133 : Microfissures dans le bois final (flèches blanches), canal résinifère écrasé (flèche noire) et rayon ligneux en zigzag (flèche grise) au centre de l'échantillon après une compression radiale de 64% (barre d'échelle : 150 mm)

L'échantillon comprimé sur la figure 17 n'est pas confiné : la matière peut donc s'échapper sur les bords de l'échantillon. Ce déplacement reste peu important et peu de différences notables entre un échantillon comprimé confiné et un échantillon comprimé non confiné ont été observées : dans les deux cas, il n'y a pas d'apparition de microfissures. Il est à noter cependant que lors de l'observation au MEB, la structure anatomique est moins dégradée au niveau des « bourrelets » formés aux bords de l'échantillon non confiné (Figure 134).

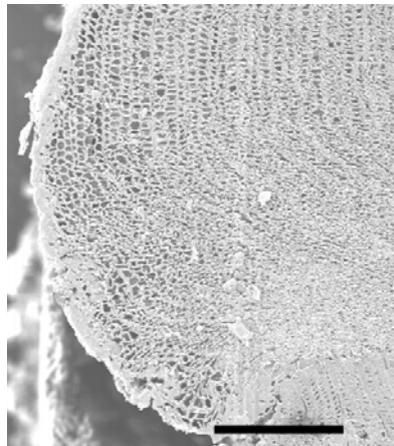


Figure 134 : Bord de l'échantillon après une compression radiale de 64% (barre d'échelle : 430 mm)

3.2. Influence de la compression tangentielle sur le bois

Alors que la compression tangentielle d'un échantillon confiné ne provoque pas de microfissures, dans le cas d'un échantillon non confiné, elle aboutit à la formation de microfissures de trois types : des microfissures radiales suivant les rayons ligneux ou simplement entre les séries radiales de trachéides au niveau de la lamelle moyenne (Figure 135 (a)), des microfissures tangentielles (Figure 135 (b)) et des déchirements ne présentant pas de direction privilégiée (Figure 135 (c)). Sur un échantillon large, les microfissures apparaissent surtout au niveau des bords mais

quelques macrofissures tangentielle et déchirements non orientés sont présents dans la partie centrale, le déplacement des bords ayant sans doute permis le déplacement de tous les cerne.

A cause de l'apparition de ces macrofissures, le bois comprimé non confiné semble plus dégradé que le bois comprimé confiné. Cependant, la figure 135 (a) montre que la fissuration radiale au niveau des bords permet la libération des contraintes : les cellules sont beaucoup moins dégradées que celles situées au milieu de l'éprouvette (Figure 136).

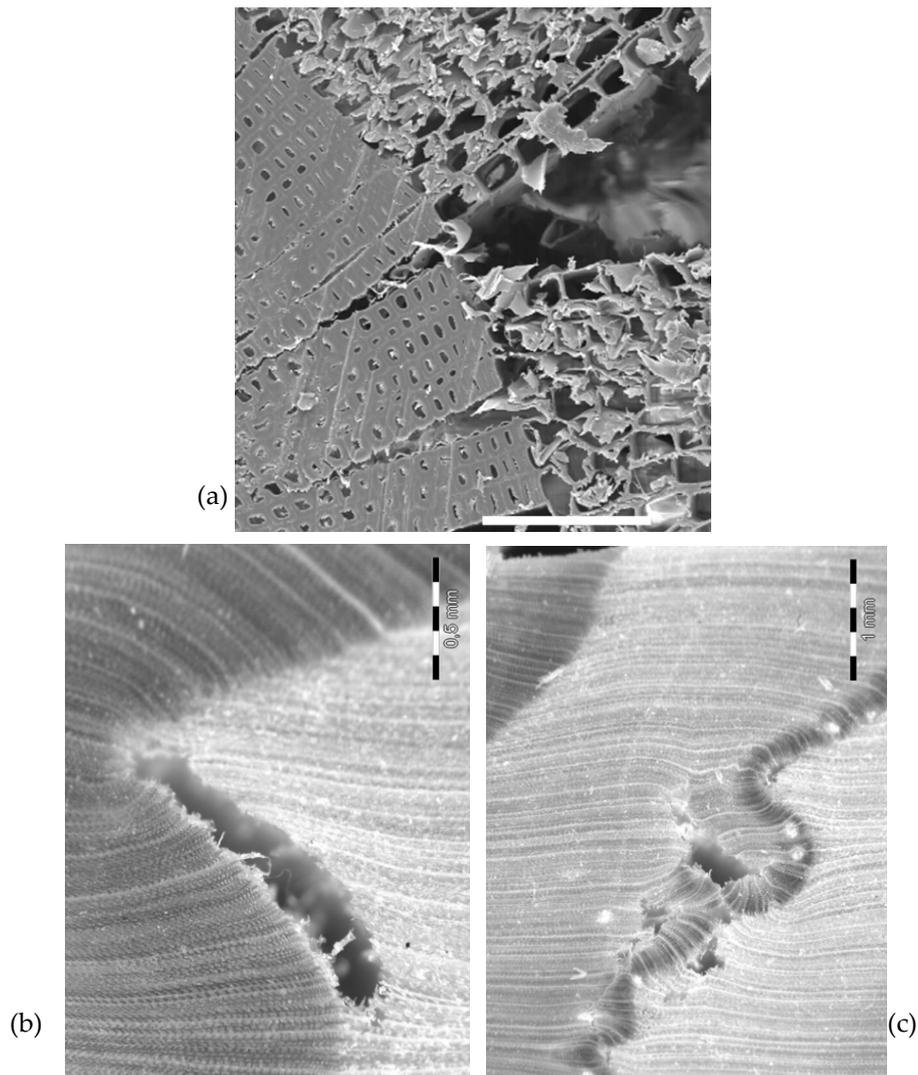


Figure 135 Trois types de macrofissures après une compression tangentielle de 64% observées au MEB (a) et au stéréomicroscope (b et c) :
(barres d'échelle : 150 mm pour (a), 0.5 mm pour (b), 1 mm pour (c))

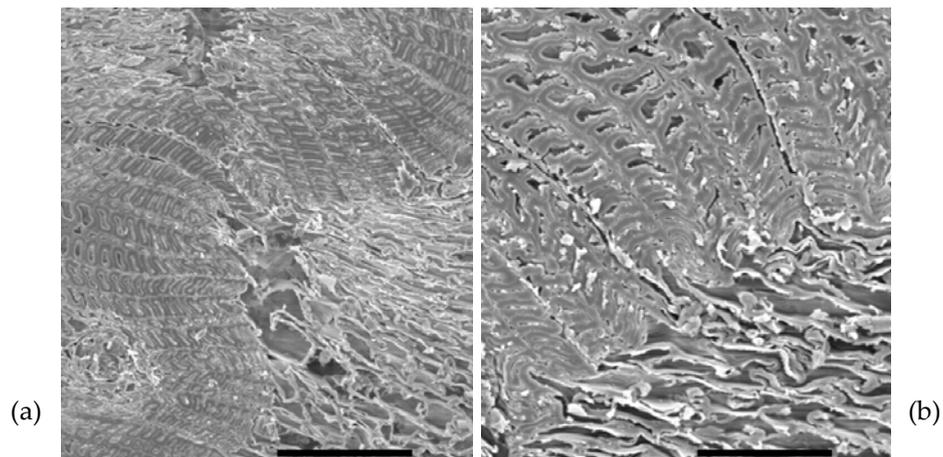


Figure 136 : Collapse dans le bois final au centre de l'échantillon après une compression tangentielle de 64% (barre d'échelle : 150 mm pour (a), 75 mm pour (b))

3.3. Influence de la compression mixte sur le bois

La figure 19 et la figure 128 montrent un échantillon de *Picea abies* présentant une inclinaison des cernes comprise entre 20° et 70°, lors de sa compression. Tous les essais ont montré une rotation des cernes. Lorsque le bois est comprimé confiné, il n'y a pas apparition de macrofissures alors que lorsqu'il est comprimé non confiné, des macrofissures tangentielles se développent. Lorsque le mouvement n'est pas entravé, les cernes semblent glisser les uns sur les autres et finissent par se cisailer au niveau de la première rangée de trachéides du bois initial (Figure 137 (a)), surtout au niveau des bords, que ce soient les bords latéraux libres de l'échantillon ou les surfaces au contact des plateaux du dispositif d'essai.

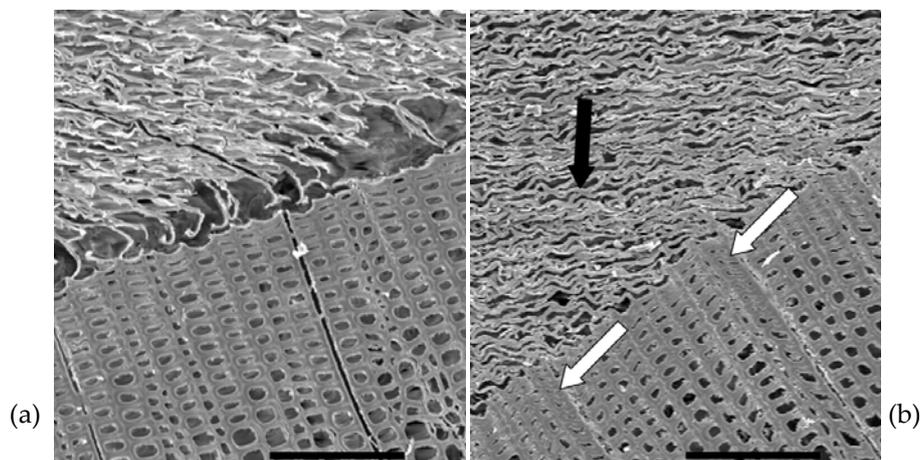


Figure 137 : Macrofissure dans la première couche de trachéides du bois initial (a), collapse de quelques séries radiales de trachéides du bois final (flèches blanches) et aplatissement des trachéides du bois initial (flèche noire) (b) au centre de l'échantillon après une compression mixte de 64% (barre d'échelle : 150 mm)

Les efforts de cisaillement sont importants entre le bois initial et le bois final à cause de l'hétérogénéité prononcée en termes de densité et de résistance au collapse. Sur la figure 137 (b), les trachéides de bois initial se déforment de manière à acquérir

une forme aplatie dans une direction perpendiculaire à la direction de la force de compression appliquée (la direction verticale sur les photographies). Dans le bois final, les trachéides se déforment peu. Un collapse est observé dans quelques séries radiales de trachéides. Les rayons ligneux suivent les mouvements des trachéides qui les entourent. Aucune microfissure n'est observée.

3.4. Conclusion quant à l'explication de l'apparition d'un taux de densification critique

Pour un taux de densification de 64%, lorsque la compression n'est pas confinée, il y a apparition de microfissures lorsque la densification est tangentielle ou mixte. Par contre en compression radiale, il n'y a jamais apparition de microfissures. Les microfissures ne permettent donc pas d'expliquer la présence de ce taux de densification critique.

La figure 130 montre que pour un taux de densification de 64%, la résistance en traction longitudinale des éprouvettes densifiées radialement et tangentiellement est fortement dégradée alors que pour l'éprouvette densifiée avec un angle intermédiaire, cette résistance n'est pas altérée.

Les observations au MEB réalisées ci-dessus sur les échantillons densifiés à 64% radialement ou tangentiellement montrent l'apparition de microfissures et/ou des collapses dans le bois final. Pour les éprouvettes mixtes, les cellules sont moins dégradées : il n'y a pas de microfissures dans le bois final.

En traction longitudinale, lorsque le bois est de droit fil, le premier mécanisme mis en jeu est la rupture transverse du bois final perpendiculairement à la direction de la force appliquée. Le bois initial cède ensuite sous l'effet combiné de la traction et du cisaillement. Un endommagement du bois final entraîne donc une diminution de la résistance du bois en traction longitudinale. En compression mixte, le glissement des cernes les uns sur les autres permet une dissipation de l'énergie qui limite le risque d'apparition de microfissures ou de collapse dans le bois final. Ce glissement provoque cependant l'apparition de microfissures tangentielles au niveau de la première rangée de trachéides de bois initial. Ces cellules subissent en effet les contraintes les plus fortes puisqu'elles se trouvent à la jonction de deux couches de matériaux différents, à l'endroit où le contraste de densité est le plus fort. Il semblerait que l'apparition de microfissures et de collapse au niveau cellulaire dans le bois final ait finalement plus d'impact négatif sur la résistance en traction longitudinale du bois comprimé que l'apparition de microfissures puisque le bois ayant subi une compression mixte présente la plus grande résistance.

Ce phénomène permet d'expliquer l'existence d'un taux de densification critique au-delà duquel la résistance en traction longitudinale disparaît. Ce taux de densification dépend, pour une masse volumique donnée, de l'orientation des cernes lors de la densification du bois.

4. CONCLUSIONS SUR LA RESISTANCE DU BOIS DANS LES ASSEMBLAGES PRECONTRAINS TESTES

Au niveau de la zone d'assemblage, le bois est densifié de manière progressive et passe linéairement d'un taux de densification de 0% à 76% en 180 mm (Figure 138 (a)). La masse volumique des avivés d'Épicéa utilisés pour tester les assemblages précontraints dans le Chapitre 1 vaut en moyenne 435 kg/m³ pour un coefficient de variation de 13%. Aussi, dans la suite de ce paragraphe, il ne sera question que d'un avivé avec cette masse volumique moyenne.

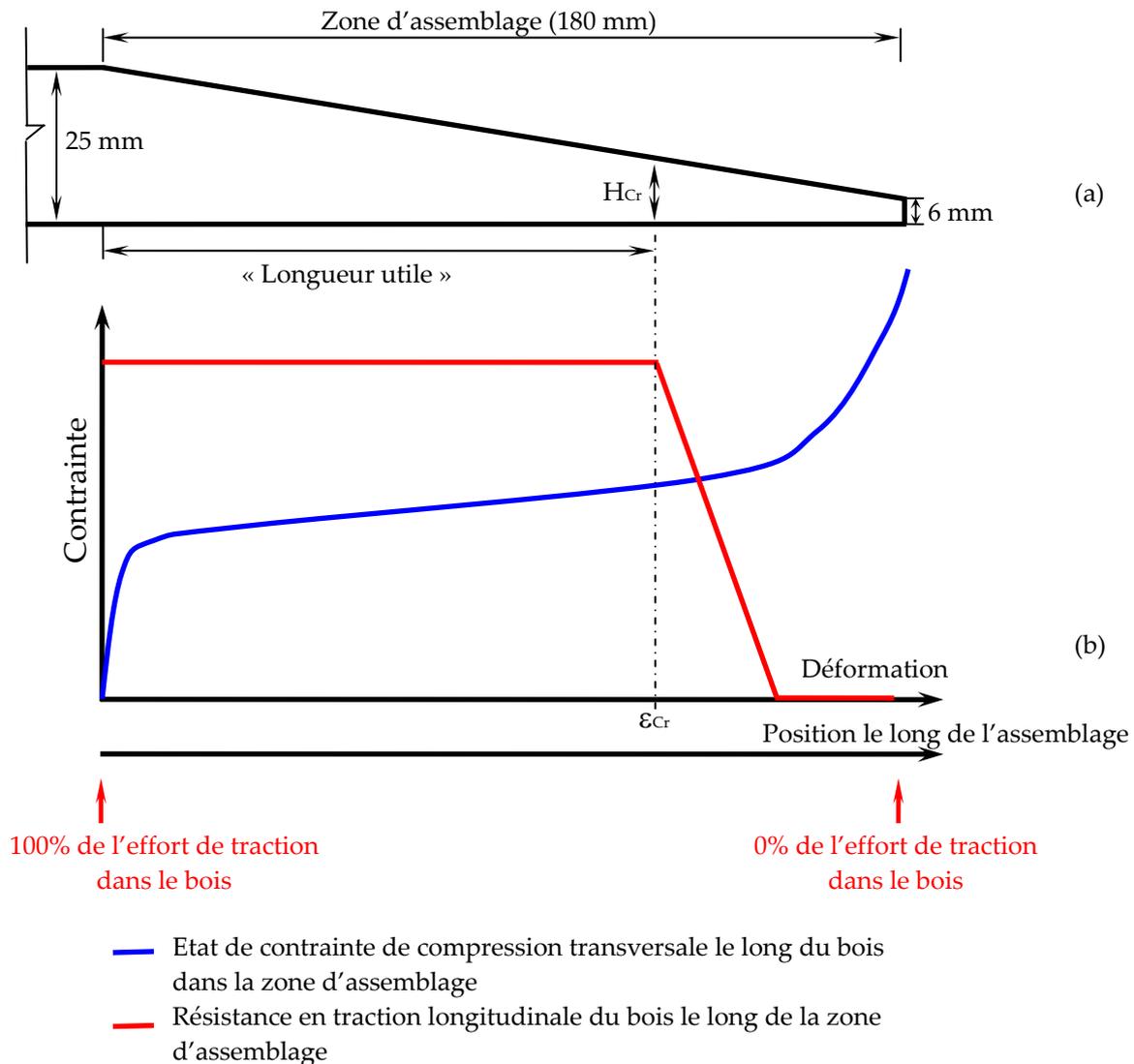


Figure 138 : Schématisation de la contrainte de compression transversale et de la résistance en traction longitudinale dans le bois le long de l'assemblage :

(a) Schématisation de la forme de l'avivé de bois dans l'assemblage

(b) Allures des deux courbes étudiées le long de l'assemblage (la déformation imposée au matériau est directement proportionnelle à la position le long de l'avivé dans la zone d'assemblage)

Avec la masse volumique moyenne considérée, il est possible de calculer le taux de densification critique du matériau bois. Ce taux de densification critique est directement proportionnel à la hauteur de bois après densification. Avec la masse volumique moyenne les égalités suivantes peuvent être écrites :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cr} = \varepsilon_d + 0,15 &= -9.10^{-4} \rho + 0,7818 + 0,15 = -9.10^{-4} \times 435 + 0,7818 + 0,15 \\ \varepsilon_{cr} &= 54\% \\ \varepsilon_{cr} = \frac{25 - H_{Cr}}{25} &\Rightarrow H_{Cr} = 25 - 25 \varepsilon_{cr} \\ H_{Cr} &= 11,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

A partir de cette hauteur critique, il est possible par égalités géométriques de définir la position du point critique le long de l'assemblage. La notion de « longueur utile » est utilisée ici : il s'agit de la longueur de bois dans l'assemblage où la résistance en traction longitudinale du matériau n'est pas affectée (Figure 138). Cette longueur utile (notée L_{utile}) est directement proportionnelle à la hauteur critique par la formule :

$$L_{utile} = 236,84 - \frac{236,84}{25} H_{Cr} = 128 \text{ mm}$$

soit 71% de la longueur de bois dans l'assemblage.

Le même calcul peut être réalisé pour chaque essai en prenant la masse volumique moyenne des deux avivés qui les constitue (Tableau 12).

Essai	Masse volumique	ε_{Cr}	H_{Cr}	L_{utile}	%age utile
Essai 1	415,5 kg/m ³	55,8%	11,1	132,1	73,4%
Essai 3	366,2 kg/m ³	60,2%	9,9	142,6	79,2%
Essai 4	482,5 kg/m ³	49,8%	12,6	117,8	65,5%
Essai 5	512,9 kg/m ³	47,0%	13,2	111,4	61,9%
Essai 7	404,0 kg/m ³	56,8%	10,8	134,6	74,8%
Essai 8	505,1 kg/m ³	47,7%	13,1	113,0	62,8%
Essai 9	380,3 kg/m ³	59,0%	10,3	139,6	77,6%
Moyenne	435,3 kg/m³	54,0%	11,5	127,9	71,1%

Tableau 12 : Calcul du pourcentage de la longueur de bois dans l'assemblage ayant une résistance en traction longitudinale équivalente à celle sans densification

Ainsi, en moyenne, 70% de la longueur de bois dans l'assemblage possède une résistance équivalente à la résistance du bois sans densification. La partie de bois dans l'assemblage ayant une résistance en traction longitudinale diminuée est la partie où il y a le moins d'effort de traction qui transite dans le matériau fibreux.

Chapitre 4.

Modélisation par éléments finis des assemblages précontraints pour les matériaux fibreux

La démarche proposée ici est d'utiliser les caractéristiques mécaniques des matériaux fibreux mesurées expérimentalement lors des deux chapitres précédents afin de modéliser le comportement des assemblages réalisés avec ceux-ci. A partir de deux modèles de matériaux fibreux (un pour le bois et un pour le bambou), les essais du Chapitre 1 sont simulés et les résultats sont comparés aux données expérimentales. Le seul paramètre qui n'est pas mesuré est le frottement entre l'acier et le matériau fibreux : ce paramètre est alors retrouvé par analyse inverse en comparant les résultats d'essais à ceux donnés par le modèle. Cette analyse permet de partir de résultats locaux liés aux propriétés des matériaux et de remonter à un résultat global en introduisant les lois de comportement réelles des matériaux mesurées expérimentalement.

L'objectif de la modélisation par éléments finis est de comprendre le passage des efforts de l'élément métallique intérieur vers le matériau fibreux et de mesurer des éventuels efforts parasites en vue d'améliorer et d'optimiser les assemblages précontraints proposés au Chapitre 1 qui ont une géométrie élémentaire.

La modélisation du matériau fibreux doit permettre d'aller au-delà du plateau de densification en compression transversale ce qui nécessite de prendre en compte l'écoulement « plastique » du matériau. Peu de travaux ont été réalisés sur la modélisation de l'écoulement « plastique » du matériau bambou, aussi la recherche bibliographique sur ce sujet est réalisée pour le matériau bois puis interprétée pour être appliquée au bambou.

De nombreux travaux ont été réalisés pour modéliser le matériau bois par éléments finis et les plus avancés sont décrits au cours de ce chapitre. Puis le modèle retenu est décrit. Les essais du Chapitre 1 sont ensuite tous simulés avec les modèles retenus et les résultats analysés.

1. DESCRIPTION MULTI ECHELLE DES PRINCIPALES FAÇONS DE MODELISER LE BOIS ET CHOIX DU MODELE RETENU

Le bois est un matériau complexe dont le comportement peut être simulé de façons différentes suivant l'échelle considérée. Ainsi, de manière identique à la description de son anatomie du paragraphe Chap I 2.1, il est possible de distinguer trois échelles principales pour modéliser le matériau bois : l'échelle macroscopique, mésoscopique et cellulaire. La figure 139, qui a été imaginée à partir des travaux de Holmberg et al. [HOL 1999], illustrent ces trois échelles avec des exemples concrets trouvés dans la littérature.

Sur cette figure, la première échelle considérée est l'échelle macroscopique avec tout d'abord le concept de « bois idéal ». Cette idée est introduite par Guitard [GUI 1987] qui considère le bois comme « un milieu continu, élastique, homogène admettant une géométrie matérielle orthotrope cylindrique ». La loi élastique d'un tel matériau s'écrit alors :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{LT}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T} \\ \frac{\nu_{TL}}{E_T} = \frac{\nu_{LT}}{E_L} \\ \frac{\nu_{LR}}{E_L} = \frac{\nu_{RL}}{E_R} \end{cases}$$

Guitard mesure alors ces différents coefficients ce qui lui permet de définir le « bois idéal ». Cette approche est utilisée dans la plupart des problèmes ingénieurs mais ne permet cependant pas de considérer le comportement non linéaire du bois. Les paragraphes suivants présentent des modèles bois aux trois échelles considérées qui permettent de prendre en compte le comportement du matériau au-delà de sa limite élastique.

ECHELLE MACROSCOPIQUE

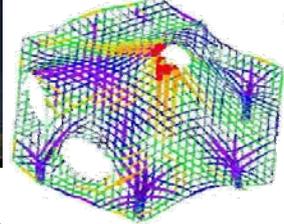
Echelle > 1 m :

« Bois idéal »

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & & & \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{55} & \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix}$$



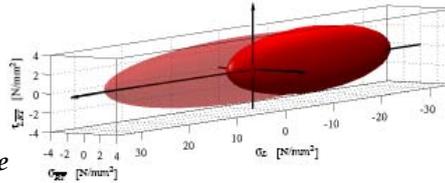
Centre Pompidou Metz



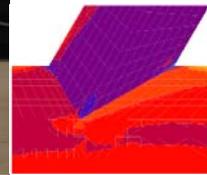
Le bois est considéré comme élastique linéaire, homogène, orthotrope cylindrique (ou isotrope transverse)

Echelle > 10 cm :

Fonction de charge avec critères de rupture



[FLE 2005]

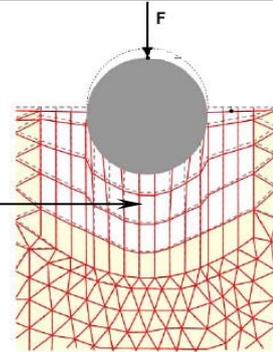
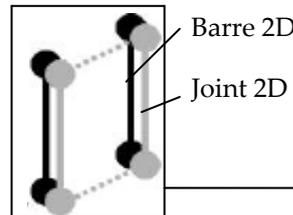
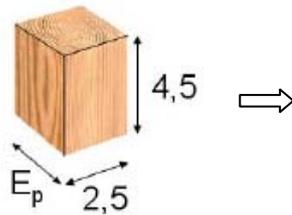


Le bois est considéré comme un matériau continu qui peut entrer dans une phase non linéaire de « plastification ». L'écoulement de la matière est piloté par une surface de charge.

ECHELLE MESOSCOPIQUE

Echelle = Cerne :

Modèle structural isotrope transverse



[BOC 1997]

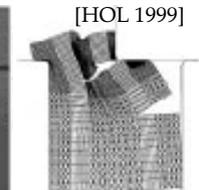
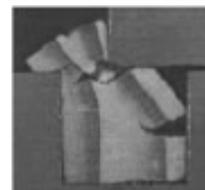
Le bois est considéré comme une structure. L'effondrement de cette dernière représente l'écoulement plastique de la matière.

ECHELLE CELLULAIRE

Echelle < Cerne :

Modèle structural isotrope

Le bois est considéré comme une structure constituée de différents éléments mous permettant de simuler la différence de comportement entre le bois de printemps et d'été des cernes.

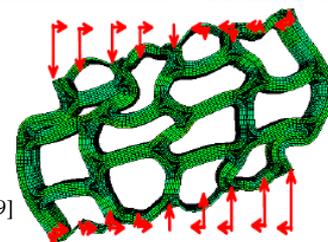


[HOL 1999]

Echelle = Cellule :

Modèle structural isotrope

Chaque cellule est modélisée comme une structure



[DEM 1999]

Figure 139 : Modélisation du bois à différentes échelles

1.1. Modélisation du bois à une échelle macroscopique

De manière générale, la rupture apparaît dans un matériau lorsque la charge appliquée dépasse la limite de sa capacité résistante. Étant donné qu'il est difficile de réaliser les essais pour établir la résistance du matériau dans toutes les sollicitations possibles, l'idée de critère de rupture a été introduite. Ce critère permet de prédire la rupture pour une sollicitation multiaxiale en utilisant les données obtenues à partir d'essais uniaxiaux. Ces essais étant réalisés à partir de volumes de bois avec plusieurs cernes, il s'agit donc bien d'une méthode macroscopique. Le critère prend la forme d'une enveloppe dans un repère de contraintes qui détermine la limite de résistance du matériau. Dans un repère plan cette limite a le plus souvent la forme d'une courbe.

1.1.1. Généralités sur les critères de rupture

Au delà d'une certaine sollicitation, un matériau ne se déforme plus de façon réversible : des déformations permanentes apparaissent. Ce comportement est qualifié de comportement plastique s'il est indépendant de la vitesse à laquelle se fait la déformation. Il est possible de distinguer parmi ces déformations irréversibles celles pour lesquelles le matériau reste continu de celles qui, au contraire, correspondent à des ruptures, c'est à dire à la création de discontinuités géométriques (fissures, fractures, failles, ...). Les premières font partie des déformations qui sont appelées ductiles, les secondes sont dites cassantes ou fragiles. Pour le bois, il est d'usage de considérer un critère de rupture même si par abus de langage le terme de critère de plasticité peut être employé.

Le critère de rupture peut être représenté par une fonction scalaire qui dépend du tenseur des contraintes $f(\underline{\underline{\sigma}})$ telle que :

- Si $f(\underline{\underline{\sigma}}) < 0$: cela signifie que le champ de contraintes appliqué au matériau reste dans le domaine élastique,

- Si $f(\underline{\underline{\sigma}}) = 0$: cela signifie que le champ de contraintes appliqué sur le matériau se situe sur la frontière dite « plastique » à partir de laquelle les déformations deviennent irréversibles.

Cette frontière représente un seuil dit de plasticité qui devient infranchissable, c'est-à-dire que dans tous les cas $f(\underline{\underline{\sigma}}) \leq 0$. En revanche ce seuil peut varier au cours du temps. Ce type de relation est donc appelé critère de plasticité (ou d'écoulement). La fonction $f(\underline{\underline{\sigma}})$ est aussi appelée fonction de charge.

Il est important de comprendre qu'un état extérieur au domaine d'élasticité est physiquement impossible à obtenir. L'état de contrainte se situe obligatoirement à l'intérieur de la fonction de charge ou sur sa frontière mais jamais en dehors comme le représente la figure 140.

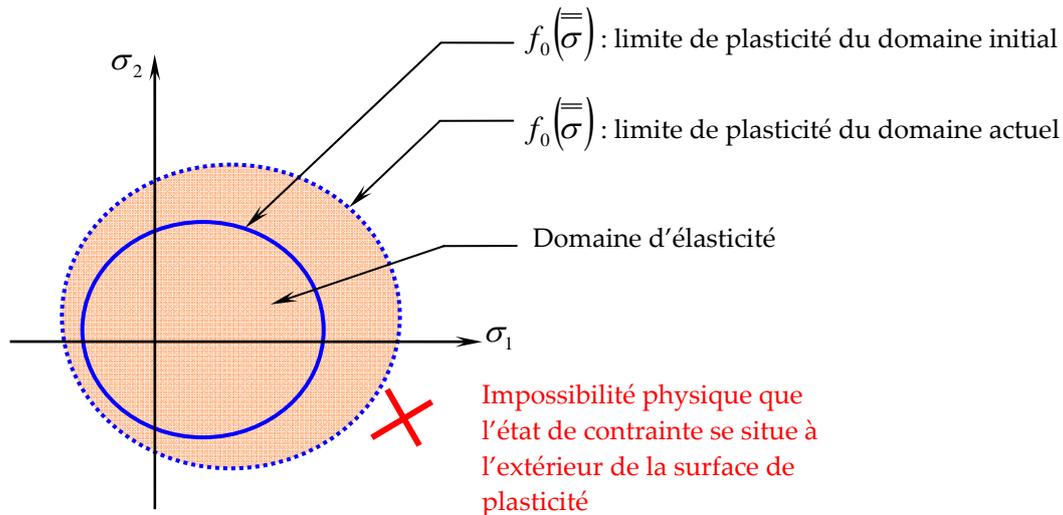


Figure 140 : Schéma représentant l'évolution de la fonction de charge dans un repère de contraintes plan

1.1.2. Critères de rupture pour modéliser le bois

Ces critères existent pour les matériaux homogènes et isotropes et ont été appliqués à des matériaux inhomogènes et anisotropes comme des matériaux composites renforcés par des fibres artificielles (fibre de verre) ou naturelles (bois). Nahas [NAH 1986] fait un point sur les différents critères pour caractériser la rupture de différents matériaux. Il le fait pour les matériaux isotropes puis pour les matériaux composites anisotropes. Ce document a le mérite d'unifier toutes les notations pour comparer les différents critères. Aussi, les notations utilisées ci-dessous seront les mêmes que celles de l'article cité:

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Contraintes dans les directions principales
$\tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{13}$	Contraintes de cisaillements
X,Y,Z	Résistance du bois dans les directions 1, 2 et 3
R,S,T	Résistances du bois au cisaillement dans les plans principaux d'orthotropie.

Kasal et Leichti [KAS 2005] reportent quant à eux les principaux critères utilisés pour le bois et les matériaux à base de bois.

Ils citent tout d'abord le critère de Hill⁷ qui se présente sous la forme de l'équation [9].

⁷ Hill, R. (1950) The mathematical theory of plasticity, Oxford, Clarendon Press, 354 p.

$$\begin{aligned} & \frac{\sigma_1^2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\sigma_3^2}{Z^2} - \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} \right) \sigma_1 \sigma_2 - \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{Y^2} \right) \sigma_1 \sigma_3 \\ & - \left(\frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} \right) \sigma_2 \sigma_3 + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} + \frac{\tau_{23}^2}{T^2} + \frac{\tau_{13}^2}{R^2} = 1 \end{aligned} \quad [9]$$

Il s'agit d'une généralisation du critère de Von Mises-Hencky pour les matériaux orthotropes. Hill considère que la limite élastique en compression et en traction dans toutes les directions est la même ce qui n'est pas le cas pour le bois. Ce critère ne permet donc pas de définir la limite élastique du bois.

Kasal et Leichti citent Norris⁸ comme étant le premier à avoir travaillé sur un critère pour le bois. Il s'agit d'une généralisation du critère de Von Mises-Hencky ce qui donne un critère par plan de contrainte (Equation [10]).

$$\begin{aligned} & \frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{XY} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \\ & \frac{\sigma_2^2}{Y^2} - \frac{\sigma_2 \sigma_3}{YZ} + \frac{\sigma_3^2}{Z^2} + \frac{\tau_{23}^2}{T^2} = 1 \\ & \frac{\sigma_3^2}{Z^2} - \frac{\sigma_3 \sigma_1}{ZX} + \frac{\sigma_1^2}{X^2} + \frac{\tau_{31}^2}{R^2} = 1 \end{aligned} \quad [10]$$

Ce critère ne prend pas en compte la différence de résistance entre la traction et la compression et sous-estime la résistance en chargement biaxial avec du cisaillement.

Hoffman⁹ réalise une généralisation du critère de Hill qui prend en compte la différence de comportement en traction et compression et une rupture fragile plutôt qu'une limite élastique. Ce critère (Equation [11]) dépend de neuf coefficients (K_1 à K_9) tous déterminés à partir d'essais simples (trois tests de traction uniaxiale, trois tests de compression uniaxiale et trois tests de cisaillement pur).

$$K_1(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + K_2(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + K_3(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + K_4\sigma_1 + K_5\sigma_2 + K_6\sigma_3 + K_7\tau_{23}^2 + K_8\tau_{31}^2 + K_9\tau_{12}^2 = 1 \quad [11]$$

D'après Kasal et Leichti, le principal problème de ce critère est le manque de contraintes sur les coefficients ce qui amènent à une surface de charge ouverte et donc à des résistances infinies.

Goldenblat et Kopnov¹⁰ ont élaboré une théorie générale pour tous les matériaux anisotropes. Pour mettre en œuvre ce critère, il est nécessaire de réaliser

⁸ Norris, G.B. (1950) Strength of orthotropic materials subjected to combined stress. Report No. 1816. US Department of Agriculture, Forest Research Laboratory. Madison, WI. 40 pp.

⁹ Hoffman, O. (1967) The brittle strength of orthotropic materials. Journal of Composite Materials: 1(2): 200-206

¹⁰ Goldenblat, I.I. & Kopnov, V.A. (1965) Strength of glass reinforced plastics in the complex stress state (en Russie). Mekhanika Polymerov [Polymer Mechanics]: 2: 70-78

des tests biaxiaux sur le matériau. Les notations sont différentes de celles utilisées plus haut (Equation [12]).

$$(F_{ij}\sigma_{ij})^\alpha + (F_{ijkl}\sigma_{ij}\sigma_{kl})^\beta + (F_{ijklmn}\sigma_{ij}\sigma_{kl}\sigma_{mn})^\gamma + \dots = 1 \quad [12]$$

avec :

i, j, k, l, m, n, \dots les directions du matériau

F_{ij}, F_{ijkl}, \dots tenseurs de résistance dans les différentes directions du matériau

α, β, γ constantes

Les auteurs ajoutent que pour un état de contrainte en deux dimensions, l'expression peut se réduire à l'équation [13].

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{66}\sigma_6^2 = 1 \quad [13]$$

Dans l'expression [13], les constantes α et β sont égales à 1 et les autres exposants sont égaux à $-\infty$. Le seul terme d'interaction retenus par Goldenblat et Kopnov dans cette équation est celui liant la contrainte normale à celle du cisaillement (F_{12}).

Tsai et Wu¹¹ supposent que les termes d'interactions de l'équation de Goldenblat et Kopnov sont indépendants. Ceci a pour conséquence que les termes de la forme F_{ij} ne peuvent pas être déterminés par des tests uniaxiaux et que des tests biaxiaux sont nécessaires pour caractériser ces coefficients. Ainsi, 12 paramètres indépendants doivent être déterminés pour caractériser la surface d'état limite ce qui se traduit par 12 essais de caractérisation : trois essais uniaxiaux suivant l'axe d'orthotropie, trois essais uniaxiaux hors des axes à une orientation de 45° et trois essais de cisaillement ou des essais biaxiaux. Le critère de Tsai-Wu peut s'écrire sous deux formes comme l'indiquent les équations [14] et [15]

$$F_i\sigma_i + F_{ij}\sigma_i\sigma_j = 1 \quad [14]$$

ou

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_3\sigma_3 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_3^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 + 2F_{31}\sigma_3\sigma_1 + F_{44}\sigma_4^2 + F_{55}\sigma_5^2 + F_{66}\sigma_6^2 = 1 \quad [15]$$

La principale difficulté pour utiliser ce critère pour le bois est de déterminer avec la précision nécessaire les coefficients d'interactions F_{ij} [GAU 1980], [BOU 1993]. Ces coefficients sont très importants car ils donnent la forme géométrique du critère dans le repère des contraintes. Pour illustrer l'influence de ces coefficients d'interaction sur la forme du critère, Kasal et Leichti partent du critère

¹¹ Tsai, S.W. & Wu, E.M. (1971). A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials*: 5(1): 58-80

donné par Hemmer¹² pour du bois de Sapin (*Abies alba*) qui prend l'expression suivante :

$$0,0482\sigma_1^2 + 0,000418\sigma_2^2 + 0,01\sigma_6^2 - 0,00226\sigma_1\sigma_2 + 0,018\sigma_1 - 0,01\sigma_2 + 0,0206\sigma_6 = 1.$$

En changeant le coefficient d'interaction ($F_{12} = 0,00226$) de 100%, ce qui correspond, d'après les auteurs à une erreur sur la mesure du test biaxial de 5%, la forme du critère change de manière très importante comme le montre la Figure 141.

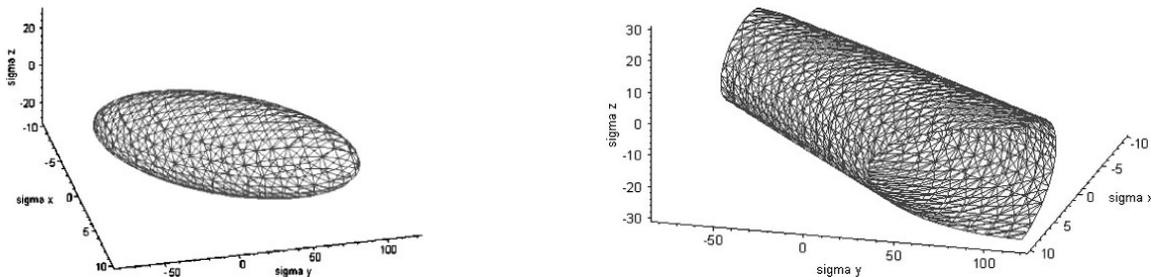


Figure 141 : Changement de la forme du critère de rupture d'*Abies alba* dû à la variation de 100% du coefficient d'interaction (variation due à une erreur de 5% lors du test biaxial – [KAS 2005])

1.1.3. Utilisation des modèles éléments finis par critère de rupture pour modéliser le comportement global du bois

Bouchaïr [BOU 1993] a appliqué la forme générale du critère de Tsai-Wu en tant que critère d'écoulement plastique associé pour le matériau bois. Pour éviter le problème lié à la sensibilité du critère due à la variation du coefficient d'interaction F_{12} illustré par Kasal et Leichti [KAS 2005] sur la figure 141, Bouchaïr a été amené à tester différentes valeurs de ce coefficient pour choisir la forme du critère la mieux adaptée au bois et finalement, il choisit le critère de la figure 142 (a). Ce critère permet de prendre en compte la dissymétrie entre la résistance en compression et en traction du matériau mais pose le problème qu'il donne une valeur de résistance en sollicitation mixte traction longitudinale et transversale légèrement supérieure à celle en traction uniaxiale (zone entourée en rouge de la figure 142). L'utilisation de ce critère permet à l'auteur d'expliquer certaines ruptures dans les assemblages brochés en définissant par ailleurs des zones potentielles de rupture. Bouchaïr souligne qu'un des problèmes principaux de ce critère est qu'il ne prend pas en compte le comportement fragile du bois en traction.

Un autre problème lié à l'utilisation d'un modèle de ce type est l'incapacité de distinguer les différents modes de ruptures : il s'agit d'un critère global qui ne donne pas suffisamment d'indication sur le comportement mécanique du matériau. Pour palier à ce problème, Helnwein et al. [HEL 2001] ont introduit une deuxième surface

¹² Hemmer, K. (1985) Versagensarten des Holzes der Wei_tanne (*Abies alba*) unter mehrachsiger Beanspruchung. *PhD thesis. University of Karlsruhe, Karlsruhe, Allemagne, 149 p.*

pour décrire la non linéarité introduite par la compression radiale ; ce modèle ne permet cependant pas de prendre en compte le comportement fragile du matériau en traction.

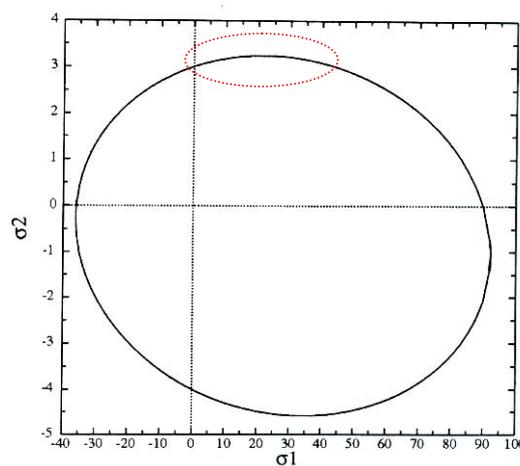
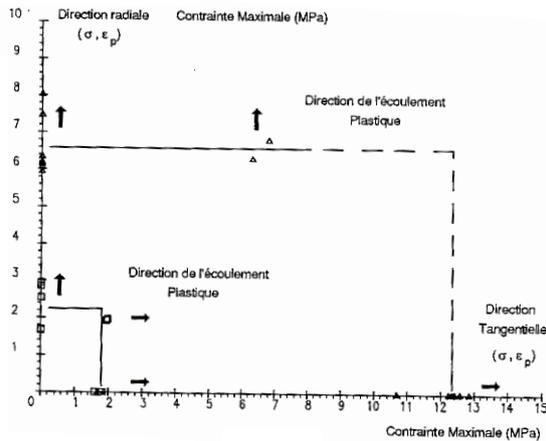
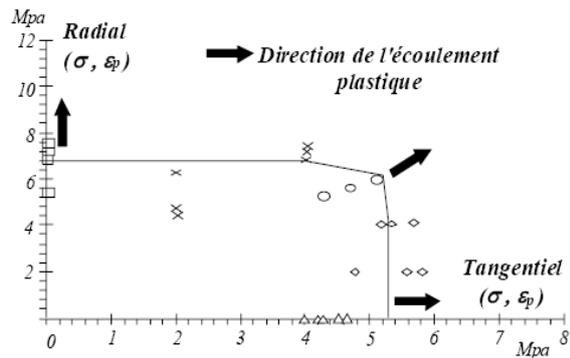


Figure 142 : Critère de Tsai-Wu utilisé par Bouchair [BOU 1993] pour modéliser des assemblages brochés

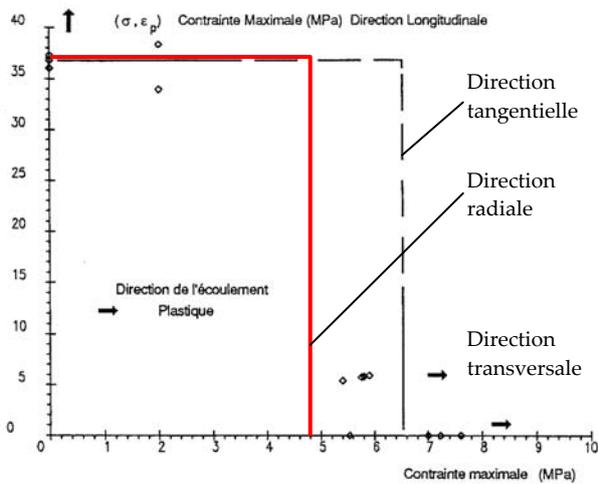
D'autres surfaces de charges ont été développées dans la bibliographie. En 1992, François [FRA 1992] a travaillé sur des essais uni, bi et triaxiaux sur le matériau bois et en particulier sur du Peuplier. A partir de ces essais, il propose un critère de rupture liant la compression dans les différentes orientations du bois. Il a montré que dans les essais uni et multiaxiaux, la matière s'écoule dans la direction de plus faible résistance mécanique. Il observe en outre que la sollicitation du matériau dans une direction n'influence pas les limites élastiques dans les autres directions, qui restent égales à celles d'une sollicitation uniaxiale. Ainsi, lorsque le bois est sollicité de manière multiaxiale, et que la limite élastique uniaxiale dans une des directions est atteinte, alors la matière s'écoule dans cette direction. François affirme donc que le comportement plastique est découplé ce qui signifie que les directions sont indépendantes les unes des autres en ce qui concerne le comportement plastique. Concrètement, pour des espèces où les limites élastiques en compression radiale et tangentielle sont différentes (Balsa et Pin Maritime - Figure 143 (a)), la surface de charge dans le plan RT est un rectangle et l'évolution de cette surface est normale à la surface de base. En revanche, pour une espèce où les limites élastiques en compression radiale ou tangentielle sont proches (Peuplier - Figure 143 (b)), la surface de charge dans le plan RT est un rectangle dont un de ses angles est tronqué.



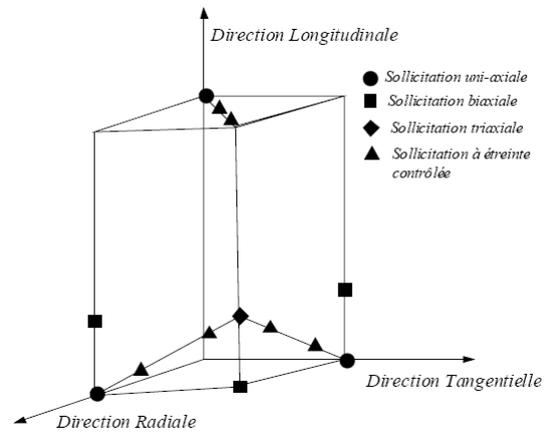
(a) Fonction de charge dans le plan RT pour le Balsa et le Pin Maritime



(b) Fonction de charge dans le plan RT pour le Peuplier



(c) Fonction de charge dans le plan LR et LT pour le Peuplier



(d) Représentation en 3D de l'enveloppe de rupture du Peuplier

Figure 143 : Représentation du critère boîte de François [FRA 1992]

Dans tous les cas, la limite élastique du bois en compression longitudinale étant plus élevée que dans les directions transversales, la surface de charge dans le repère LR ou LT est un rectangle (Figure 143 (c)). Dans le cas où le bois est considéré comme isotrope transverse (propriétés mécaniques dans les directions radiales et tangentiels égales), le critère est toujours rectangulaire. Le critère résultant de ces observations est appelé critère boîte (Figure 143 (d)). La pression nécessaire pour la réalisation des essais bi et triaxiaux font que le critère boîte de François n'est valide que jusqu'au plateau de densification.

Adalian [ADA 1998] a travaillé sur la modélisation du bois en tant qu'absorbeur de chocs dans des conteneurs. Le matériau est alors sollicité uniquement en compression ce qui permet de retenir le modèle boîte pour la modélisation. Il est considéré comme étant isotrope transverse. Adalian part du principe que le bois se comporte comme une structure en nid d'abeille lors de sa compression. Elle utilise

alors cette structure comme base de maillage dans laquelle elle implémente une loi de comportement du bois en compression sous LS-DYNA3D. La figure 99 montre les différents paramètres qu'elle considère pour la modélisation du bois en compression. Tant que $\varepsilon < \varepsilon_c$, le bois est un matériau poreux et Adalian utilise le modèle boîte de François ; au-delà, le matériau est consolidé et est modélisé par un comportement plastique de type Von-Mises.

Le critère boîte de François est applicable uniquement dans les cas où le bois n'est soumis qu'à de la compression. La traction uniaxiale et le cisaillement (ainsi que leurs interactions) ne sont pas pris en compte.

Pour aller plus loin dans la démarche de François, Eberhardsteiner [EBE 2002] a réalisé une machine permettant de solliciter le bois en traction et en compression simultanément, ce qui lui a permis de réaliser des sollicitations biaxiales sur des éprouvettes de résineux sans défaut (Figure 104). Il considère le matériau bois comme isotrope transverse. Il a reporté les résultats trouvés dans un repère de contraintes avec en abscisse la contrainte dans la direction longitudinale et en ordonnée la contrainte dans la direction transversale (Figure 144). En essayant de faire correspondre un critère de Tsai-Wu à ses résultats expérimentaux, il s'avère que le critère ne correspond pas exactement aux valeurs d'essais notamment au niveau de la traction longitudinale. Pour palier à cette constatation, Mackenzie-Helnwein et al. [MAC 2005] prennent en compte quatre modes de rupture observés (rupture fragile en traction parallèle au fil du bois, rupture fragile en traction perpendiculaire au fil du bois, rupture ductile en compression perpendiculaire au fil du bois et rupture ductile en compression parallèle au fil du bois) et un mode de rupture en cisaillement pour constituer un critère de rupture. Ils ont donc réalisé un modèle multicritère. Du fait des mécanismes de rupture mis en jeu, le modèle n'est valide que pour du bois de résineux.

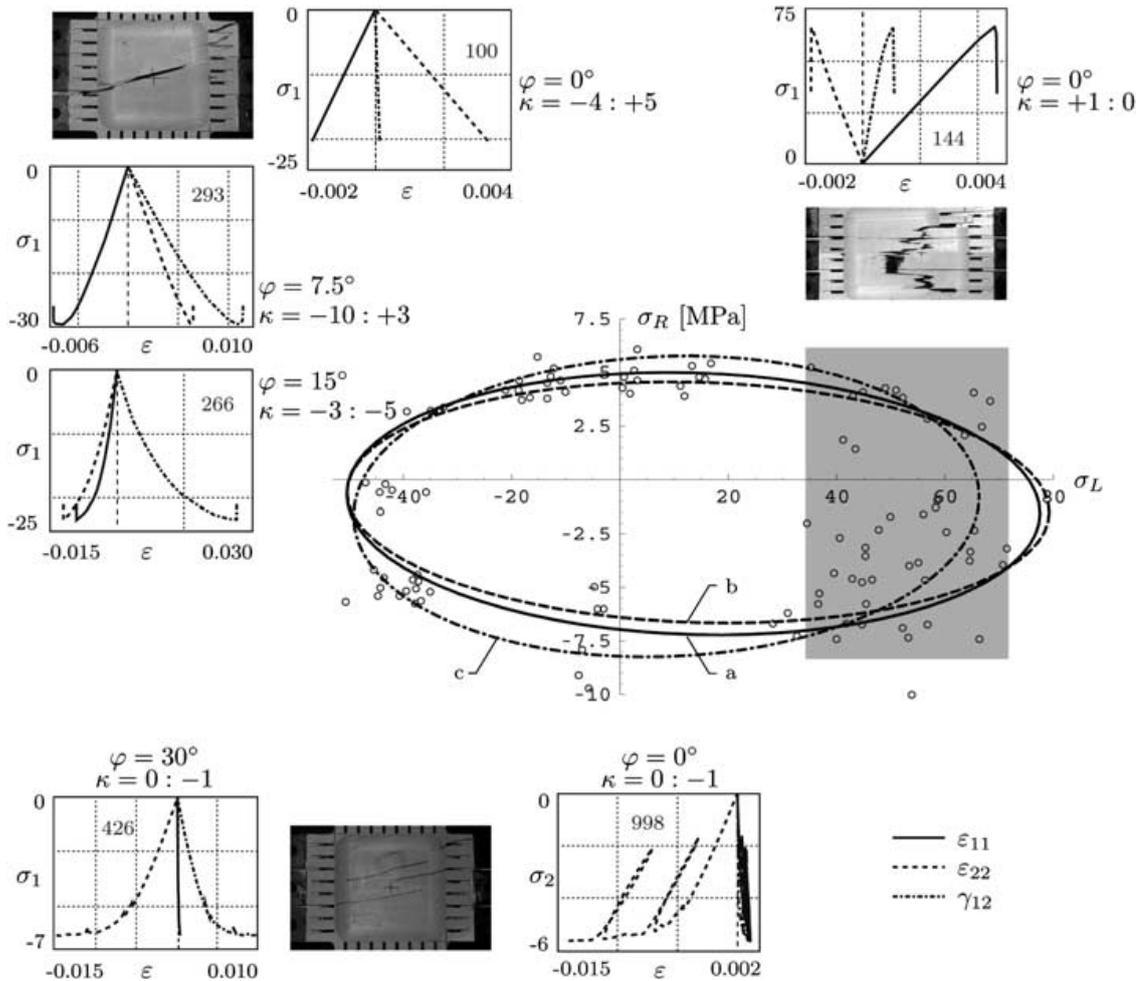


Figure 144 : Résultats issus d'essais biaxiaux sur le bois [MAC 2005]

Fleischmann [FLE 2005] et Fleischmann et al. [FLE 2007] ont utilisé ce critère pour modéliser un essai sur une ferme qu'ils ont préalablement réalisée (Figure 145). La figure 145 montre que le modèle décrit sous-estime la limite élastique par rapport à l'essai. Ceci peut s'expliquer par le fait que le modèle décrit mal le comportement en cisaillement du bois lorsque la déformation est trop importante (zone C de la figure 15). En effet, Eberhardsteiner [EBE 2002] précise que les essais qu'il a réalisés (à partir desquels le modèle est construit) ne prennent pas en compte la zone de densification du bois en compression.

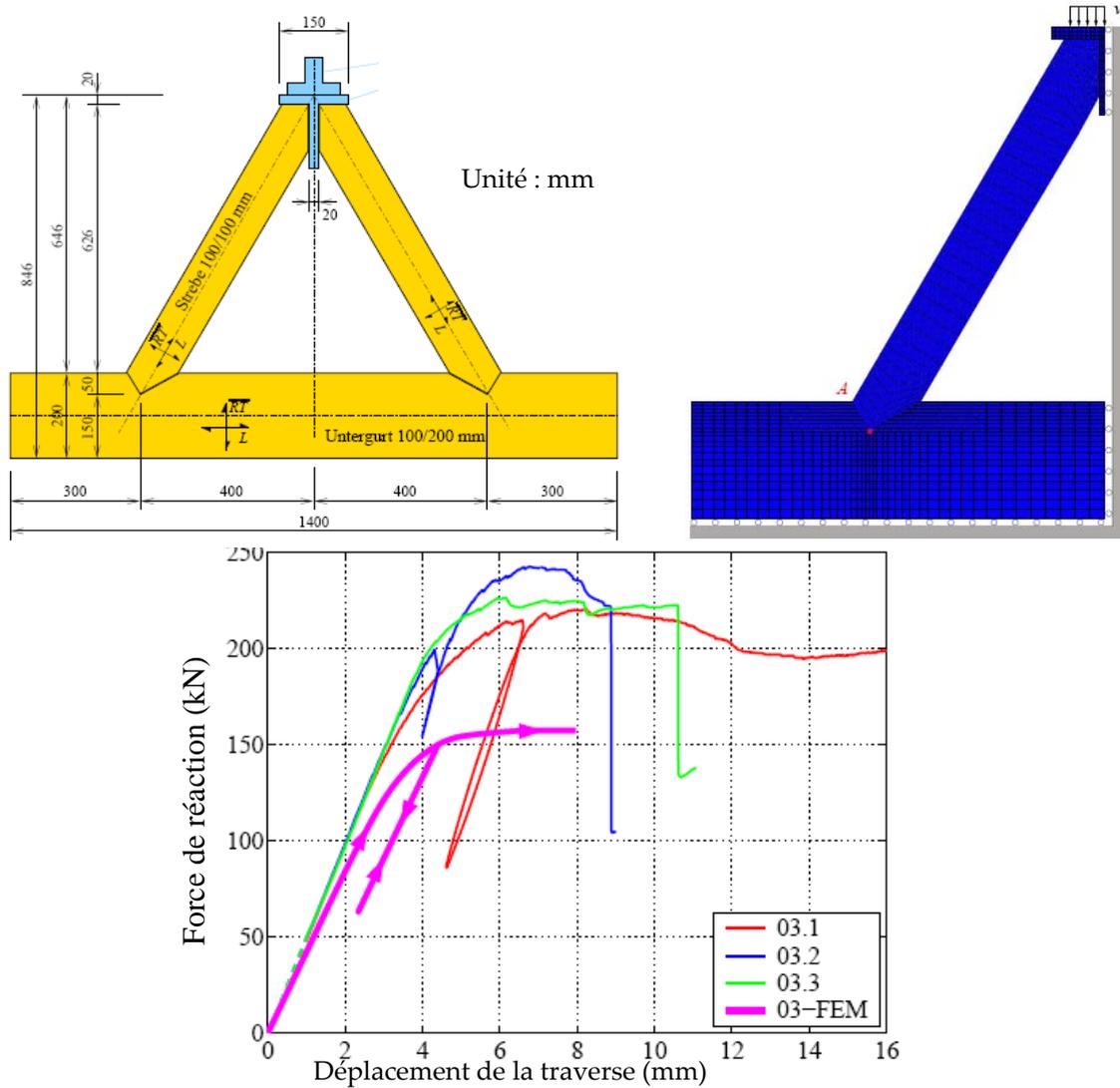


Figure 145 : Modélisation d'une ferme par le modèle de Mackenzie-Helnwein et al. [FLE 2005]

Grosse [GRO 2005] et Grosse et Rautenstrauch [GRO 2004] ont développé un modèle orthotrope multisurface pour le bois de résineux sans défaut. Pour les sollicitations uniaxiales, les auteurs se basent sur des observations du matériau à la rupture jusqu'à l'échelle cellulaire. Ils prennent en compte trois interactions : interaction traction transversale et cisaillement dans le plan LT et le plan LR ainsi que la compression transversale et le cisaillement dans le plan LR. Ces interactions sont déterminées à partir de données bibliographiques. A partir de ces observations et de ces recherches bibliographiques, Grosse et Rautenstrauch ont construit une surface limite à partir de différentes surfaces indépendantes comme l'indique la figure 146. La direction dans laquelle le critère s'écoule n'a, d'après les auteurs, fait l'objet d'aucune étude valide, aussi le critère d'écoulement est pris associé.

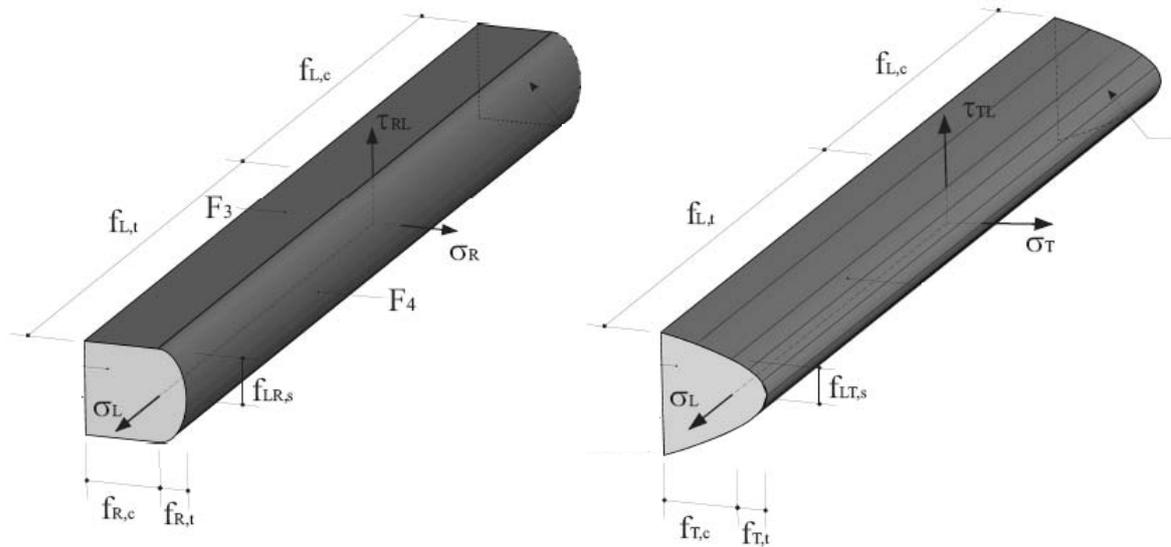


Figure 146 : Critère multisurface pour du bois de résineux [GRO 2005] :
 (a) dans le plan LR et (b) dans le plan LT

Hormis, l'interaction compression transversale – traction longitudinale, ce critère multisurface semble complet. Il a été utilisé pour simuler un test de cisaillement d'un plancher bois-béton et les résultats du modèle sont confrontés à des données expérimentales (Figure 147).

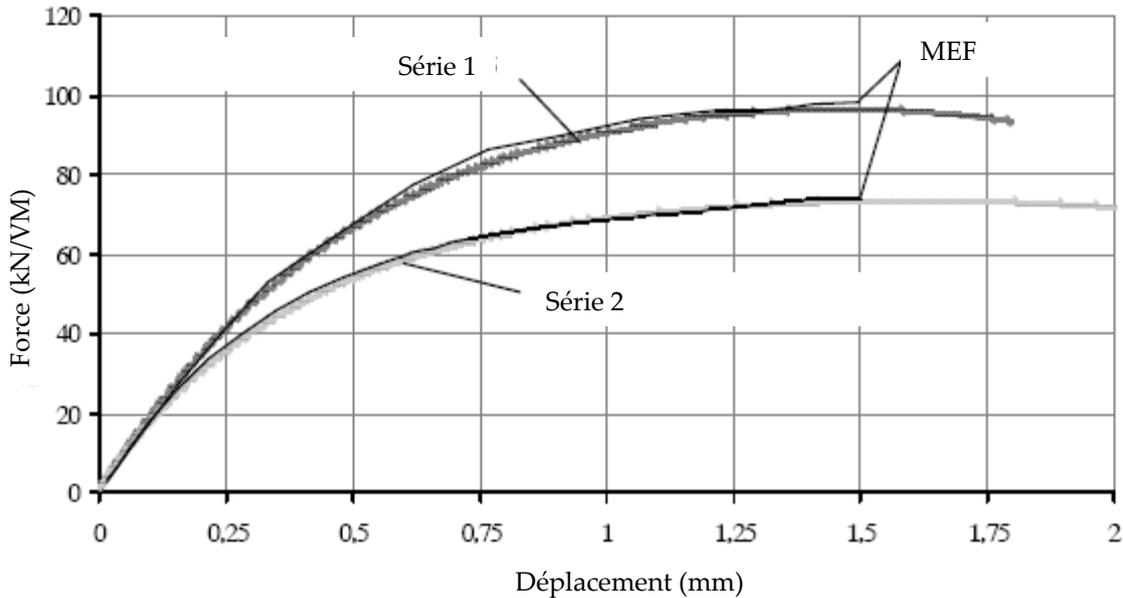


Figure 147 : Confrontation entre le modèle multi critère et un test de cisaillement d'un plancher bois-béton [GRO 2005]

Néanmoins, ce modèle nécessite de nombreuses données sur les matériaux qui ne sont pas facilement déterminables notamment pour le bambou. De plus, il est implémenté dans Ansys qui n'est pas à disposition pour cette étude ; il nécessiterait alors de coder tout ce modèle dans le logiciel à disposition ce qui n'est pas possible dans le temps imparti. Ce type de modèle, très précis, nécessite une connaissance très

pointue du matériau pour déterminer sa surface de charge. Cependant, son écoulement plastique est considéré comme associé ce qui n'est pas vérifié car difficilement mesurable expérimentalement. Il est donc choisi de réaliser un modèle plus simple dont les paramètres d'entrée sont déterminés expérimentalement.

1.1.4. Conclusion sur l'utilisation des modèles éléments finis utilisant les fonctions de charge pour simuler les assemblages précontraints bois

Pour simuler les assemblages précontraints pour le bois, il est nécessaire de densifier le matériau jusque dans la zone de densification proprement dite. Aussi, malgré la caractérisation complète du bois de résineux sans défaut réalisée grâce à sa machine biaxiale, Eberhardsteiner [EBE 2002] (Figure 144) ne peut caractériser le bois en compression au-delà du plateau de densification. Aussi, ce modèle ne semble pas adapté à la simulation des assemblages étudiés.

Le critère multisurface développé par Grosse [GRO 2004] [GRO 2005] permet de dépasser le plateau de densification. Cependant, le temps imparti à la réalisation de la modélisation par éléments finis des essais précontraints ne permet pas d'implémenter et de maîtriser parfaitement un modèle aussi compliqué. Aussi, il est choisi de ne pas utiliser cette modélisation pour répondre à la problématique posée.

L'analogie du bois à un matériau cellulaire ou à une mousse en compression a été énoncée par Gibson et Ashby [GIB 1997] (Figure 148). A partir de ces travaux et du modèle boîte de François [FRA 1992], Adalian [ADA 1998] réalise son modèle. Ce dernier permet d'aller au-delà du plateau de densification. Cependant, il ne permet pas de prendre en compte d'autres sollicitations ni interactions que celles en compression. Cette façon de modéliser est donc à rejeter pour la simulation à réaliser.

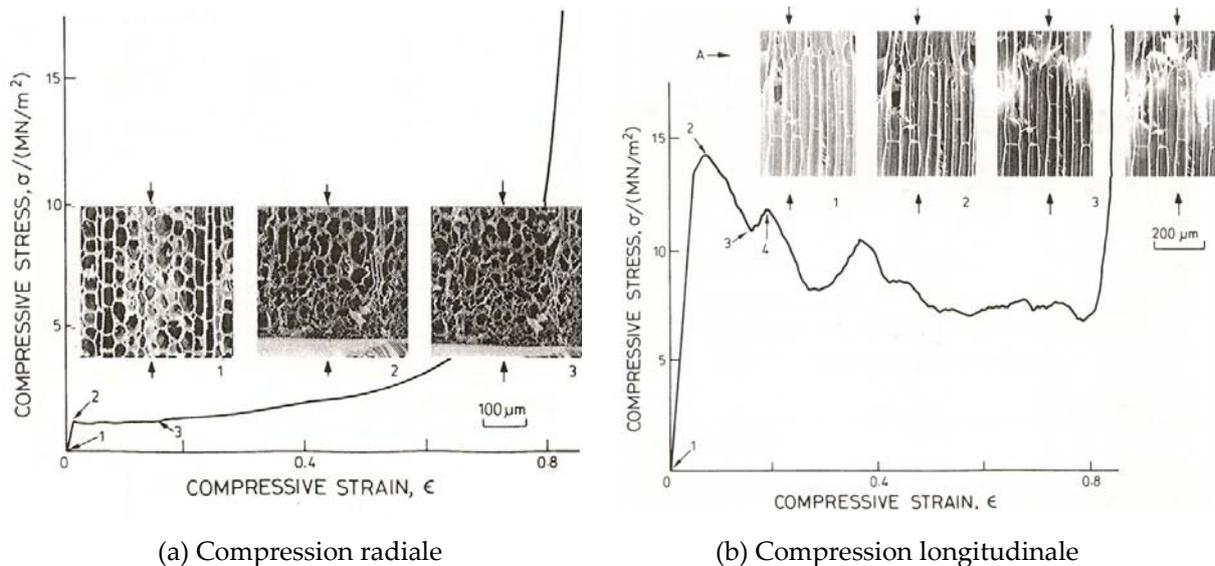


Figure 148 : observations microscopiques d'une éprouvette de Balsa à différents taux de densification [GIB 1997]

1.1.5. Discussion sur l'hypothèse de la continuité du matériau bois à l'échelle des assemblages

L'hypothèse des milieux continus consiste à considérer la matière ayant des propriétés caractéristiques (masse volumique, élasticité, résistance...) qui évoluent de manière continue à l'échelle du volume considéré. Dans une structure de génie civil (poutre courbe par exemple), cette hypothèse est respectée pour le bois. Cependant, au niveau local – par exemple au niveau d'un assemblage – cette hypothèse est discutable pour ce matériau. En effet, du fait de leur croissance annuelle, les arbres produisent du bois aux propriétés différentes au printemps et en été et le passage des cernes d'une année à l'autre est brutal. Comme il a été vu au Chapitre 1, Thoby [THO 1975] a mesuré la variation de la masse volumique du bois de Douglas de la moelle au tronc d'un arbre (Figure 149). Il a montré que le passage d'un cerne à l'autre se caractérise par une variation très brutale- de l'ordre de 70%- de la masse volumique. Le fait d'avoir choisi ce paramètre est intéressant car il est proportionnel aux différentes propriétés mécaniques du matériau.

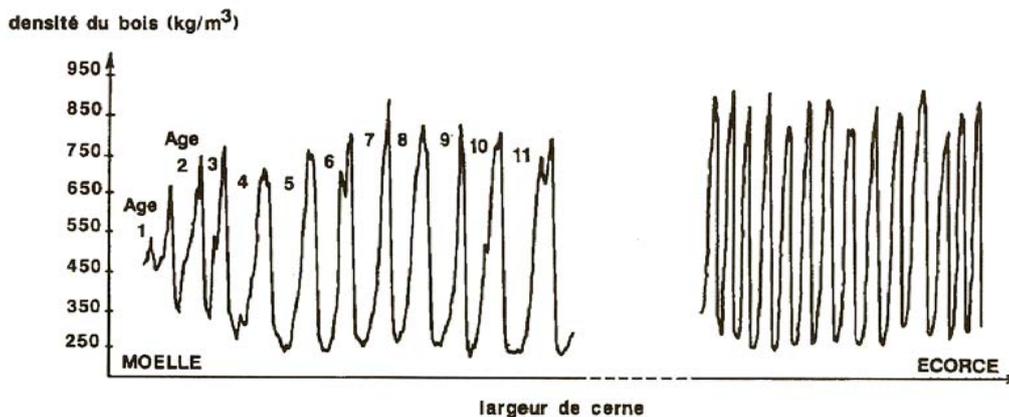


Figure 149 : Evolution des courbes de densité du bois dans la direction radiale de différents cernes dans un tronc d'arbre chez un Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) [THO 1975]

D'après Redington [RED 1993], à partir d'une échelle inférieure à 10 cm, il est difficile de considérer le bois comme un matériau continu. En effet, pour de l'Épicéa, les propriétés mécaniques varient de manière très importante et de façon discontinue tous les 1 à 8 mm (Figure 13) ce qui correspond à la largeur des cernes [TRO 2001]. Dans un milieu continu cette variation locale des propriétés du matériau n'est pas prise en compte mais elle a pourtant des conséquences importantes. Par exemple, la figure 150 montre l'arbalétrier d'une ferme traditionnelle après essai (test de l'assemblage bois-bois entre l'arbalétrier et l'entrait [BOC 2005]) : les cernes sont séparés les uns des autres en traction transversale. Ce comportement s'explique par l'hétérogénéité à l'échelle des cernes du matériau bois qui ne peut être pris en compte par une modélisation du matériau comme un milieu continu.

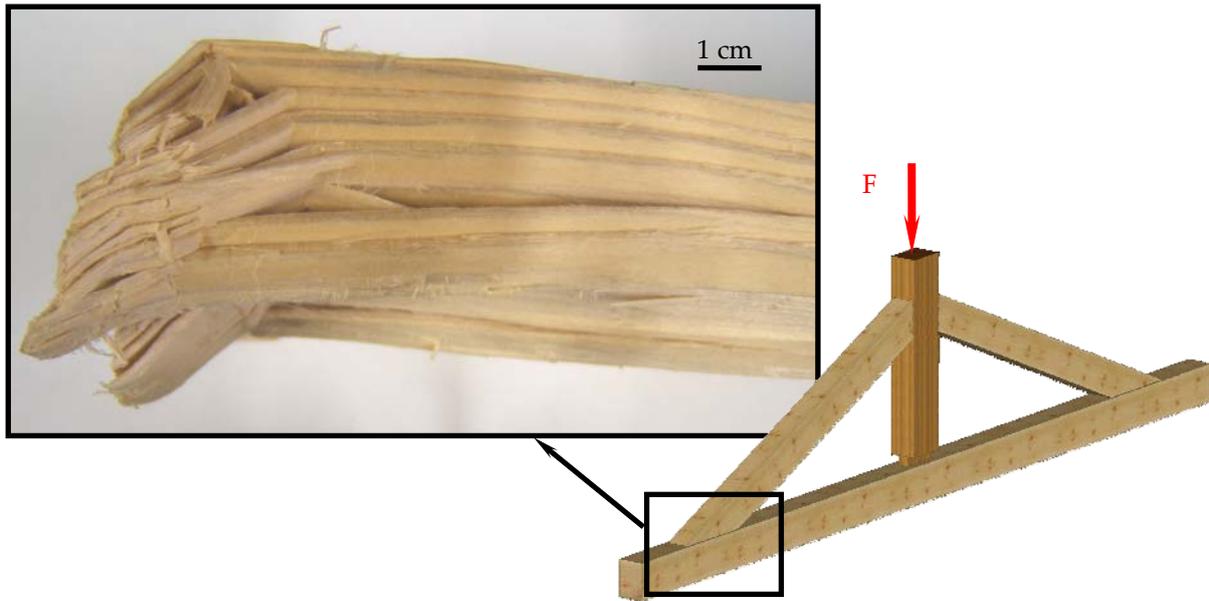


Figure 150 : Test de l'assemblage entre l'arbalétrier et l'entrait d'une ferme traditionnelle

Cette hétérogénéité a des conséquences sur le comportement du matériau pour de grandes déformations mais a en plus des conséquences sur l'estimation de son champ de contrainte et ce dès une déformation faible. Pour des assemblages brochés, par exemple, il est nécessaire de mailler de manière fine la zone de bois sous la broche pour prendre en compte les variations importantes du champ de contrainte [BOC 1997]. Outre le fait que ce maillage fin rigidifie la structure, ceci pose un problème au niveau de la continuité du matériau. En effet, les propriétés des surfaces de charges sont déterminées à partir de volumes de bois relativement importants : des cylindres de 36 mm de diamètre et 14 et 7 mm de hauteur respectivement pour les tests bi et triaxiaux de François [FRA 1992] et des parallélépipèdes de 250x250 mm² de surface pour 20 mm de large pour Eberhardsteiner [EBE 2002]. Or si les éléments entrés dans le modèle sont trop petits, les propriétés globales trouvées expérimentalement ne sont pas valables du fait de la grande hétérogénéité du matériau bois.

Enfin, malgré les protocoles expérimentaux de plus en plus sophistiqués, les coefficients d'interaction du matériau bois sont très difficiles à mesurer et aucune étude expérimentale sur les interactions emmenant le bois au-delà du plateau de densification n'a encore été proposée. A partir des surfaces de charges initiales obtenues, il est nécessaire de déterminer le chemin d'écoulement plastique de la matière. Malheureusement, peu de travaux existent sur ce sujet [GRO 2004]. Aussi, la plupart du temps, l'hypothèse d'un critère associé est prise sans qu'elle ne soit réellement vérifiée.

Pour palier à ces problèmes, des études ont été menées à une échelle cellulaire. Dans ce cas, le matériau est modélisé comme une structure qui prend en compte la forte hétérogénéité du matériau au sein d'un cerne.

1.2. Modélisation du bois à une échelle cellulaire

Redington [RED 1993] a travaillé sur la déformation et l'endommagement du bois juvénile. Il a modélisé ce dernier lors de sollicitations transversales. Tout comme Gibson et Ashby [GIB 1997] et Adalian [ADA 1998], il considère le bois comme un matériau cellulaire pour ce type de sollicitation. Cependant, il fait la remarque que le bois n'est pas un matériau continu et le divise en deux matériaux successifs distincts : le bois initial et le bois final (Figure 14). Pour modéliser par éléments finis ces deux matériaux cellulaires successifs représentant le bois, Redington utilise le modèle Mousse incrémenté dans Abaqus® (Crushable Foam). Cette formulation a été implémentée à partir des travaux de Gibson et Ashby [GIB 1982(a)], Gibson et al. [GIB 1982(b)] et Maiti et al. [MAI 1984]. Ce modèle est cependant isotrope et ne permet donc pas de prendre en compte la différence de comportement entre les directions transversales et la direction longitudinale. Pour contourner ce problème, Redington modélise le bois en 2D dans le plan RT et considère le matériau comme isotrope transverse.

Holmberg et al. [HOL 1999] ont travaillé sur la modélisation du défibrage du bois d'Épicéa. Tout comme Redington, ils ont divisé chaque cerne en différentes parties. Pour eux, un cerne est représenté par six éléments : cinq éléments permettent de modéliser le bois initial avec des comportements qui évoluent progressivement vers le sixième élément modélisant le bois d'été. Les cinq éléments constituant le bois initial sont réalisés par des éléments mousses isotropes (crushable foam d'Abaqus) et l'élément pour le bois final a un comportement élastique. Tout comme Redington, ce modèle permet de simuler le comportement du bois uniquement dans le plan RT. Cependant, il permet de prendre en compte le caractère fragile du matériau grâce à des éléments fictifs de fracture. La figure 151 montre une des comparaisons entre l'expérience et le modèle du défibrage d'éléments de 5 mm de hauteur d'Épicéa. L'auteur précise que le modèle est trop rigide du fait de la petitesse des éléments qui constituent son maillage.

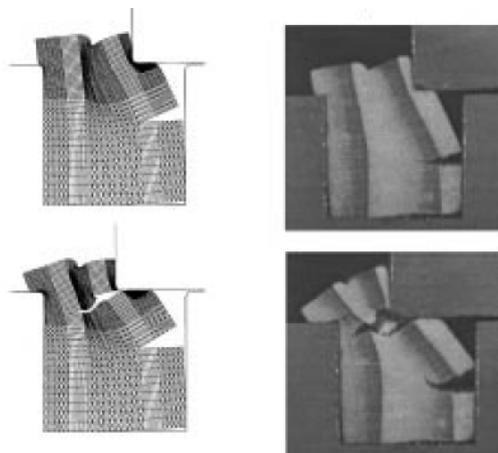


Figure 151 : Comparaison entre l'expérience et le modèle pour le défibrage d'éprouvettes d'Épicéa

De Magistris [DEM 2005] a étudié l'influence de la combinaison des efforts de compression et de cisaillement sur la déformation des fibres du bois. Pour se faire, elle a caractérisé le comportement des parois des cellules et a modélisé un ensemble de douze cellules comme une structure ce qui lui a permis de déterminer le paramètre critique qui provoque la déformation permanente des cellules.

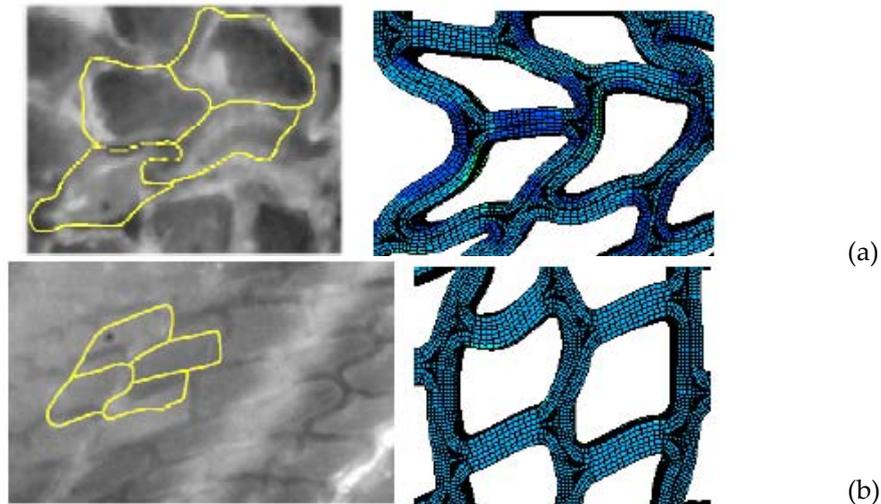


Figure 152 : Comparaison de la déformation des cellules entre les observations expérimentales et les données numériques [DEM 2005] :

(a) dans le cas d'une compression simple

(b) dans le cas d'une compression combinée à du cisaillement

Ces approches du bois comme une structure permettent de mesurer les contraintes dans le matériau en dessous de l'échelle du cerne. Cependant, elles sont limitées à des simulations dans le plan RT et les calculs sont très longs du fait du nombre important d'éléments. Pour résoudre ces problèmes, une autre approche a été proposée : il s'agit de la modélisation à l'échelle mésoscopique.

1.3. Modélisation du bois à une échelle mésoscopique

Bocquet [BOC 1997] et Racher et Bocquet [RAC 2005] proposent de modéliser le bois comme une structure. Ils considèrent le matériau comme une succession de bois de printemps peu résistant et de bois d'été résistant (Figure 153 (a)). Dans ce modèle, le bois final a une résistance importante dans la direction longitudinale mais comme une plaque orthotrope, il a peu de rigidité dans la direction transversale. L'insertion de ces plaques au sein des éléments modélisant le bois initial permet de prendre en compte les différences de comportement dans les directions radiale et tangentielle.

En considérant le bois comme isotrope transverse, le comportement en compression radiale et tangentielle est considéré comme équivalent. Il est alors possible de simplifier ce modèle en remplaçant les plaques rigides du bois d'été par des barres qui reprennent uniquement l'effort dans la direction longitudinale (Figure 153 (b)). Entre ces barres, des joints sont placés pour prendre en compte le comportement du bois dans la direction transversale (comportement identique dans

les directions tangentielle et radiale). La superposition de ces maillages constitue une structure représentant le bois à l'échelle mésoscopique imaginé par Bocquet.

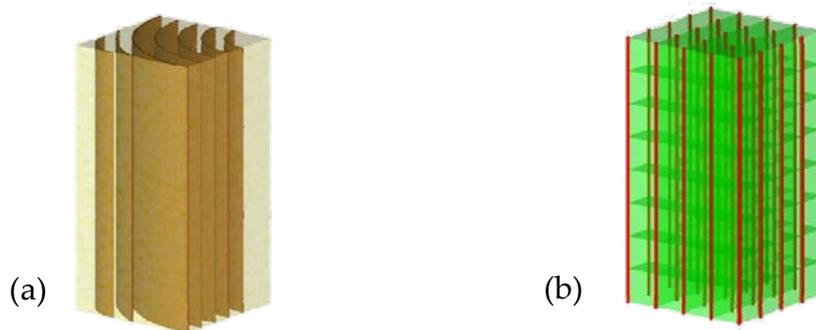
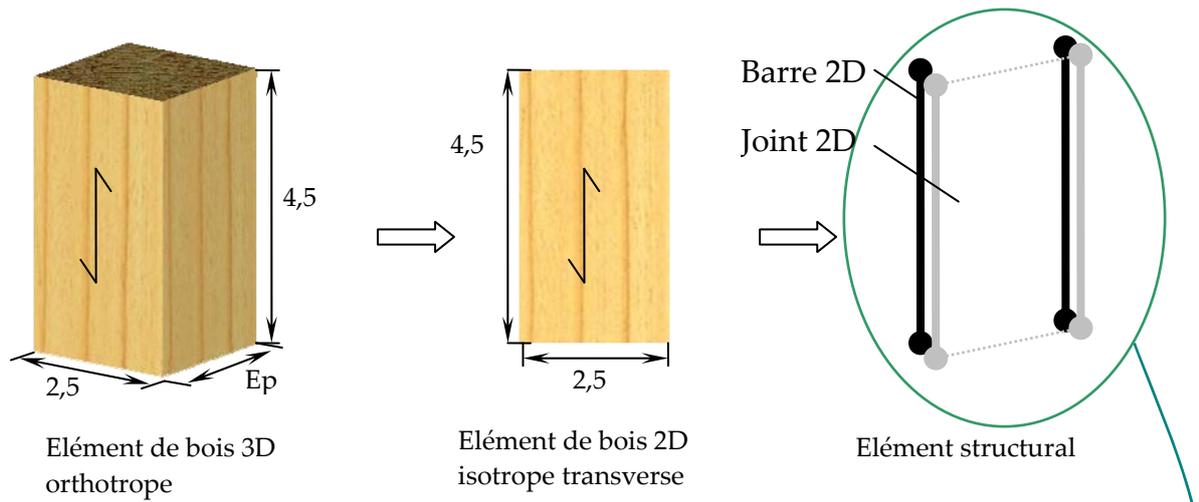


Figure 153 : Représentations du bois comme une structure : (a) succession de plaques courbes de différentes résistances (b) barres rigides noyées dans une matrice

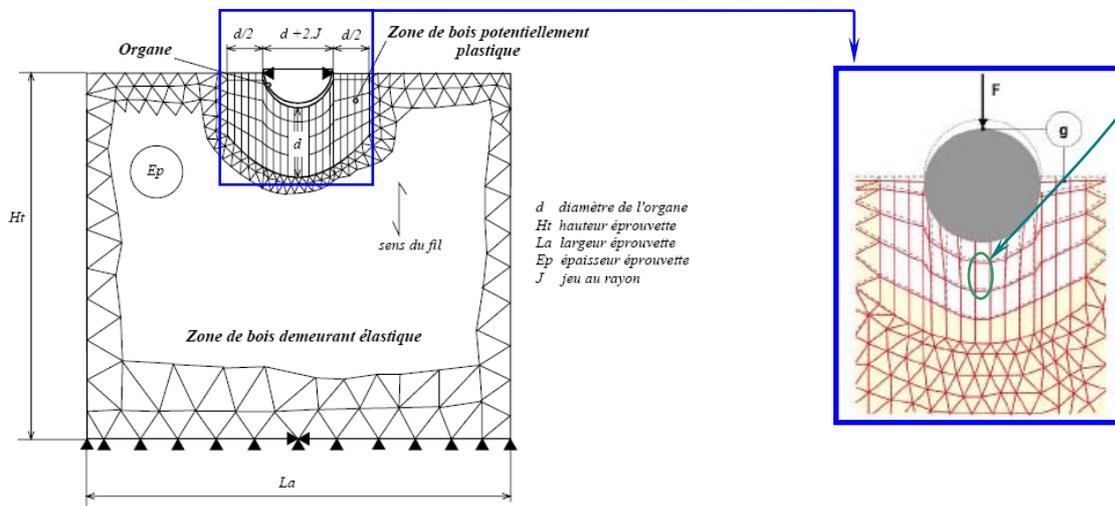
Bocquet a réalisé son modèle en deux dimensions sous CAST3M et représente le matériau bois comme la succession d'éléments de 4,5 mm dans la direction longitudinale par 2,5 mm dans la direction transversale. Un élément bois se caractérise par la superposition de quatre constituants (Figure 154 (a)). Dans la direction longitudinale, le comportement linéaire du bois est simulé par des éléments de type BARRE bi-articulés. Dans la direction transversale, le comportement non linéaire du matériau est modélisé par deux éléments de type JOINT. Ces derniers permettent également de simuler la forte interaction de la compression transversale et du cisaillement du bois. Dans ce modèle, en compression transversale, Bocquet s'arrête après le plateau de densification (zone B de la figure 15) et ne prend donc pas en compte la phase de densification du bois.

La superposition de ces formulations sur un même maillage permet de simuler l'enfoncement d'une broche dans le bois (Figure 154 (b)). Le bois qui est susceptible de « plastifier » sous la broche est modélisé par des éléments de ce type alors que le reste de l'éprouvette est simulé par un matériau orthotrope élastique. Ce modèle permet de simuler avec une précision satisfaisante l'enfoncement de la broche dans le bois (Figure 154 (c)).

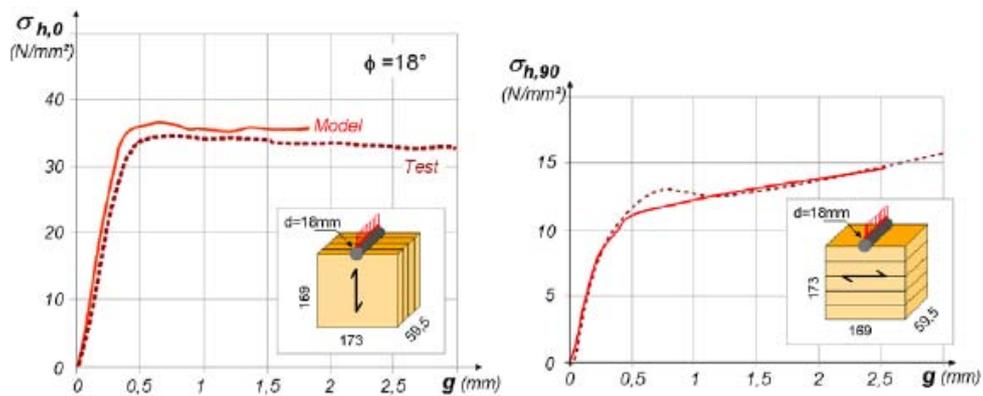
En modélisant le bois comme une structure mésoscopique, Bocquet simule l'écoulement « plastique » de la matière par l'effondrement de cette structure. Cette vision non continue de la matière lui permet d'éviter les problèmes liés à la taille des éléments et à la discontinuité du matériau. En effet, la contrainte est mesurée à partir de l'élément de base qui ne peut être inférieur à la taille d'un cerne. Or, d'après Tabarsa et Chui [TAB 1999], [TAB 2000], [TAB 2001] un cerne d'Epicéa a le même comportement qu'une éprouvette complète de la même essence (en l'absence de défauts). Ainsi, les caractéristiques du matériau trouvées sur des éprouvettes de grande taille (loi de comportement en compression transversale, module d'élasticité en traction longitudinale...) ont un sens sur les éléments du maillage du modèle mésoscopique.



(a) Réalisation d'un élément bois pour le modèle structural mésoscopique de Bocquet



(b) Maillage de l'enfoncement d'une broche dans le bois par le modèle structural



(c) Comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par le modèle structural :
à gauche : enfoncement d'une broche parallèlement aux fibres
à droite : enfoncement d'une broche perpendiculairement aux fibres

Figure 154 : Modélisation du bois comme une structure mésoscopique et application sur l'enfoncement d'une broche [BOC 1997] [RAC 2005]

Le modèle de Bocquet présente deux particularités principales par rapport aux autres façons de modéliser. Tout d'abord, il considère que les interactions étant très difficiles à mesurer expérimentalement, la plupart d'entre elles ne sont pas prises en compte. Seule l'interaction compression transversale – cisaillement est considérée par l'intermédiaire des éléments JOINTS. Au vu des résultats trouvés par l'auteur, pour des sollicitations de type enfoncement de broche, les autres interactions ne semblent pas intervenir.

L'autre particularité de ce modèle est la manière dont l'écoulement plastique est représenté. Pour les modèles utilisant les critères de ruptures, l'écoulement plastique n'ayant pas fait l'objet d'études expérimentales, les critères sont considérés comme associés. Dans le cas du modèle mésoscopique de Bocquet, l'écoulement plastique de la matière est modélisé par l'effondrement de la structure constituée des barres et des éléments joints notamment en compression longitudinale.

1.4. Conclusion quant au modèle retenu pour simuler les assemblages précontraints

La plupart des modèles réalisés pour le bois considèrent le matériau non pas comme orthotrope mais comme isotrope transverse ([ADA 1998], [FLE 2005], [FLE 2007], [BOC 1997] [RAC 2005]...). Aussi, le modèle retenu pour la simulation des assemblages précontraints pour les matériaux fibreux est un modèle isotrope transverse avec une loi de comportement dans la direction transversale étant la moyenne des lois dans les directions radiale et transversale.

Suite aux investigations menées, il semble que les modèles microscopiques soient trop gourmands en nombre d'éléments et donc en temps de calcul pour être adaptés à la simulation des assemblages précontraints.

De plus, outre les problèmes de la continuité du matériau présentés ci-dessus, la plupart des modèles macroscopiques ne permettent pas l'écoulement « plastique » de la matière au-delà du plateau de densification. Néanmoins, la représentation du bois comme un matériau cellulaire comme le préconise Gibson et Ashbi [GIB 1997] semble intéressante car elle permet de considérer toute la phase de densification du matériau bois. Le problème principal de la plupart des modèles mousses actuels est leur isotropie. Pour palier à ce problème, il est choisi de superposer sur le même maillage deux constituants différents : un constituant pour la direction transversale utilisant un matériau mousse et un autre constituant élastique linéaire pour prendre en compte le comportement dans la direction longitudinale.

Pour le problème de l'enfoncement d'une broche, étudié par Bocquet, l'effondrement de la structure en compression longitudinale est important car il permet de modéliser l'effondrement plastique de la matière. Pour la modélisation des assemblages précontraints, ce problème est moins important car le système est peu ou pas sollicité en compression transversale. Aussi, pour l'étude menée ici, la superposition des deux constituants permet de prendre en compte le caractère

anisotrope du matériau sans modéliser l'écoulement plastique de la matière en compression longitudinale. Il paraît nécessaire de se placer à une échelle mésoscopique (éléments ayant une taille supérieure ou égale à la largeur d'un cerne) pour que les caractérisations réalisées aux Chapitres 2 et 3 soient significatives.

Quel que soit le modèle considéré pour prendre en compte le comportement du bois dans la direction longitudinale, le constituant pour la direction transversale est un modèle mousse. Ce dernier étant implémenté dans Abaqus®, ce logiciel est choisi (version 6.9.2). Dans le paragraphe suivant, la loi de comportement de la mousse est décrite.

2. PRESENTATION DU MODELE MOUSSE D'ABAQUS®

Le modèle plastique « Crushable foam » d'Abaqus® permet de modéliser la plasticité des matériaux écrouissables et compressibles (les matériaux fibreux tels que le bois et le bambou peuvent être modélisés de cette manière dans la direction transversale). Abaqus® propose deux modèles d'écrouissages pour les mousses :

- Un modèle volumétrique où le comportement en traction et en compression est différent. Le comportement en traction de la mousse utilisant ce modèle est fragile alors que son comportement en compression est plastique.
- Un modèle isotrope où le comportement en traction et en compression est le même. Ce modèle a été développé pour décrire les mousses métalliques.

Dans le sens transversal, le comportement du bois et du bambou en traction est fragile alors qu'en compression, il est non-linéaire : pour s'approcher au mieux des caractéristiques des matériaux, le modèle mousse volumétrique d'Abaqus® paraît donc le plus adapté. Dans la suite du document, seul le modèle volumétrique sera traité et par abus de langage, le modèle volumétrique de la mousse d'Abaqus® est appelé simplement modèle mousse d'Abaqus®.

Le critère employé pour la mousse d'Abaqus® et son évolution peuvent être décrits en trois parties : le domaine élastique, la surface de charge et l'évolution du critère dans le domaine plastique.

2.1. Le domaine élastique

Sous Abaqus®, les domaines élastique et plastique sont dissociés. Néanmoins, pour son fonctionnement, le modèle plastique « Crushable foam » nécessite différents paramètres du domaine élastique. Ainsi, dans le domaine élastique, la mousse est caractérisée par un module d'élasticité, un module de Poisson (qui sont renseignés par l'utilisateur et égaux en traction et en compression) et une limite élastique.

Pour la traction, la limite élastique est déterminée à partir d'un coefficient de limite élastique en traction donnée par l'utilisateur : $k_t = \frac{p_t}{p_c^0}$, avec p_t et p_c^0 les limites élastiques hydrostatiques respectivement en traction et en compression. En traction, une fois cette limite élastique dépassée, il y a rupture ce qui se traduit par un comportement plastique parfait.

En compression, la mousse peut entrer en plasticité et la limite d'élasticité est la première valeur de la loi de comportement du domaine plastique entrée par l'utilisateur.

2.2. La surface de charge du modèle mousse d'Abaqus®

Dans son domaine plastique, l'élément mousse volumétrique d'Abaqus® est développé à partir des observations expérimentales de Gibson et Ashbi [GIB 1982(a)], Gibson et al. [GIB 1982(b)] et Maiti et al. [MAI 1984]. Les explications qui suivent sont extraites de [ABA 2009]. Sa surface de charge (\approx fonction de charge) doit prendre en compte la différence de comportement en traction (comportement fragile) et en compression (comportement plastique avec une phase de densification). Elle est définie dans le plan p-q c'est-à-dire le déviateur en fonction de la pression hydrostatique. Pour expliquer ce plan, il faut décomposer le tenseur des contraintes de Cauchy en une composante hydrostatique et une autre déviatorique :

$$\bar{\sigma} = \bar{S} + \bar{D} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix}}_{\text{Partie sphérique}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \sigma_{11} - \sigma_m & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} - \sigma_m & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} - \sigma_m \end{bmatrix}}_{\text{Partie déviatorique}}$$

- avec :
- $\bar{\sigma}$: le tenseur des contraintes
 - \bar{S} : le tenseur des contraintes sphériques (hydrostatiques)
 - \bar{D} : le tenseur des contraintes déviatoriques
 - σ_{ij} : les contraintes
 - σ_m : la contrainte normale moyenne (en traction ou en compression)
- $$\sigma_m = \frac{1}{3} Tr(\bar{\sigma}) = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}).$$

Par exemple, pour une sollicitation en traction simple, la matrice des contraintes peut s'écrire :

$$\bar{\sigma} = \bar{S} + \bar{D} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \sigma_{11}/3 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{11}/3 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{11}/3 \end{bmatrix}}_{\text{Partie sphérique}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 2\sigma_{11}/3 & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_{11}/3 & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_{11}/3 \end{bmatrix}}_{\text{Partie déviatorique}}$$

Le tenseur des contraintes sphériques change le volume sans changer la forme alors que le tenseur des contraintes déviatoriques change la forme à volume constant. Le tenseur des déformations peut être schématisé comme le montre la figure 155.

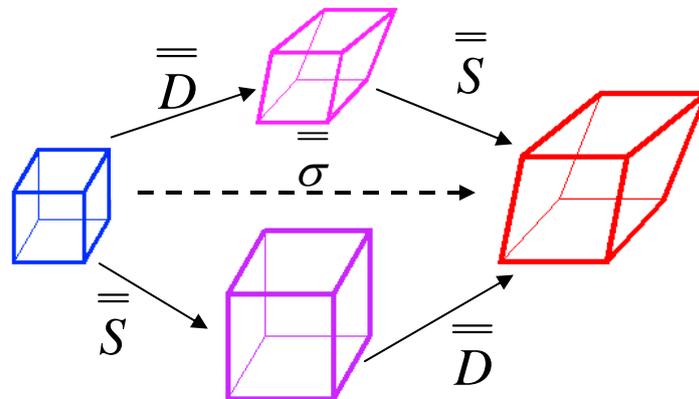


Figure 155 : Schéma représentant la déformation d'un volume soumis à un tenseur de contrainte, somme d'un tenseur de contraintes sphériques et d'un tenseur de contraintes déviatoriques

Dans le plan p-q, l'axe des abscisses représente la pression hydrostatique, c'est-à-dire la pression égale dans toutes les directions du plan. L'axe des ordonnées représente le déviateur c'est-à-dire les contributions des contraintes autres qu'hydrostatiques. Il est possible de représenter ce repère dans le repère principal des contraintes (Figure 156).

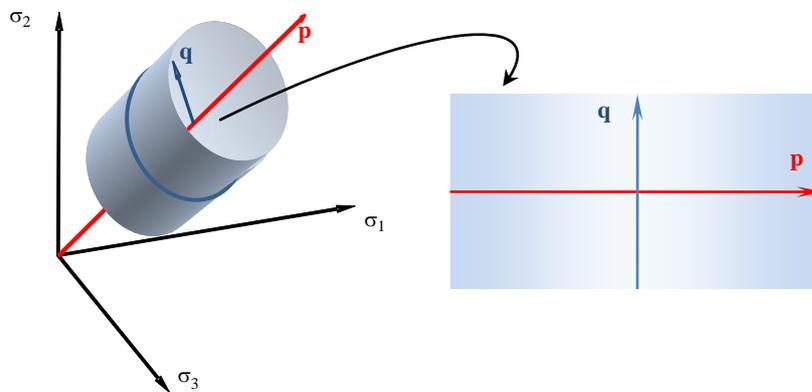


Figure 156 : Représentation du plan p-q dans le plan des contraintes principales

Dans ce plan p-q, la surface de charge initiale de la mousse se présente sous la forme d'une ellipse (Figure 157) qui est définie par l'équation [16].

$$F = \sqrt{q^2 + \alpha^2(p - p_0)^2} - B \quad [16]$$

avec : q le déviateur,

p la contrainte hydrostatique,

α le coefficient de forme de l'ellipse de la surface plastique,

p_0 le centre de l'ellipse de la surface plastique,

B la hauteur de l'ellipse de la surface plastique sur l'axe q .

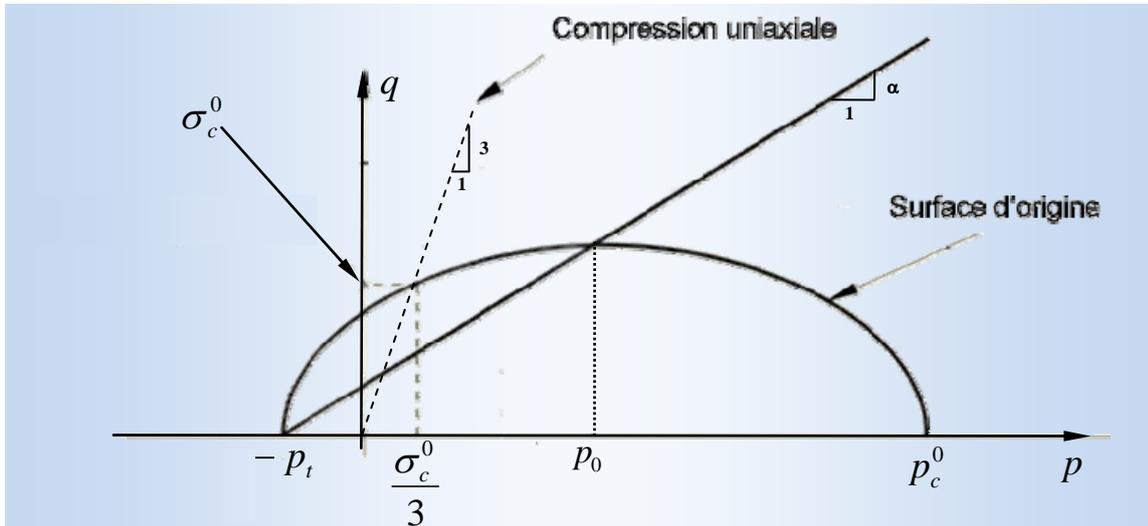


Figure 157 : Représentation de la fonction de charge initiale du critère de la mousse d'Abaqus dans le repère p - q [ABA 2009]

La fonction de charge représentée sur la figure 157 est pour l'instant initiale, c'est-à-dire la limite élastique avant tout chargement. Pour cette raison, certaines variables présentent un indice 0 alors que dans la suite, cet indice disparaît pour se trouver dans un cas général.

Les paramètres qui constituent cette équation sont définis comme suit :

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} \overline{D:D}},$$

$$p = -\frac{1}{3} \text{trace}(\sigma),$$

$$p_0 = \frac{p_c + p_t}{2} \quad \text{avec } p_c \text{ et } p_t \text{ les limites élastiques hydrostatiques}$$

respectivement en compression et en traction,

$$B = \alpha A = \alpha \frac{p_c - p_t}{2}, \quad A \text{ étant la longueur de la demi ellipse suivant l'axe } p,$$

$$\alpha = \frac{3k}{\sqrt{(3k_t + k)(3 - k)}} \quad \text{avec } k \text{ et } k_t \text{ donnés par l'utilisateur et définis par :}$$

$$k, \text{ le coefficient de limite élastique en compression : } k = \frac{\sigma_c^0}{p_c^0} \quad \text{avec :}$$

σ_c^0 la limite élastique en compression uni axiale de la mousse (donnée expérimentale),

p_c^0 la limite élastique initiale en compression hydrostatique de la mousse

k_t , le coefficient de limite élastique hydrostatique : $k_t = \frac{p_t}{p_c^0}$.

Dans le repère principal d'inertie, la fonction de charge du critère de la mousse est représentée sur la figure 158.

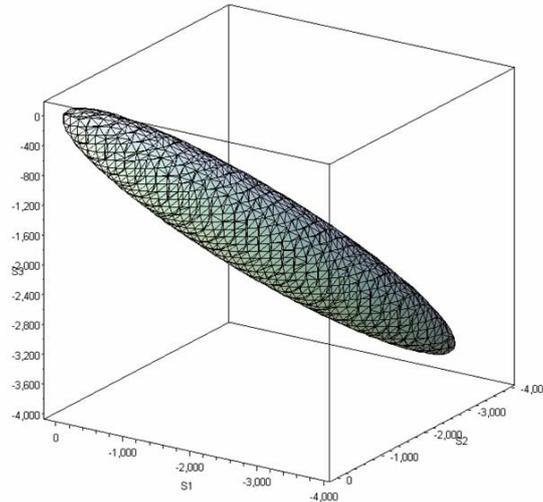


Figure 158 : Fonction de charge du critère de la mousse d'Abaqus® dans le repère des contraintes principales ($k=1$ et $k_t=10$)

L'état initial de l'ellipse est caractérisé par le coefficient de forme α et ces deux points extrêmes p_t et p_c^0 . Ces trois valeurs sont renseignées par les deux coefficients k et k_t donnés par l'utilisateur.

2.3. Évolution de la surface de charge dans le domaine plastique

L'évolution de la surface de charge dans le domaine plastique se calcule à partir d'une vitesse d'écoulement plastique ($\dot{\varepsilon}_p$). Cette dernière est constituée d'un scalaire et d'un vecteur et se calcule comme suit : $\dot{\varepsilon}_p = \dot{\lambda} \frac{\partial G}{\partial \sigma}$ avec $\dot{\lambda}$ le multiplicateur plastique et G la fonction permettant la définition de la direction d'écoulement.

Le multiplicateur plastique permet de calculer l'intensité de l'écoulement. Il se calcule à partir des conditions de cohérence : $f = \dot{f} = 0$ avec f la fonction de charge ($f = F - \sigma_0 = 0$).

La mousse ayant un critère non associé, la direction d'écoulement est liée à une fonction qui n'est pas la fonction de charge. Une fonction d'écoulement est alors définie par une ellipse centrée par rapport à l'origine dans le plan p-q (Equation [17]).

$$G = \sqrt{q^2 + \beta^2 p^2} \quad [17]$$

avec β le coefficient de forme de l'ellipse de la fonction de forme (Figure 159). Pour un état de contrainte donné, la fonction G est calculée et est dérivée par rapport à la contrainte ce qui donne la direction d'écoulement de la matière.

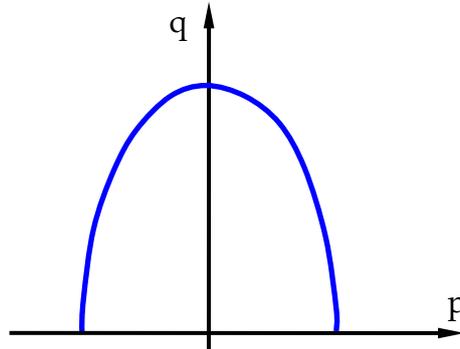


Figure 159 : Fonction d'écoulement dans le repère p-q

Au fur et à mesure de l'évolution plastique, la forme de la fonction F évolue en suivant une loi de comportement. Cette dernière est une loi expérimentale de l'évolution de la mousse en compression uniaxiale définie par l'utilisateur point par point (σ_{11} en fonction de ε_{11}). La fonction de charge évolue par l'intermédiaire du

point p_c qui se calcule par la fonction :
$$p_c(\varepsilon_{vol}^{pl}) = \frac{\sigma_c(\varepsilon_{axial}^{pl}) \left[\sigma_c(\varepsilon_{axial}^{pl}) \left(\frac{1}{\alpha^2} + \frac{1}{9} \right) + \frac{p_t}{3} \right]}{p_t + \frac{\sigma_c(\varepsilon_{axial}^{pl})}{3}}$$
 avec

ε_{vol}^{pl} la déformation volumétrique plastique dans la mousse à un instant donné et $\sigma_c(\varepsilon_{axial}^{pl})$ la contrainte axiale entrée par l'utilisateur pour une déformation axiale donnée. Pour faire ce calcul, il est nécessaire de faire l'hypothèse $\varepsilon_{vol}^{pl} = \varepsilon_{axial}^{pl}$.

Pour modéliser le comportement des matériaux fibreux dans la direction transversale à partir du modèle mousse d'Abaqus®, il est nécessaire de définir le module d'élasticité, le coefficient de Poisson et les coefficients k et k_t de la mousse pour que son comportement se rapproche au mieux de celui des matériaux fibreux dans les directions transversales.

2.4. Identification des paramètres de la mousse pour la modélisation des matériaux fibreux dans la direction transversale

Le comportement de la mousse est le même dans toutes les directions et est utilisé pour modéliser le comportement des matériaux fibreux dans sa direction transversale. L'identification des paramètres de la mousse est réalisée dans un premier temps comme si le bois et le bambou avaient un comportement transversal dans toutes leurs directions. Le comportement dans la direction longitudinale des matériaux sera pris en compte lors de la superposition des deux constituants.

Pour caractériser les matériaux dans leur direction transversale, il est nécessaire de rentrer dans le modèle mousse d'ABAQUS® leurs caractéristiques mécaniques dans cette direction. Aussi, le module d'élasticité, la limite élastique et la loi de comportement du bois et du bambou en compression transversale uniaxiale doivent être déterminés expérimentalement ce qui est réalisé au Chapitre 2.

Dans le domaine plastique, les coefficients k et k_t doivent également être déterminés pour que le comportement de la mousse permette aux modèles de se rapprocher de la réalité. Pour caractériser au mieux ces coefficients, il serait nécessaire de réaliser des tests en traction et en compression hydrostatiques sur des éprouvettes de bois et de bambou. Ces essais sont difficiles à mettre en œuvre, c'est pourquoi l'hypothèse suivante est prise : la limite élastique du bois en compression ou en traction hydrostatique est la même que la limite élastique en compression ou en traction simple dans la direction de plus faible résistance. Autrement dit, le bois a un comportement indépendant en sollicitation multiple dans le domaine élastique. Cette hypothèse s'apparente au modèle boîte de François [FRA 1992]. La même hypothèse est prise pour le bambou.

Différentes conséquences découlent de cette hypothèse. Tout d'abord, le coefficient de Poisson peut être pris égal à 0. Ce résultat est confirmé pour le bois pour l'influence d'une sollicitation transversale (tangentielle ou radiale) sur la direction longitudinale : Guitard [GUI 1987] trouve pour les résineux : $\nu_{RL} = 0,030$ et $\nu_{TL} = 0,020$. Pour les autres modules de Poisson, il donne des valeurs très importantes (de 0,31 à 0,51 pour les résineux). Ceci s'explique par le fait que les éprouvettes prises pour faire ces mesures sont de très petites dimensions. Or, le modèle présenté ici s'applique pour des assemblages donc à une échelle mésoscopique et dans ce cas, l'influence d'une sollicitation dans une autre direction est difficile à estimer mais reste faible. C'est pourquoi l'hypothèse du module de Poisson nul semble pour l'instant acceptable.

Une autre conséquence de l'hypothèse présentée ci-dessus : le calcul du coefficient de limite élastique k est simplifié : $k = \frac{\sigma_c^0}{p_c^0} = \frac{\sigma_c^0}{\sigma_c^0} = 1$. Le coefficient k_t influence la limite élastique en traction transversale du matériau fibreux. La limite élastique du bois en traction transversale est prise à 5 MPa [EBE 2002]. Des essais de traction transversale sur la mousse sont réalisés en faisant varier le paramètre k_t (k étant laissé à 1). Pour une valeur de $k_t = 10$, la résistance en traction de la mousse est de 4,57 MPa ce qui est proche de la valeur bibliographique : le coefficient k_t est alors pris égal à 10 pour le bois. Pour le bambou en revanche, la limite élastique varie entre 1 et 4 MPa [CRO 1997] : k_t est pris alors à 1 ce qui donne une limite élastique en traction transversale égale à 3,2 MPa.

2.5. Critiques de l'utilisation du modèle mousse pour simuler le comportement des matériaux fibreux dans la direction transversale

Le modèle mousse implémenté dans Abaqus permet de prendre en compte la différence de comportement entre la compression transversale fortement non linéaire et la traction transversale fragile. Néanmoins, ce modèle est isotrope ; il est donc nécessaire de superposer un autre constituant pour modéliser le comportement du matériau dans la direction longitudinale.

Le fait de superposer deux constituants prenant en compte les comportements très différents dans les directions longitudinale et transversales, implique la dissociation du comportement du matériau fibreux dans les différentes directions de sollicitations : la plupart des interactions ne sont donc pas pris en compte. L'interaction compression transversale – traction longitudinale mise en évidence lors du Chapitre 2 pour le matériau bois n'étant pas modélisée, il sera nécessaire de vérifier que les zones les plus sollicitées en compression transversale ne dépassent pas la limite de traction longitudinale.

De part la forme du critère de la mousse, l'interaction compression transversale – cisaillement est prise en compte. Cette interaction n'a pas été mesurée au cours de ces travaux et demanderait de nouvelles investigations. Cependant, la forme du critère donnant cette interaction est critiquable. En effet, puisque la fonction de charge dans le plan p-q a une forme circulaire, dans un premier temps la résistance en cisaillement du matériau augmente lorsque la contrainte hydrostatique augmente ce qui semble cohérent mais au bout d'une certaine limite, elle diminue de manière progressive ce qui paraît peu vraisemblable. Il serait sans doute nécessaire de réfléchir à implémenter un autre critère prenant mieux en compte cette interaction.

De plus, lors des phases successives de charges – décharges en compression transversale au-delà de la limite élastique, le module d'élasticité du matériau bois chute dans un premier temps (endommagement) puis augmente de façon importante lorsque le plateau de densification est dépassé (Figure 100). Ce phénomène n'est pas pris en compte dans le modèle mousse où le module reste constant quel que soit l'historique de chargement.

Malgré ces trois défauts du modèle Mousse pour simuler le comportement des matériaux fibreux en compression transversale, il est choisi de réaliser la simulation des essais du Chapitre 1 en utilisant cette approche. Cette dernière permet de simuler le comportement du matériau bois sans y introduire de données non mesurées expérimentalement et de partir du comportement local de la matière pour en déduire un comportement global (modélisation d'assemblages). Ce travail de modélisation est une étape vers la réalisation d'un modèle mésoscopique plus général pour modéliser le comportement du bois.

3. MODELISATION DES ASSEMBLAGES PRECONTRAINS POUR LES CHAUMES DE BAMBOU

Comme il a été précisé en introduction de ce chapitre, l'objectif ici est de comparer les données expérimentales lors de la mise en place de la précontrainte dans les assemblages pour les chaumes de bambou (Chapitre 1) à un modèle dans lequel sont introduites les données liées aux propriétés mécaniques du matériau trouvées au Chapitre 2. Si le protocole proposé au Chapitre 2 pour caractériser le bambou en compression transversale est correct, les propriétés mécaniques directement entrées doivent permettre de reproduire les essais du Chapitre 1 : ces propriétés ne sont donc pas déterminées par analyse inverse. Seul le frottement entre les cônes et le bambou est déterminé par analyse inverse.

3.1. Description du modèle

3.1.1. Géométrie globale de la modélisation de la mise en place de la précontrainte dans les assemblages pour le bambou

Le but du modèle ici est de comprendre le passage des efforts du cône intérieur vers le bambou. Aussi, seule la zone d'assemblage est modélisée. Ainsi, le modèle est constitué d'un cône intérieur, de la partie du chaume de bambou en contact avec le cône extérieur et le cône extérieur (Figure 160). Etant donnée la géométrie de l'ensemble, il est choisi de le modéliser en axisymétrique. Ainsi, seule la moitié du cône intérieur est représentée. Ni le perçage central, ni la tige filetée injectant l'effort de traction dans le système ne sont simulés : un déplacement est directement imposé au cône intérieur.

La figure 160 montre que le cône intérieur possède des congés arrondis tangents aux deux surfaces sur ses angles en contact avec le bambou. Ces congés permettent d'éviter les concentrations de contraintes et de reproduire au mieux les conditions expérimentales. Le congé a un rayon égal au dixième du rayon de l'extrémité du cône intérieur où il se trouve. Les dimensions des différents éléments sont les mêmes que celles des éléments testés expérimentalement et sont rappelées sur la figure 160. Seule l'épaisseur du bambou varie d'un essai sur l'autre.

Le maillage des parties métalliques est réalisé avec des éléments simples alors que le matériau fibreux est modélisé avec des éléments quadratiques. La géométrie des éléments est rectangulaire hormis au niveau des chanfreins.

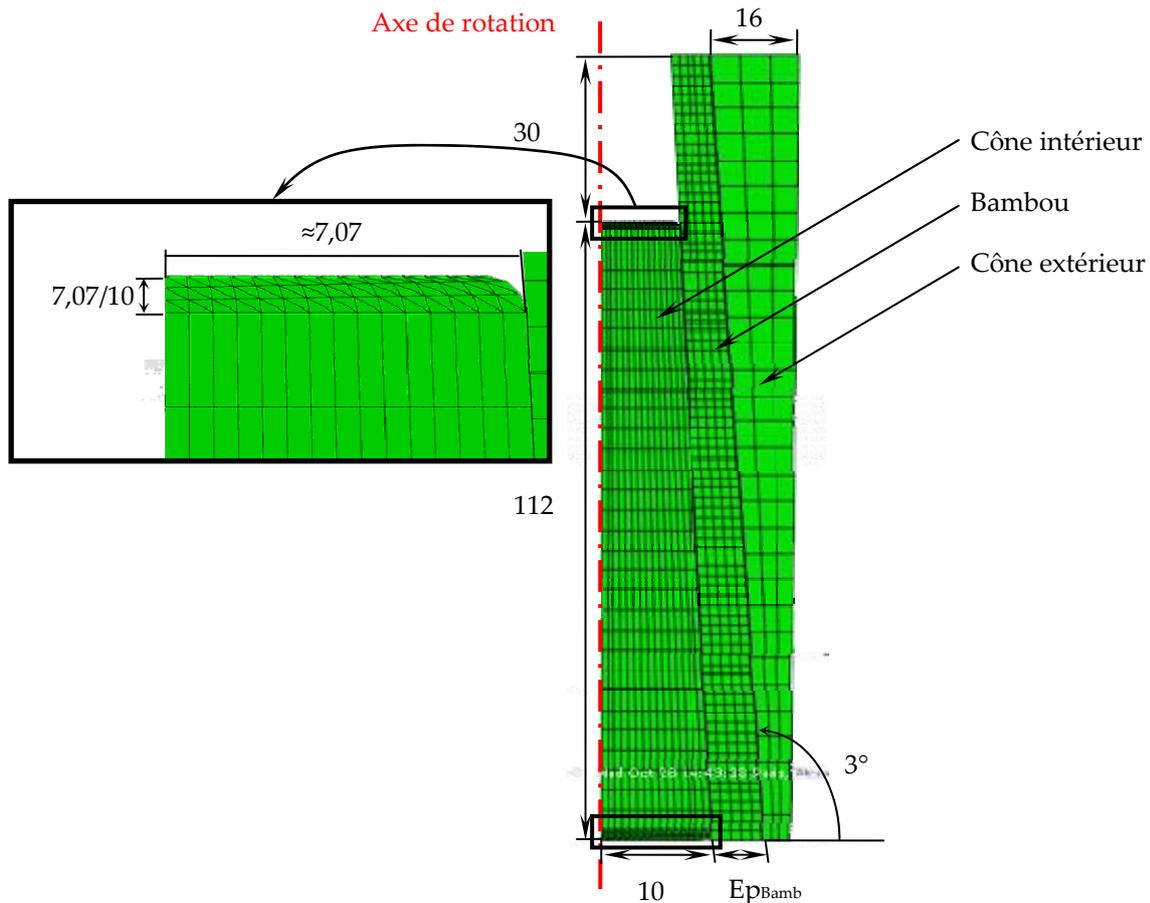


Figure 160 : Géométrie globale de la modélisation par éléments finis d'un assemblage précontraint pour un chaume de bambou

3.1.2. Description des différents matériaux constituant le maillage

Le matériau utilisé pour les deux cônes est le même : il s'agit d'un matériau isotrope élasto-plastique parfait avec comme module d'élasticité 210000 MPa et comme limite élastique 240 MPa. Ce matériau simule un acier doux qui n'entre pas dans sa phase d'écroutissage.

Le bambou est modélisé par la superposition de deux constituants. La mousse permet de simuler le comportement du bambou dans la direction transversale. Ce modèle est caractérisé par son comportement en compression uniaxiale (module et limite élastique et comportement dans la zone plastique), par son module de Poisson qui est pris à 0 (modèle boîte de François) et les coefficients k et k_t de la fonction de forme : $k = k_t = 1$.

L'autre constituant permet de simuler le comportement du bambou dans la direction longitudinale. Pour une représentation axisymétrique, il n'est pas possible de modéliser ce comportement par des coques puisqu'il n'existe pas dans le code de coques orthotropes. Il est donc choisi de modéliser ce comportement par un élément orthotrope linéaire avec un module fort dans la direction longitudinale et des

modules très faibles dans les autres directions. Ce type de modèle est caractérisé par l'équation [18].

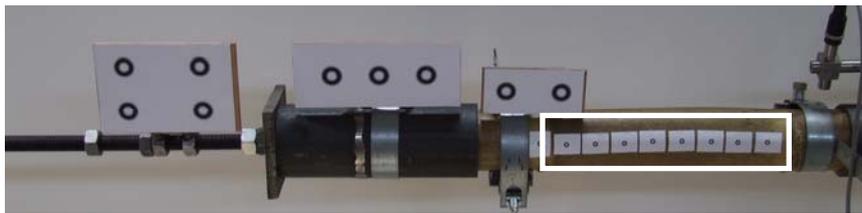
$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ D_{2211} & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ D_{3311} & D_{3322} & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{1212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{2323} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix} \quad [18]$$

avec :

$$\begin{aligned} D_{1111} &= E_1(1 - \nu_{23}\nu_{32})\Gamma \\ D_{2222} &= E_2(1 - \nu_{13}\nu_{31})\Gamma \\ D_{3333} &= E_3(1 - \nu_{12}\nu_{21})\Gamma \\ D_{1122} &= D_{2211} = E_1(\nu_{21} - \nu_{31}\nu_{23})\Gamma = E_2(\nu_{12} - \nu_{32}\nu_{13})\Gamma \\ D_{1133} &= D_{3311} = E_1(\nu_{31} - \nu_{21}\nu_{32})\Gamma = E_3(\nu_{13} - \nu_{12}\nu_{23})\Gamma \\ D_{2233} &= D_{3322} = E_2(\nu_{32} - \nu_{12}\nu_{31})\Gamma = E_3(\nu_{23} - \nu_{21}\nu_{13})\Gamma \\ D_{1212} &= G_{12} \\ D_{1313} &= G_{13} \\ D_{2323} &= G_{23} \end{aligned}$$

$$\Gamma = \frac{1}{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}$$

Le module d'élasticité moyen du bambou en traction longitudinale est mesuré pour différentes tiges lors des essais sur les assemblages précontraints (Figure 161). En moyenne la valeur de 8000 MPa est trouvée.



Cibles permettant de mesurer le module d'élasticité du chaume de bambou

Figure 161 : Dispositif expérimental permettant de mesurer le module d'élasticité dans la direction longitudinale d'un chaume de bambou

Aucune étude n'a été menée pour déterminer la valeur des coefficients de Poisson $\nu_{i,j}$ du matériau bambou. Il est choisi de retenir un module élastique dans la direction 1 (direction longitudinale) notée $D_{1,1,1}$ à 8000 MPa (module d'élasticité longitudinal moyen) et des valeurs pour les autres modules relativement faibles de l'ordre de 20 MPa.

3.1.3. Description des conditions aux limites et des interactions entre les éléments

Le déplacement du cône intérieur dans le modèle est piloté en déplacement, c'est-à-dire que, contrairement aux essais expérimentaux, un déplacement, et non une force lui est imposé. Ce déplacement est appliqué sur la ligne la plus large du cône intérieur qui est notée $LgDepl$ sur la figure 162. Etant donné la géométrie axisymétrique de l'ensemble, une seule réaction est prise en compte : la ligne notée $LgBloc$ sur la figure 162 à l'extrémité du bambou est bloquée dans la direction Y.

Pour comparer les résultats obtenus par le modèle aux résultats expérimentaux, il faut extraire du modèle la force dans $LgDepl$ en fonction de son déplacement horizontal moins le déplacement horizontal du bambou ($LgBamb$).

Des interactions de type frottement sont mises en place entre le bambou et les cônes. Ces interactions sont caractérisées par des coefficients de frottement. Etant donné la rugosité de la surface d'usinage du cône extérieur avec le bambou, et le faible déplacement mesuré expérimentalement entre ces deux éléments, la valeur du coefficient de frottement entre le cône extérieur et le bambou retenue est élevée c'est-à-dire à 0,4 afin d'éviter des instabilités lors de la résolution ; cette valeur n'a cependant pas d'influence sur les résultats. En revanche, la valeur du coefficient de frottement entre le bambou et le cône intérieur est plus difficilement estimable et est déterminée par analyse inverse en comparant les courbes trouvées par la modélisation par éléments finis à celles issues des essais.

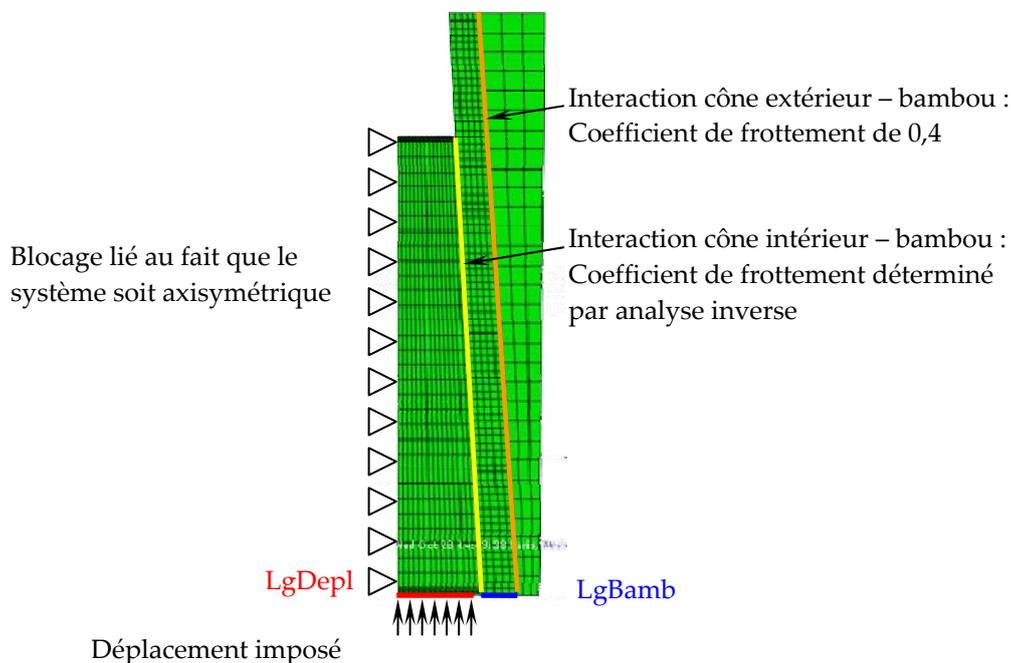


Figure 162 : Conditions aux limites et interactions sur le modèle par éléments finis pour simuler l'essai d'assemblage précontraint pour le bambou.

3.1.4. Détermination de la taille des éléments du modèle

Pour les trois parties de l'assemblage, l'influence de la taille de leurs éléments sur la contrainte dans ces derniers est analysée : pour les éléments en acier, la contrainte de Von Mises maximale et minimale sont mesurées alors que pour l'élément en bambou, l'influence de la taille des éléments sur la contrainte de compression et sur la réponse globale du système est mesurée.

Pour le cône intérieur, le nombre d'éléments horizontaux est fixé à 15, soit une largeur d'élément moyenne de 1,1 mm (hors éléments dans les congés). Les contraintes maximum et minimum dans le cône au cours d'un essai sont mesurées en faisant varier le nombre d'éléments verticaux (Figure 163). Le nombre d'éléments choisis est de 70 soit une hauteur moyenne des éléments de 1,5 mm.

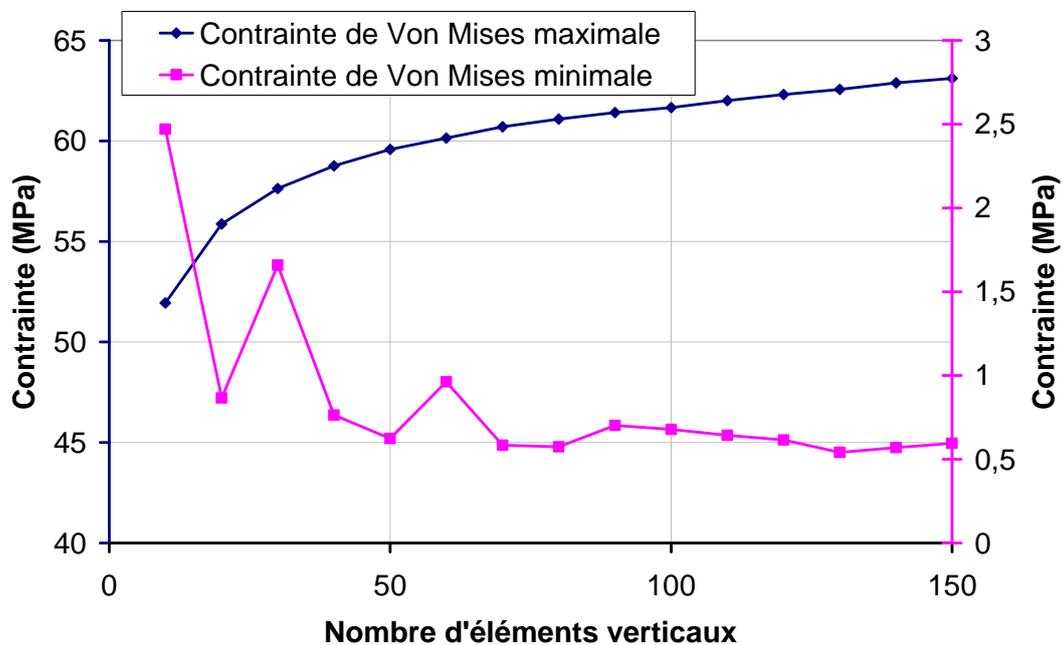


Figure 163 : Evolution des contraintes maximales et minimales dans le cône intérieur en fonction de nombre d'éléments verticaux

Pour le cône extérieur, le nombre d'éléments horizontaux est fixé à 3, soit une largeur d'élément moyenne de 3,5 mm. Les contraintes maximum et minimum dans le cône au cours d'un essai sont mesurées en faisant varier le nombre d'éléments verticaux (Figure 164). Le nombre d'éléments choisis est de 40 soit une hauteur moyenne des éléments de 3,6 mm.

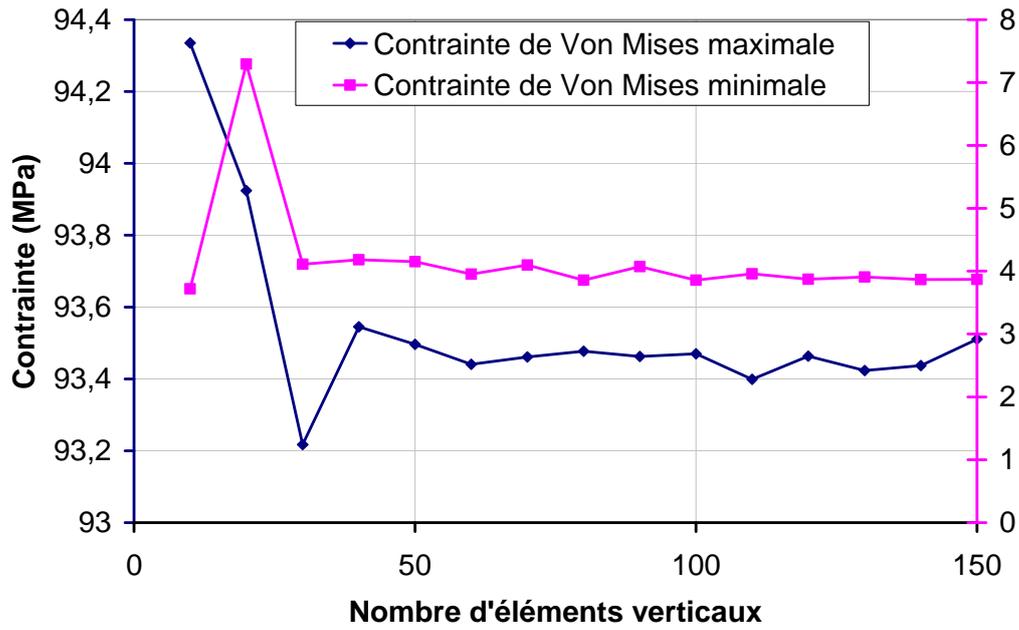


Figure 164 : Evolution des contraintes maximales et minimales dans le cône extérieur en fonction de nombre d'éléments verticaux

Il est choisi de diviser le bambou en cinq éléments horizontaux. Pour déterminer le nombre d'éléments verticaux, la contrainte de compression maximale et minimale dans le matériau fibreux après un déplacement du cône intérieur de 25 mm est mesurée pour différents nombres d'éléments (Figure 165). La réponse globale du système est également mesurée (Figure 166). Le nombre d'éléments retenu est 80 soit une taille moyenne pour un élément de bambou de 1,5x1,8 mm².

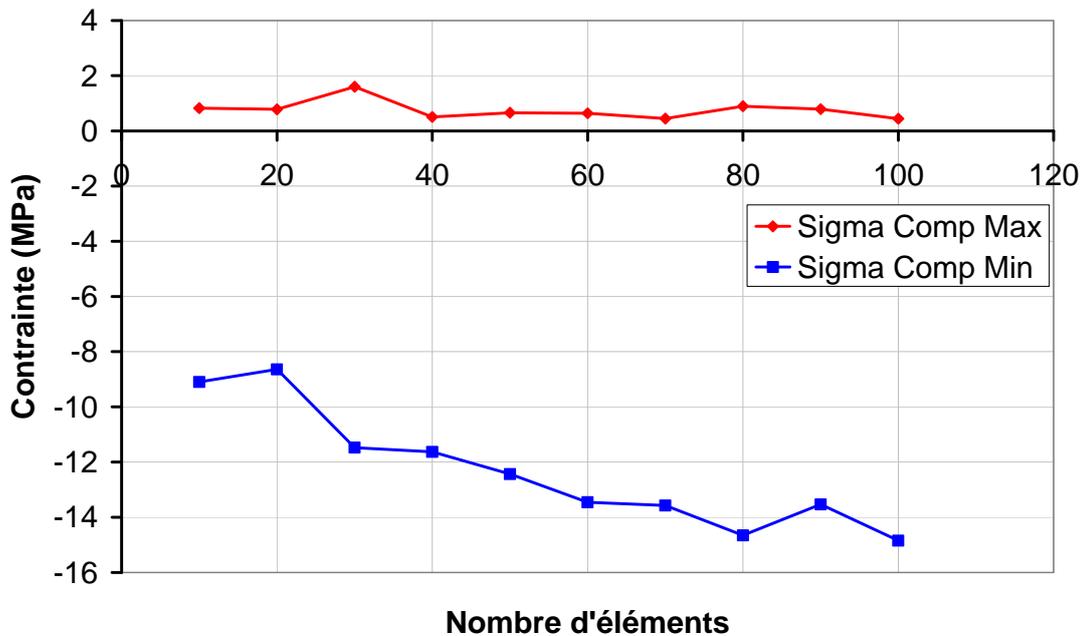


Figure 165: Evolution de la réponse du système (Contrainte de compression maximale et minimale mesurée dans le bambou pour un déplacement imposé du cône intérieur de 25 mm) en fonction du nombre d'éléments verticaux dans le bambou

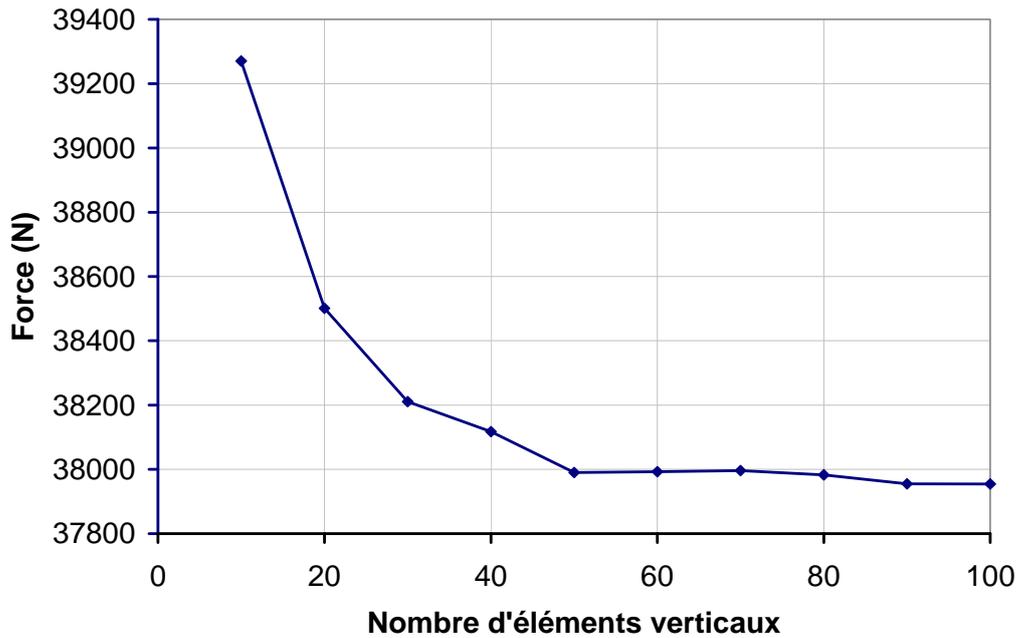


Figure 166 : Evolution de la réponse du système (Force maximale mesurée dans le cône intérieur pour un déplacement imposé de 25 mm) en fonction du nombre d'éléments verticaux dans le bambou

3.2. Comparaison entre la réponse du système et les résultats expérimentaux pour un essai : l'essai 8

3.2.1. Réponse globale

Pour vérifier et valider le modèle par éléments finis, il est choisi de comparer la réponse du modèle aux résultats expérimentaux de l'essai 8 car dans cet essai il y a peu de précontrainte initiale injectée par le boulon 6 de la figure 68 lors de la mise en place de l'assemblage. Cet essai a été mesuré par analyse d'images et capteurs LVDT : seule l'extrémité instrumentée par analyse d'images est considérée.

Le frottement entre le cône intérieur et le bambou est déterminé par analyse inverse par comparaison de la partie initiale de la réponse du modèle à celle déterminée expérimentalement. La figure 167 compare le comportement du MEF à celui de l'essai 8 pour différents coefficients de frottement. En se concentrant uniquement sur la partie initiale de la courbe, il s'avère que le coefficient de frottement doit être pris égal à 0,18 pour que les courbes du modèle et des essais soient en corrélation.

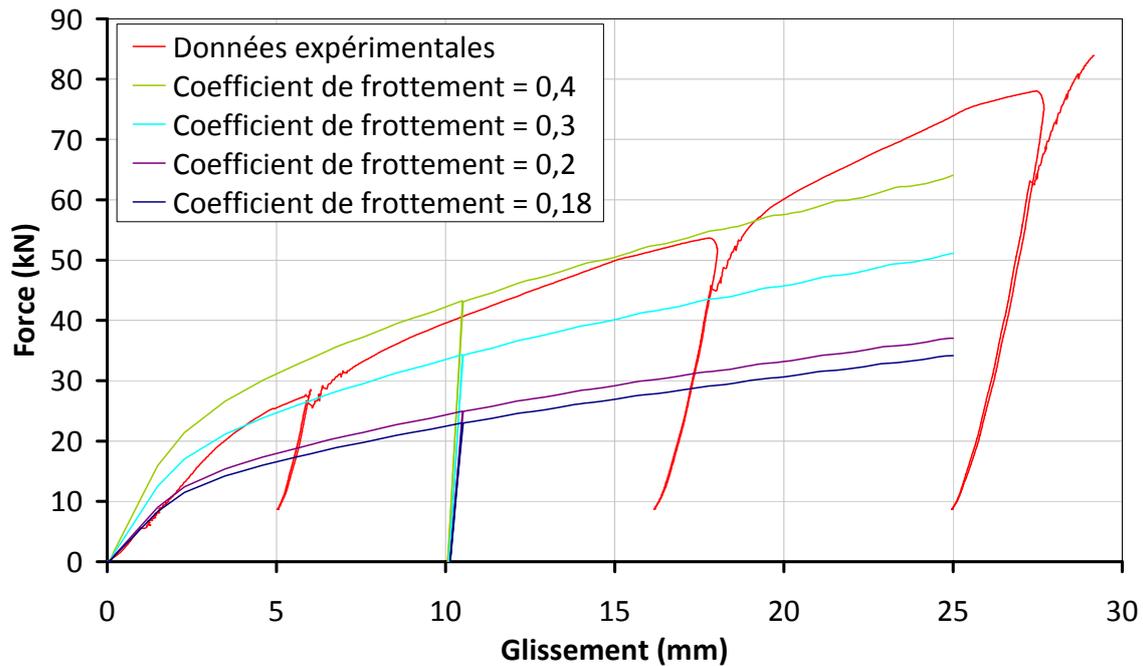
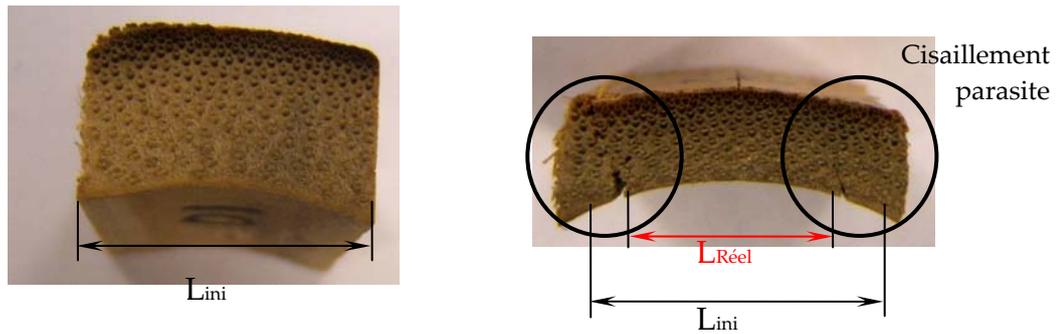


Figure 167 : Influence du coefficient de frottement entre le cône intérieur et le bambou sur la réponse du système

La figure 167 montre que malgré un coefficient de frottement permettant une bonne corrélation entre le modèle et l'essai pour un déplacement faible du cône intérieur, la réponse du MEF n'est pas satisfaisante en comparaison avec les données expérimentales. Ainsi, la loi de comportement en compression transversale déterminée pour le bambou ne permet pas de retrouver la réponse globale du système.

Cette constatation peut trouver deux explications. Tout d'abord, comme il a été montré précédemment, l'interaction compression transversale – cisaillement n'est pas forcément bien prise en compte dans la modélisation par la mousse. Ceci peut être une explication au fait que les résultats obtenus par le MEF ne sont pas assez élevés par rapport aux résultats expérimentaux dans la phase de précontrainte.

De plus, le protocole expérimental permettant la mesure de la loi de comportement du bambou en compression transversale n'est pas parfait. En effet, la pièce servant à bloquer latéralement le bambou représentée en bleu sur la figure 88 n'est pas suffisamment rigide ce qui conduit à un mauvais confinement tout au long de l'essai. Ce phénomène implique que la contrainte de compression transversale imposée au bambou n'est pas constante sur toute sa largeur. Ainsi, des efforts parasites de cisaillement apparaissent et le calcul de la contrainte comme étant le rapport entre la force appliquée et la surface complète de l'éprouvette n'est pas correcte (Figure 168). La loi de comportement issue de ce protocole expérimental sous estime la contrainte de compression transversale puisque la section prise en compte lors du calcul de cette dernière est surestimée.



L_{ini} : Largeur initiale de bambou en contact avec la tige en acier au début de l'essai

L_{Reel} : Largeur réellement en contact avec la tige en acier à la fin de l'essai

Figure 168 : Comparaison entre la section d'une éprouvette de bambou avant et après compression transversale

Pour palier à ce problème, il est choisi de diviser la section de bambou de l'éprouvette par deux ce qui augmente la contrainte et donc modifie la loi de comportement du matériau comme l'indique la figure 169.

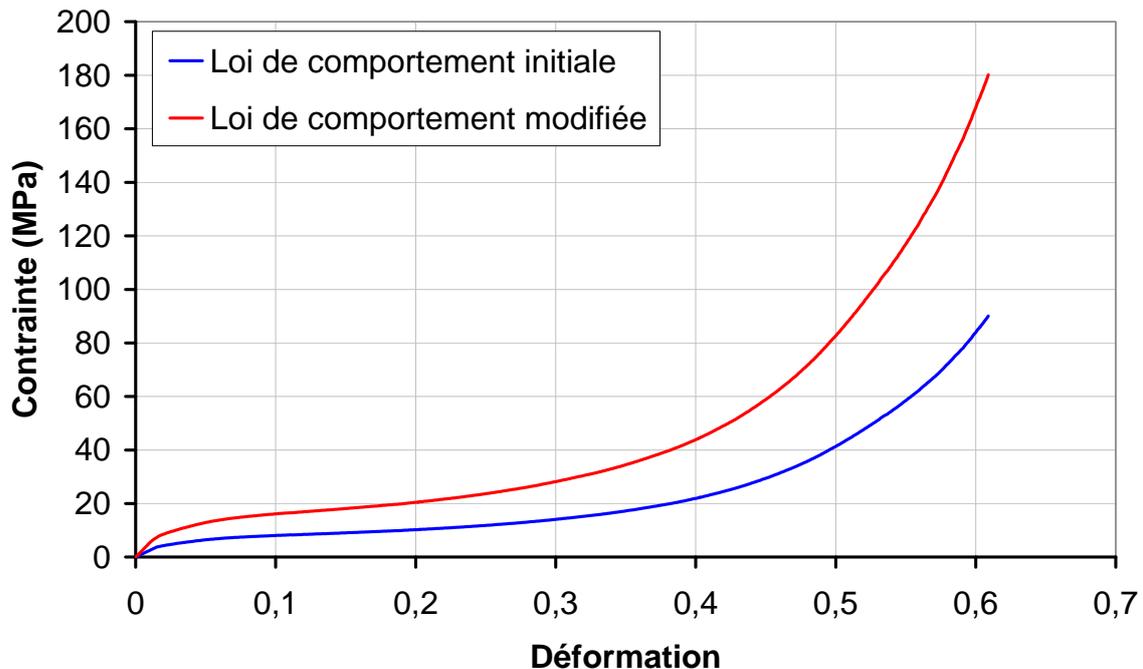


Figure 169 : Comparaison entre la loi de comportement en compression transversale du bambou B5 mesurée expérimentalement et celle implémentée dans la modélisation

Avec cette nouvelle loi de comportement, la réponse globale du MEF peut être comparée aux données expérimentales. La nouvelle loi de comportement en compression transversale du bambou permet de donner une réponse globale proche des données expérimentales (Figure 170).

Pour mesurer la raideur obtenue par le MEF, il est choisi d'arrêter l'avancée du cône intérieur pour un déplacement de 11 mm et de le faire reculer d'un millimètre avant de continuer à le faire avancer jusqu'à 25 mm. Cette opération permet de

mesurer la raideur obtenue par le MEF à celle obtenue expérimentalement. Par le modèle, la raideur trouvée est de 87 kN/mm ; or expérimentalement elle n'est que de 21 kN/mm. Cette différence peut s'expliquer par le fait que le module d'élasticité du modèle mousse ne dépend pas de l'historique de chargement c'est-à-dire qu'il ne considère pas l'endommagement.

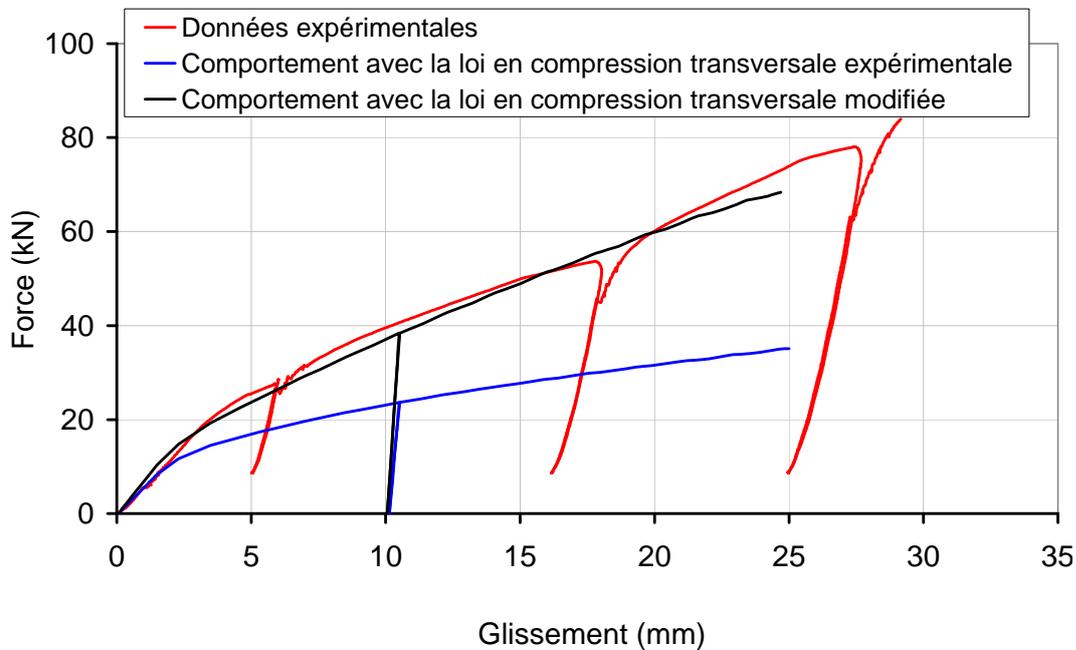


Figure 170 : Comparaison entre le comportement global du MEF et des données expérimentales pour l'essai 8

Le protocole expérimental pour déterminer la loi de comportement du bambou en compression transversale est donc mal adapté car la matière n'est pas suffisamment confinée lors de sa densification. Pour palier à ce problème, il serait nécessaire d'imaginer un nouveau protocole expérimental. Il serait imaginable de réaliser de petits cylindres de bambou usinés par une commande numérique comme l'indique la figure 171 et de les tester avec un protocole similaire à celui utilisé pour le bois. Cette proposition de protocole nécessite des investigations bien plus poussées qui n'ont pas été menées lors de ce travail.

A l'issue de ces travaux de thèse, une nouvelle campagne a été menée par J.F. Bocquet pour tester ce protocole expérimental. Ces résultats complémentaires sont décrits en Annexe 5.

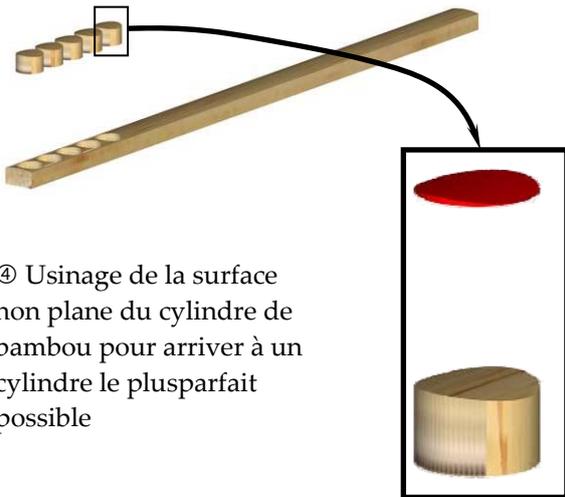
① Découpage d'une bande de bambou



② Rabotage de la bande de bambou



③ Usinage de cylindres dans la bande de bambou



④ Usinage de la surface non plane du cylindre de bambou pour arriver à un cylindre le plus parfait possible

⑤ Test du cylindre avec un protocole proche de celui utilisé pour le bois

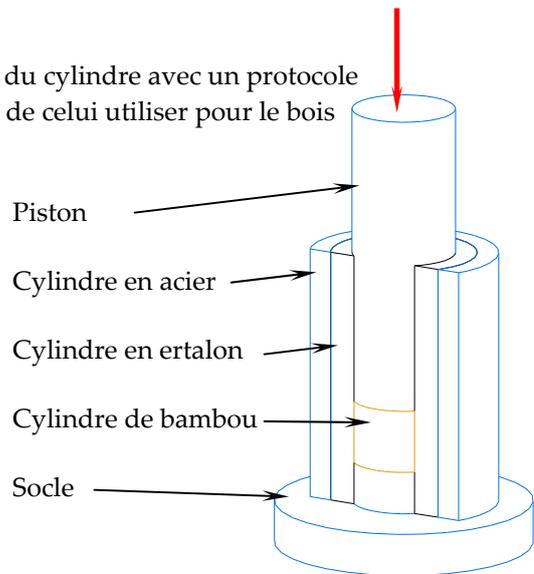


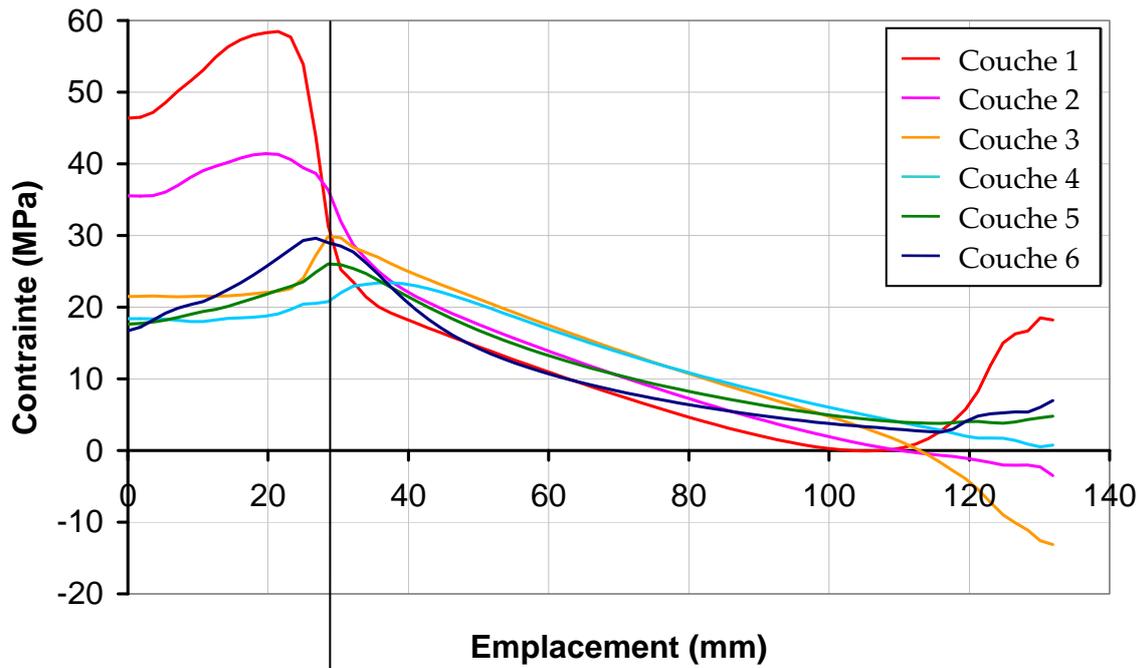
Figure 171 : Proposition d'un nouveau protocole expérimental pour caractériser le bambou en compression transversale

3.2.2. Contraintes dans le matériau fibreux au niveau de l'assemblage

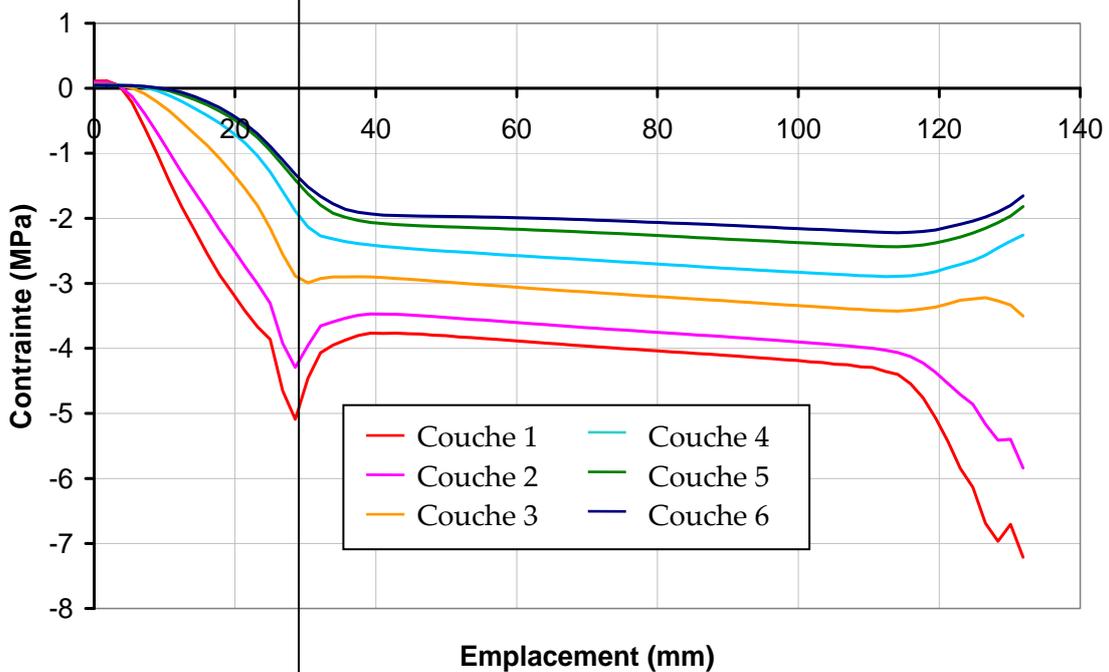
A chaque niveau de chargement, il est possible de déterminer la contrainte dans les éléments de bambou à partir du MEF. Il est choisi de déterminer ces contraintes au dernier pas de calcul soit pour un déplacement du cône intérieur de 25 mm. Les contraintes dans les deux directions principales du bambou sont extraites : la contrainte dans sa direction transversale et celle dans sa direction longitudinale (Figure 172).

Sur la figure 172, il y a deux graphiques avec pour chacun six courbes : une courbe par couche d'éléments dans l'épaisseur du matériau fibreux. Les couches d'éléments sont numérotées de 1 à 6, de la couche de l'élément en contact avec le cône intérieur à celle en contact avec le cône extérieur.

Trois zones peuvent être distinguées dans l'assemblage précontraint pour le bambou : une zone où le bambou est uniquement en contact avec le cône extérieur (Zone 1), une zone où le bambou est en contact avec les deux cônes (Zone 2) et une zone où le bambou est en contact uniquement avec le cône extérieur (Zone 3). Les contraintes dans la zone 3 ne sont pas représentées sur la figure 172.



(a) Contrainte dans la direction longitudinale dans le bambou



(b) Contrainte dans la direction transversale dans le bambou

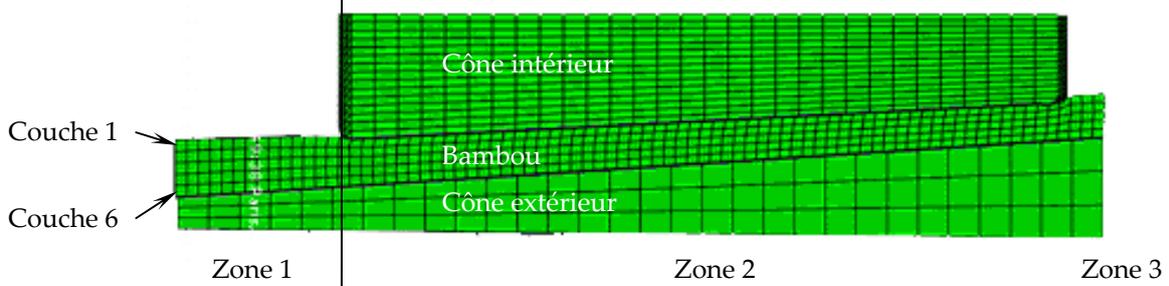
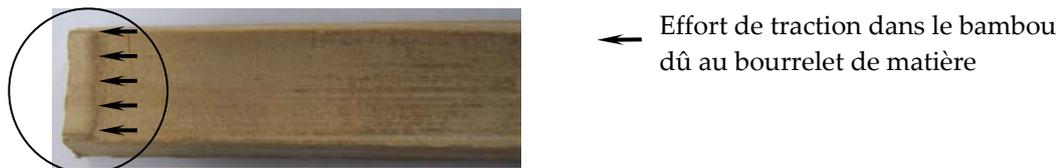


Figure 172 : Variation des contraintes dans les directions longitudinale et transversale dans le bambou au niveau de la zone d'assemblage

La figure 172 (a) montre le passage des efforts longitudinaux du bambou vers le cône intérieur. Dans la zone 1, tout l'effort de traction longitudinale se situe dans le bambou et progressivement, au cours de la zone 2, cet effort transite dans le cône intérieur ce qui se matérialise sur la courbe par une diminution de la contrainte de traction dans le bambou. A l'extrémité de la zone 2 (autour de 120 mm), la contrainte dans l'élément 1 augmente. Ceci s'explique par le fait que le cône intérieur s'enfonce dans le bambou et à l'extrémité de ce cône (zone 3), la matière fibreuse crée un « bourrelet » qui l'englobe légèrement (Figure 173). Ce bourrelet provoque une augmentation de la contrainte de traction au niveau des éléments extérieurs puisqu'à cet endroit la matière fibreuse est sollicitée en frottement et en traction longitudinale.



Bourrelet de matière fibreuse : le matériau à cet endroit est sollicité à la fois en frottement et en traction longitudinale

Figure 173 : Apparition d'un « bourrelet » de matière fibreuse à l'extrémité du cône intérieur

Dès la zone 1, il y a apparition d'une contrainte transversale qui diminue progressivement pour arriver à son minimum au passage de la zone 2. A ce niveau, il y a apparition d'une concentration de contrainte. Ainsi, dès l'entrée dans l'assemblage, le chaume de bambou est comprimé transversalement. Jusqu'à environ 110 mm (soit les trois quart du cône intérieur), la contrainte de compression dans le matériau fibreux diminue lentement. Au-delà de ce point, elle diminue plus fortement pour les éléments 1, 2 et 3 et augmente tout en restant négative pour les éléments 4, 5 et 6. Ainsi, tout le long de l'assemblage, le chaume de bambou est soumis à une contrainte de compression qui augmente dans le matériau (augmentation en valeur absolue) en même temps que l'effort de traction longitudinale diminue très légèrement. A l'extrémité du cône intérieur (toujours dans la zone 2), la contrainte augmente de manière plus marquée dans les éléments proches du cône intérieur ce qui s'explique par la loi de comportement du bambou en compression transversale.

Les valeurs numériques de compression transversale pour le bambou semblent faibles (7 MPa pour les éléments les plus sollicités). Ceci semble globalement réaliste étant donné la faible déformation que subit le matériau lors de la mise en place de la précontrainte dans le système (Figure 173). Néanmoins, les valeurs numériques sont critiquables car dans le modèle, le matériau bambou est considéré comme homogène sur son épaisseur ce qui n'est pas le cas expérimentalement comme l'indique la figure 28. Pour aller plus loin dans la modélisation, il serait nécessaire de caractériser le comportement de différentes tranches de bambou en compression transversale ce qui demanderait des investigations bien plus poussées qui n'ont pas été réalisées lors de

ce travail. Ceci étant dit, les allures des courbes de la figure 172 ne sont pas remises en cause.

3.3. Comparaison de l'ensemble des essais avec le modèle

Chaque essai est constitué d'un chaume de bambou qui a été caractérisé transversalement. Il est montré que pour le bambou B5, cette caractérisation n'est pas parfaite. Chaque loi de comportement en compression transversale des bambous déterminée au Chapitre 2 est modifiée en divisant la force mesurée expérimentalement par une surface deux fois plus faible. Seul le coefficient de frottement est déterminé par analyse inverse en comparant les données expérimentales et celles du MEF. La comparaison de la mesure expérimentale et de la réponse globale du MEF pour chaque essai est présentée sur la figure 174.

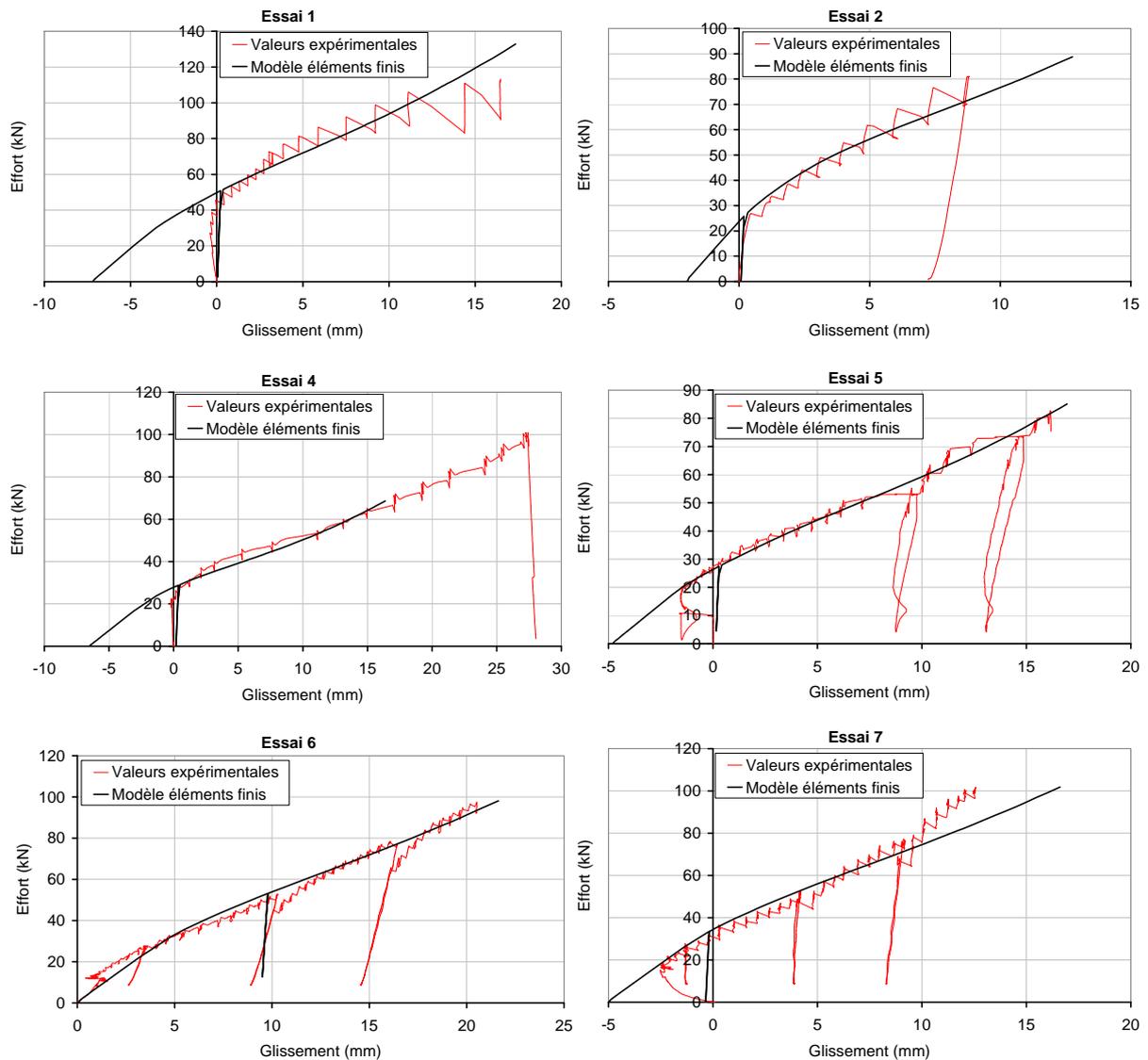


Figure 174 : Comparaison des données expérimentales et des réponses globales du MEF

La plupart des courbes expérimentales commencent avec une raideur très importante liée à l'injection d'un effort de précontrainte lors de la mise en place des

assemblages. La phase de précontrainte n'est pour ces essais pas prise en compte par le MEF : les courbes issues du modèle sont donc décalées pour que la comparaison avec les données expérimentales soit possible.

Les coefficients de frottement entre le bambou et le cône intérieur pour chaque essai sont résumés dans le tableau 13. Les coefficients trouvés sont relativement faibles. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'usinage du bambou n'est pas parfait et que lors des essais, le matériau fibreux n'est pas partout en contact avec le cône intérieur. Sur le modèle en revanche le contact est parfait : pour simuler ce phénomène, il est possible de diminuer le coefficient de frottement entre le bambou et le cône intérieur.

Numéro d'essai	Coefficient de frottement
Essai 1	0,1
Essai 2	0,1
Essai 4	0,07
Essai 5	0,07
Essai 6	0,13
Essai 7	0,14

Tableau 13 : Coefficients de frottement entrés dans le MEF pour chaque essai déterminés par analyse inverse

4. MODELISATION DES ASSEMBLAGES PRECONTRAINTS POUR LES AVIVES DE BOIS

Tout comme pour les assemblages précontraints appliqués aux chaumes de bambou, la phase de mise en place de la précontrainte dans les assemblages précontraints pour les avivés de bois est modélisée. Contrairement au bambou, pour les essais de précontrainte appliqués au bois, une rupture prématurée est apparue à la sortie de l'assemblage, aussi la modélisation ne se limite pas ici à la zone d'assemblage. Cette modélisation nécessite différentes étapes qui sont cette fois :

- Densification et suppression de la charge de compression de l'extrémité de l'avivé de bois,
- Mise en place des avivés dans le premier boîtier,
- Flexion des avivés (pour la mise en place dans le deuxième boîtier),
- Essai de traction par mouvement du coin intérieur.

L'essai est réalisé en deux dimensions avec différents plans de symétrie. Le matériau reprenant le comportement du bois dans la direction longitudinale est différent de celui retenu pour le bambou.

4.1. Description du modèle bois

La modélisation du matériau bois se fait par la superposition de deux constituants : la mousse pour le comportement dans la direction transversale et des poutres pour la direction longitudinale. En effet, contrairement au modèle de Bocquet [BOC 1998] où des barres bi articulées reprennent les efforts dans la direction longitudinale, ici ce sont des poutres continues sur toute la longueur de l'avivé de bois qui jouent ce rôle.

Un élément bois est donc constitué d'un élément mousse et de quatre poutres à chacune des arrêtes de la mousse dirigées dans la direction longitudinale comme l'indique la figure 175. Sur cette figure, les poutres sont représentées de manière filaire sans leur section. La somme de la section des poutres est égale à la section de l'élément mousse. Ainsi, par exemple pour un élément bois isolé, la section des poutres est égale à un quart de la section de l'élément mousse.

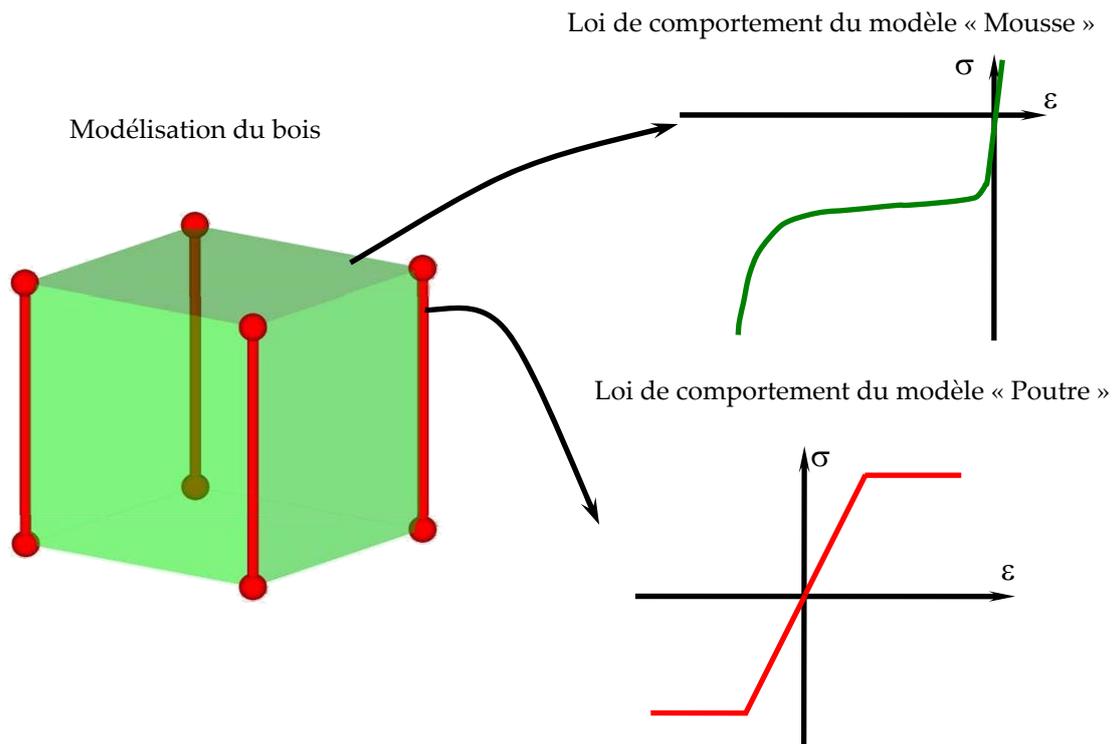


Figure 175 : Modélisation d'un élément bois par la superposition d'un élément mousse et de quatre poutres (représentation 3D)

Pour l'exemple d'un avivé de bois modélisé en deux dimensions et constitué de cinq éléments dans la direction transversale, il y a six poutres. Les deux poutres extérieures ont une section deux fois plus petite que la section des autres poutres et la somme des sections de toutes les poutres est égale à la somme de la section de l'avivé de bois.

Un élément de bois modélise le comportement global d'un cerne puisque une loi globale y est introduite en compression transversale. Ainsi, le nombre d'éléments dans la direction transversale du bois est calculé pour que la hauteur de chacun de ces éléments soit égale à la largeur d'un cerne. Pour de l'Épicéa, la largeur des cernes est comprise entre 1 et 8 mm [TRO 2001] : une largeur de cerne moyenne de 5 mm est choisie ce qui implique que la hauteur des éléments de bois dans la direction transversale est prise égale à 5 mm. La détermination de la longueur des éléments bois dans la direction longitudinale se fait de la même manière que pour le bambou c'est-à-dire en mesurant l'influence de ce paramètre sur la réponse globale du système.

La mousse d'Abaqus est caractérisée par la loi moyenne de compression dans la direction transversale (moyenne de la direction radiale et tangentielle) dépendant de la masse volumique trouvée au Chapitre 2. Comme il a été montré au paragraphe 2.4 de ce chapitre, le coefficient de Poisson est pris égal à 0 et les coefficients k et k_T valent respectivement 1 et 10. Les poutres sont caractérisées par un module d'élasticité et une limite élastique déterminés expérimentalement pour du bois non

densifié au Chapitre 3 (loi dépendant de la masse volumique). La limite élastique en traction et en compression des poutres est la même ce qui n'est pas réaliste pour le matériau bois. Cependant, pour la modélisation des assemblages précontraints, cette simplification est satisfaisante car l'avivé est exclusivement sollicité en traction dans cette direction.

4.2. Description des différentes étapes de la modélisation

4.2.1. Description d'ensemble du modèle

Lors de la phase de précontrainte de l'assemblage c'est-à-dire lors du déplacement du coin intérieur entre les deux avivés de bois, une extrémité est constituée de trois éléments : les deux avivés de bois, le coin intérieur et le boîtier extérieur. Dans ce système, il y a deux plans de symétrie : un au milieu du coin intérieur et un au milieu des avivés de bois qui sont représentés sur la figure 176.

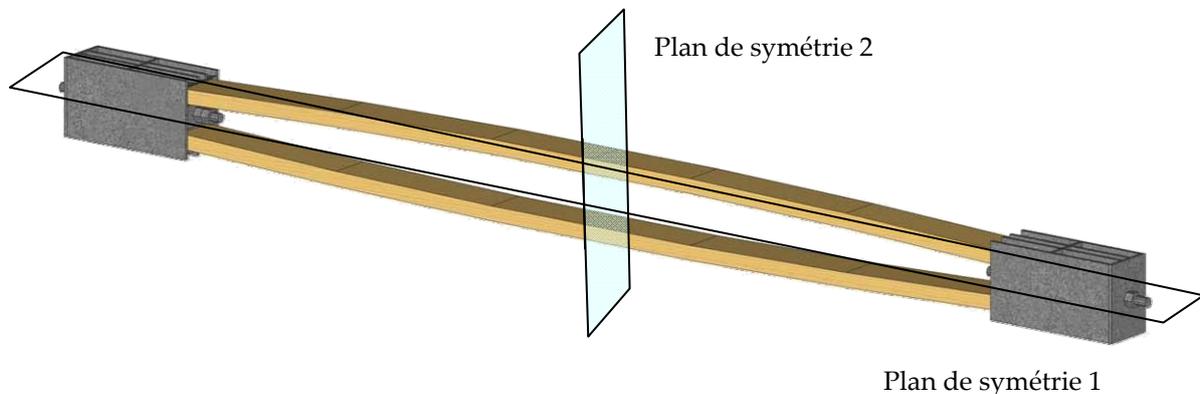


Figure 176 : Les deux plans de symétrie sur les essais sur les assemblages précontraints pour le bois

Le MEF est réalisé en deux dimensions c'est-à-dire que le système est maillé comme une tranche de 1 mm de large et les efforts obtenus sont multipliés par la largeur du système. Le plan de symétrie 1 est utilisé c'est-à-dire qu'une moitié du coin intérieur et du boîtier ainsi qu'un avivé ne sont pas représentés et sont remplacés par des conditions aux limites. Le plan de symétrie 2 n'est pas utilisé dans toutes les étapes pour simplifier le problème : l'avivé de bois est donc maillé sur toute sa longueur.

Les paragraphes suivants reprennent chacune des étapes de la modélisation et la décrit précisément.

4.2.2. Phase de densification – suppression de la charge

Cette phase se fait en deux étapes : une étape de densification progressive d'une extrémité de l'avivé de bois et une étape de suppression de la charge de densification. Ces deux étapes sont réalisées uniquement sur une extrémité.

Expérimentalement, l'avivé de bois est densifié en son extrémité par l'intermédiaire d'un bloc de densification et repose sur un bâti rigide (Figure 67).

Pour le modèle, le même procédé est utilisé. Cependant, pour faciliter la modélisation, l'avivé de bois est directement orienté avec un angle par rapport à l'horizontale. Ce dernier correspond à l'angle que la face intérieure du boîtier extérieur fait avec l'horizontale. Cet angle est noté β sur la figure 177. Pour les essais réalisés, cet angle est de $7,4^\circ$.

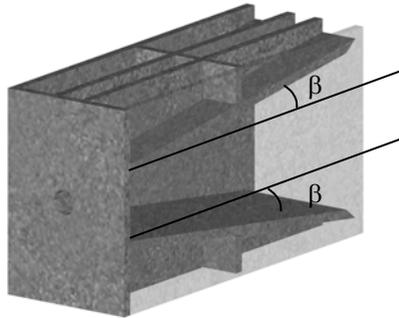


Figure 177 : Angle de la face intérieure du boîtier extérieur avec l'horizontale noté β

L'étape de densification au pas 0 est représentée sur la figure 178. Le bloc et le socle de densification sont réalisés dans des matériaux infiniment rigides pour que la déformation passe exclusivement dans le matériau bois. Les dimensions de ces éléments sont toutes les mêmes quel que soit l'essai considéré, seule la longueur de l'avivé de bois peut varier (notée $L_{g\text{Bois}}$).

Le socle de densification est encastré au niveau de sa ligne inférieure. Le contact entre cet élément et le bois se fait par une interaction caractérisée par un coefficient relativement important de 0,4. Le socle a une forme en L mais la partie extrême de cet élément n'est pas en relation avec le bois : elle n'a donc pas d'influence ici. L'interaction entre le bois et le bloc de densification est caractérisée par un coefficient de 0,4. Le bloc de densification possède des conditions aux limites : il est bloqué suivant l'axe X à son coin inférieur gauche et un déplacement est imposé à son coin supérieur droit. Ce dernier est de 19 mm pour obtenir un taux de densification de 76%.

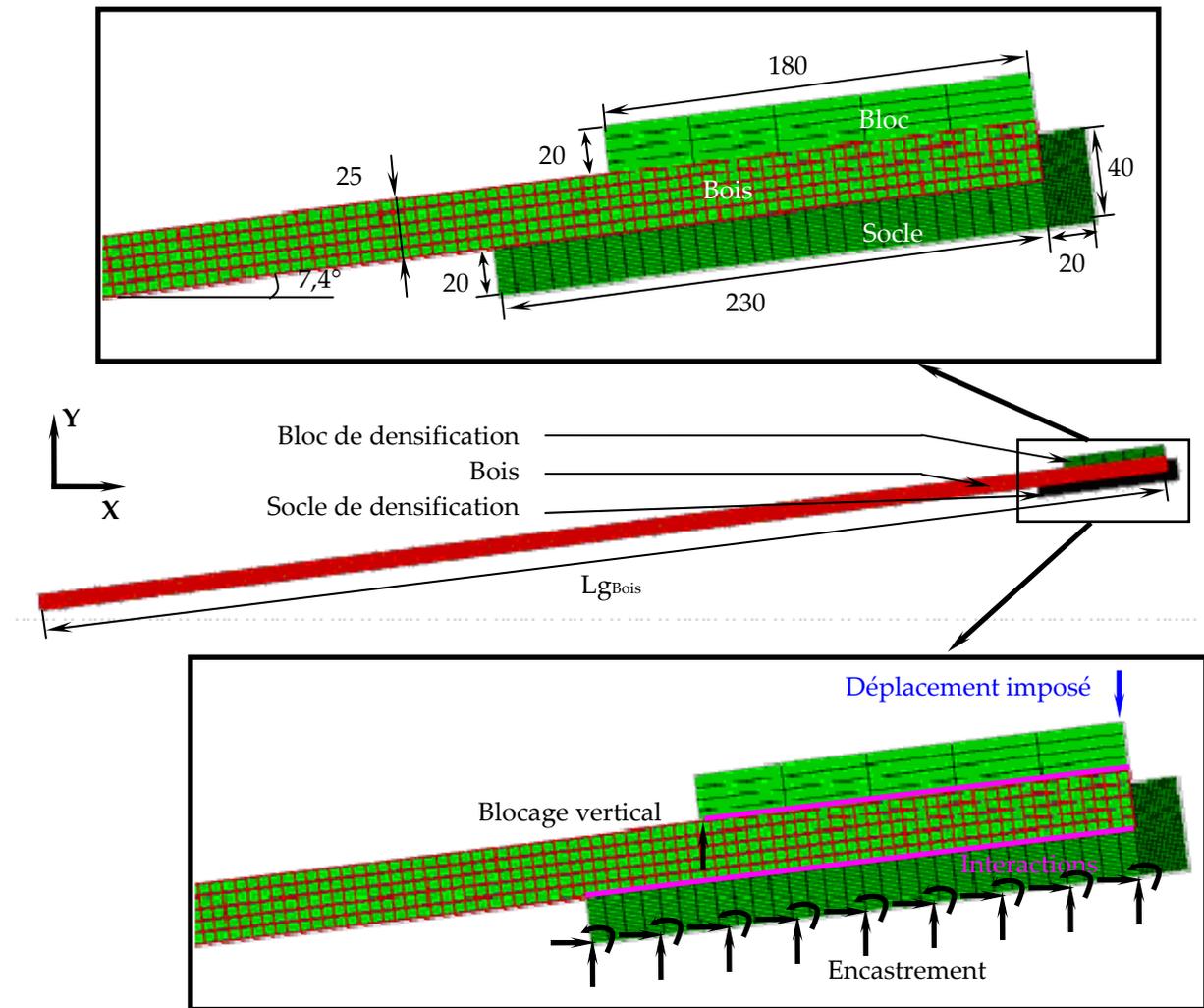
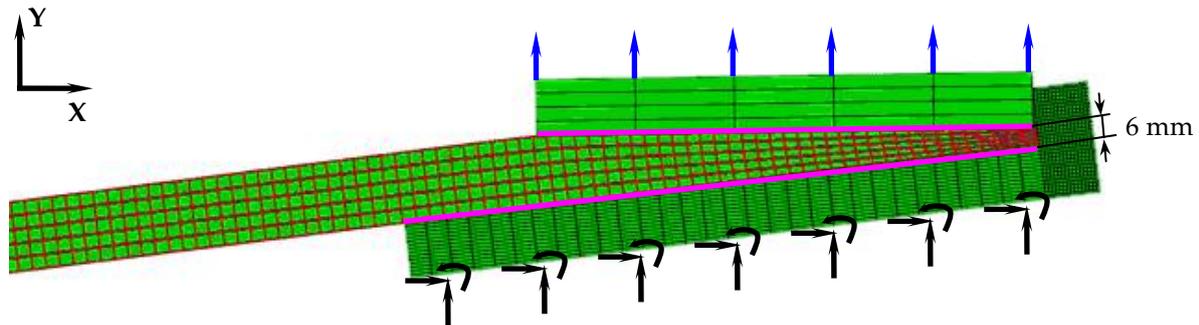
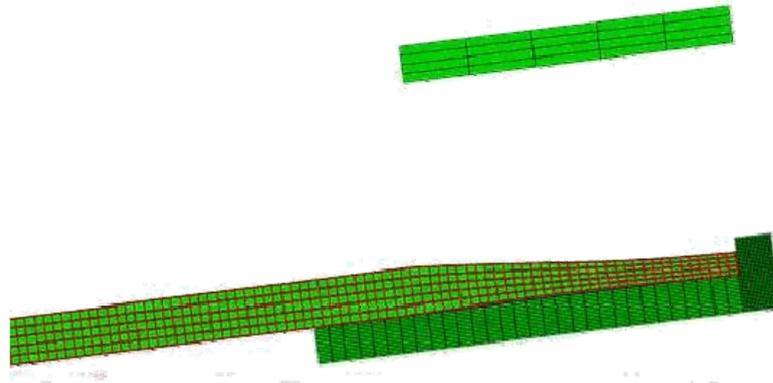


Figure 178 : Modèle lors de l'étape de densification (Pas 0) avec la géométrie (dimension en mm) et les différentes conditions aux limites

Lors de l'étape de suppression de la charge de densification, les conditions aux limites du socle restent inchangées par rapport à l'étape précédente. Il est imposé au bloc de densification un déplacement vertical fixé arbitrairement à 100 mm (Figure 179). Lors de la relaxation des contraintes dans le bois, l'avivé se détache légèrement du boîtier extérieur et subit un regonflement dû au retour élastique.



(a) Extrémité du bois densifié au Pas 0 de l'étape de suppression de la charge



(b) Extrémité du bois densifié après l'étape de suppression de la charge

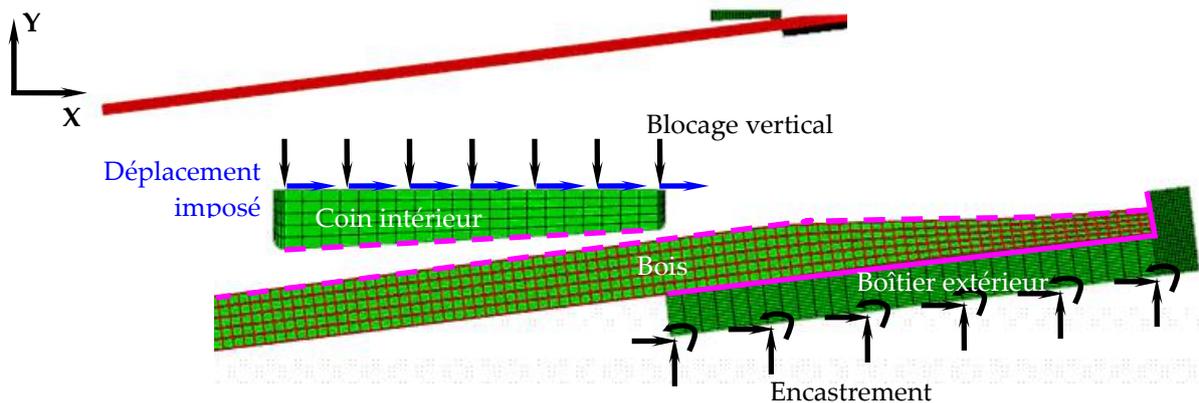
Figure 179 : Phase de suppression de la charge de densification : (a) état initial (avec les conditions aux limites) et (b) état final

4.2.3. Phase de blocage des avivés dans le premier boîtier

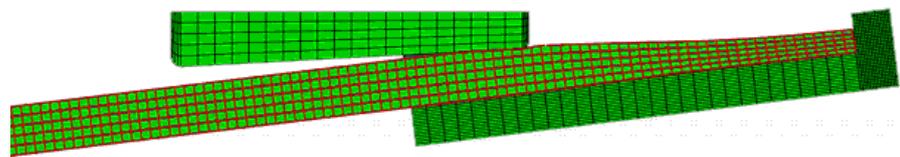
Cette étape correspond à la mise en place manuelle du coin intérieur au milieu des deux avivés le tout étant maintenu dans le boîtier extérieur (Figure 80). Cette étape permet de bloquer les avivés et de mettre en place l'assemblage à l'autre extrémité. Elle est modélisée par le déplacement horizontal du demi-coin intérieur (la deuxième partie étant prise en compte par les conditions aux limites). Ce déplacement est faible et permet uniquement le blocage des avivés de bois. La figure 180 montre les conditions aux limites et la position des éléments au début et à la fin de cette étape.

Le socle permettant la densification lors de la phase précédente sert à présent de boîtier extérieur : celui-ci est donc considéré comme étant indéformable. Les conditions aux limites sur cet élément sont les mêmes que précédemment : sa ligne extérieure est encastree. L'interaction avec le bois se fait sur toute la surface intérieure avec un coefficient de frottement de 0,4. Ce dernier est laissé aussi fort car expérimentalement, les avivés sont en contact avec les parties latérales du boîtier extérieur ce qui augmente la surface de frottement : ce phénomène n'est pas directement pris en compte dans le modèle d'où la mise en place de ce coefficient de frottement fort.

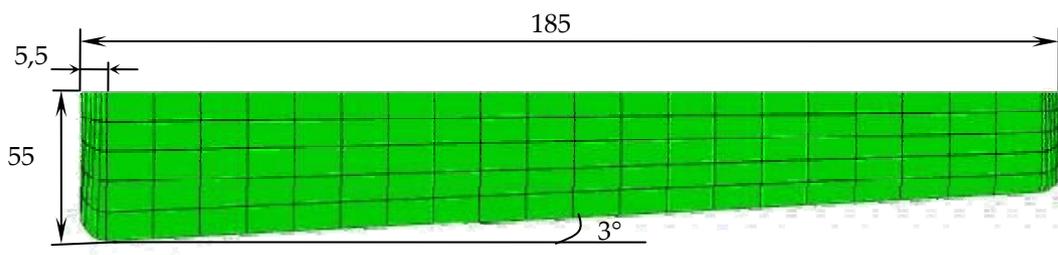
Seule la moitié inférieure du coin intérieur est modélisée, la partie supérieure étant symétrique, elle est modélisée par un blocage du demi-coin dans la direction verticale. Les dimensions du coin intérieur sont rappelées sur la figure 180 (c). Il est utile de préciser que le diamètre des chanfreins est égal au dixième de la hauteur du coin où ils sont réalisés. Un déplacement horizontal est imposé à cet élément. L'interaction entre le coin intérieur et le bois est caractérisée par un coefficient de frottement déterminé par analyse inverse en comparant la réponse globale du MEF aux résultats expérimentaux.



(a) Extrémité de l'avivé au Pas 0 de l'étape de blocage des avivés



(b) Extrémité de l'avivé à la fin de l'étape de blocage



(c) Dimensions du coin intérieur (longueurs en mm)

Figure 180 : Phase de blocage de avivés : (a) état initial (avec les conditions aux limites) et (b) état final

4.2.4. Phase de flexion des avivés

Cette phase modélise la mise en place du deuxième assemblage à l'autre extrémité des avivés : ces derniers subissent une flexion. Lors de cette phase, l'extrémité libre des avivés est amenée au même niveau que l'extrémité bloquée. Un

plot de 25 mm² est placé au milieu de l'avivé à une certaine distance de l'axe de symétrie horizontal. La position de ce plot correspond à l'écartement des avivés avant la phase d'essai proprement dite. Lors de l'essai, les avivés sont espacés en moyenne de 130 mm. La figure 181 illustre cette phase. Les conditions aux limites et les interactions au niveau de l'assemblage sont les mêmes qu'à la phase précédente. Une interaction est ajoutée entre le plot central et l'avivé de bois. Une interaction est ajoutée entre le plot central et l'avivé de bois.

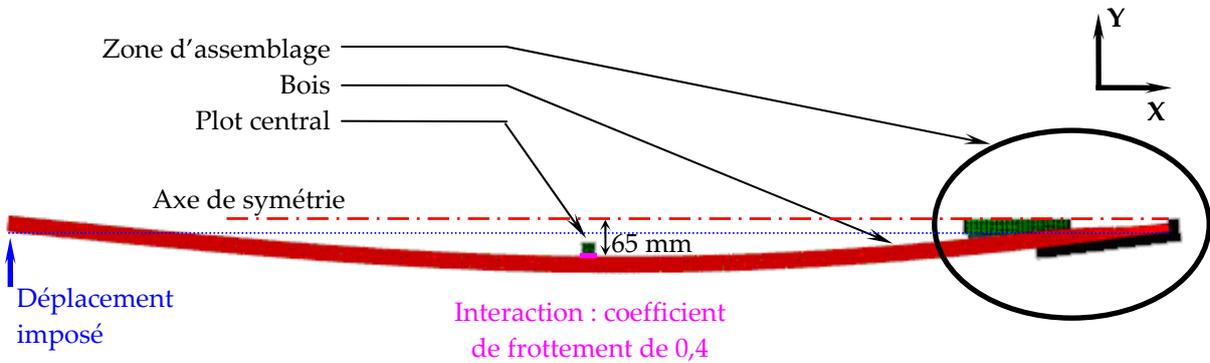


Figure 181 : Phase de flexion des avivés : pas final

4.2.5. Phase de traction du système

Tous les éléments sont à présent mis en place pour charger réellement le système. Cette phase est réalisée par le déplacement horizontal du coin intérieur. Il y a alors deux conditions aux limites : l'avivé de bois est encasté en son milieu et le boîtier extérieur est bloqué verticalement et en rotation (Figure 182).

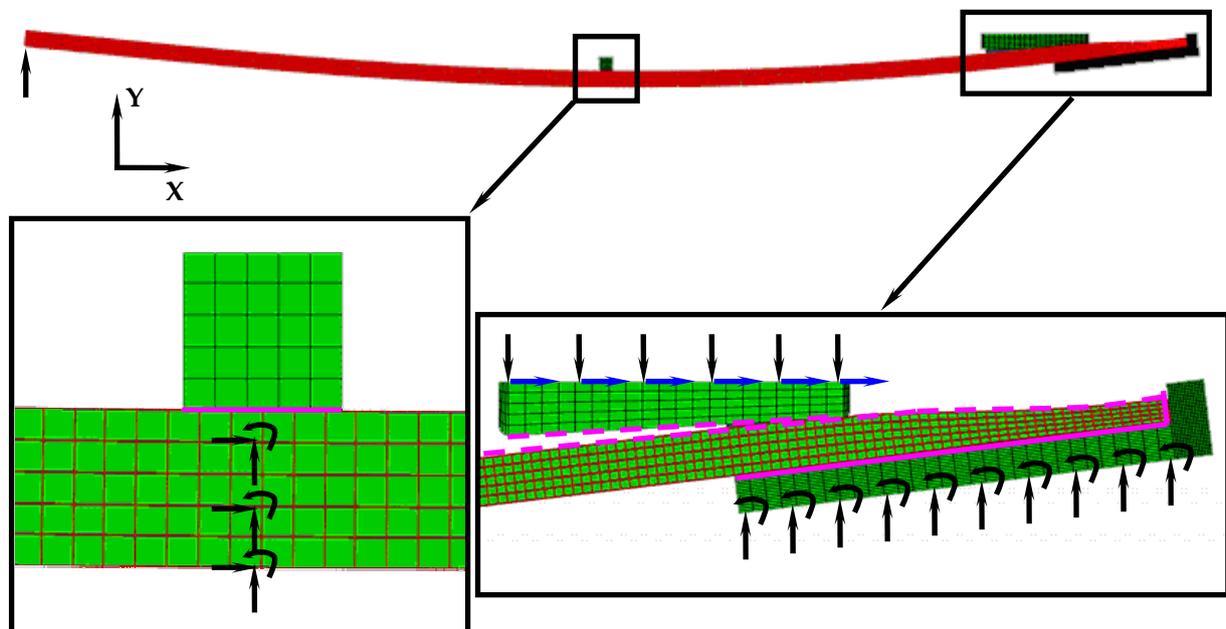


Figure 182 : Conditions aux limites et interaction lors de la mise en traction du système

Pour comparer la réponse du MEF aux données expérimentales, la force dans le coin intérieur est tracée en fonction du glissement de l'assemblage soit le déplacement du coin moins celui de l'avivé de bois en son extrémité.

4.3. Description de la taille des éléments de l'avivé de bois

La hauteur des éléments du bois étant directement liée à la largeur de cerne, considérée étant égale à 5 mm, pour les avivés de 25 mm de hauteur, le nombre d'éléments verticaux est fixé à 5. La largeur des éléments est déterminée en mesurant l'influence de ce paramètre sur la réponse globale du système. La figure 183 montre que pour une taille d'élément de bois allant de 1 à 10 mm, la variation du résultat global du système est inférieure à 5%. Le paramètre longueur des éléments de bois a peu d'influence sur la modélisation des assemblages précontraints. Il est choisi de prendre des éléments carrés de 5 mm².

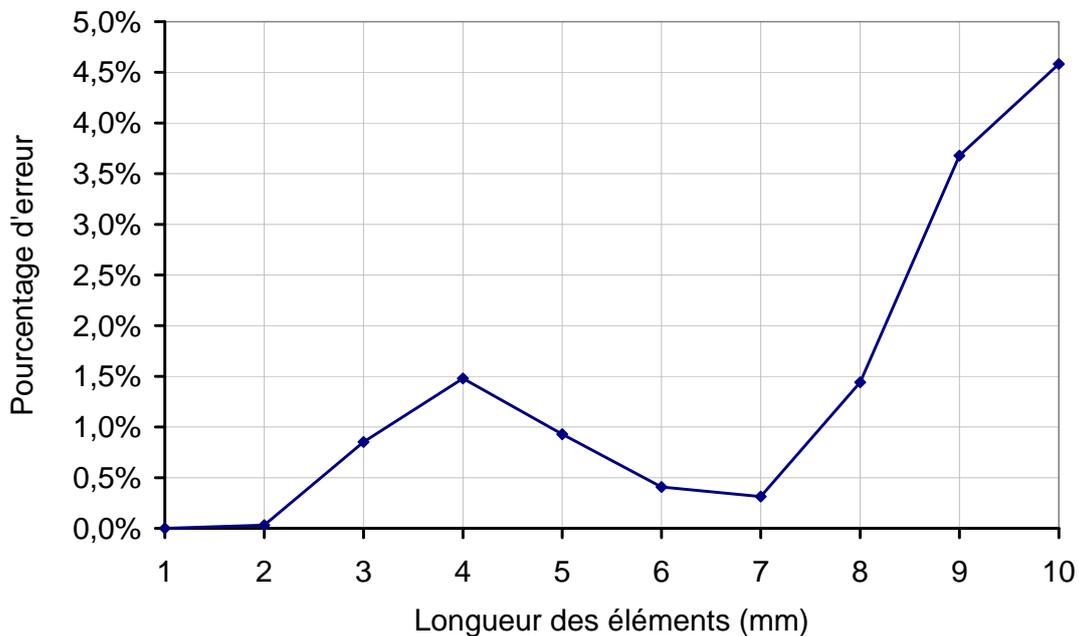


Figure 183 : Erreur relative entre la force maximale dans le coin intérieur pour un déplacement fixé entre un modèle avec des longueurs d'éléments de 1 mm et d'autres longueurs d'éléments

4.4. Comparaison entre la réponse du système et les résultats expérimentaux pour un essai : l'essai 1

4.4.1. Réponse globale

Comme pour les essais réalisés sur le bambou, la réponse globale du MEF est comparée avec les données expérimentales pour différents coefficients de frottement. Pour un coefficient de frottement de 0,20 le MEF simule de manière très satisfaisante la phase initiale des courbes expérimentales comme l'indique la figure 184. La valeur de 0,2 est tout à fait réaliste pour un coefficient de frottement entre du bois et de l'acier d'après MacKenzie et Karpovich [MAC 1968].

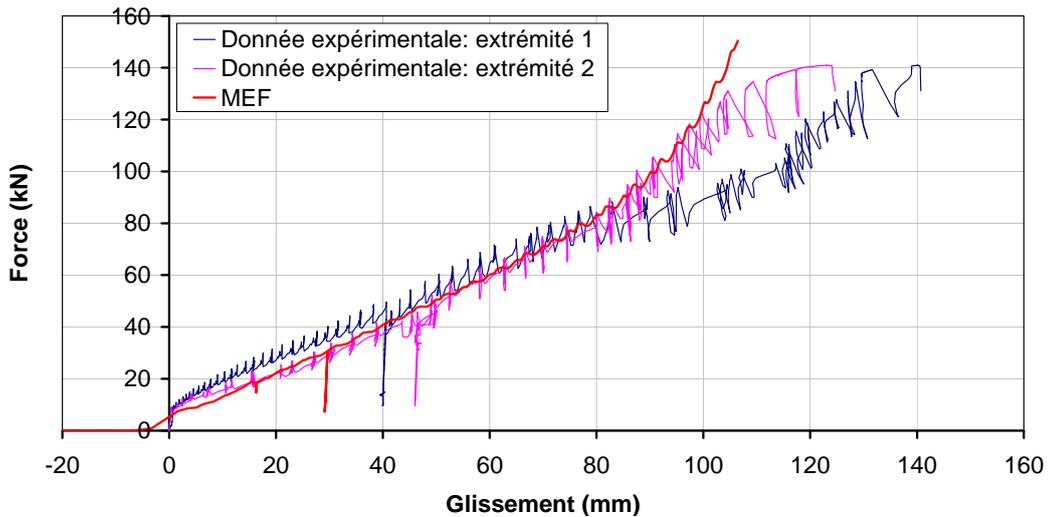


Figure 184 : Comparaison entre les données expérimentales et la réponse globale du MEF pour l'essai 1

Le modèle éléments finis simule de manière tout à fait satisfaisante la réponse globale de la phase de précontrainte du système jusqu'à un glissement de 100 mm soit une charge de 120 kN. Au-delà de ce point, le modèle semble plus raide que les données expérimentales. Ceci s'explique de deux manières. Tout d'abord, le MEF ne prend pas en compte la plastification de la tige filetée puisque cette dernière n'est pas maillée. Cette plastification commence autour de 140 kN et au-delà de ce point l'acier plastifie comme l'indique la figure 185.

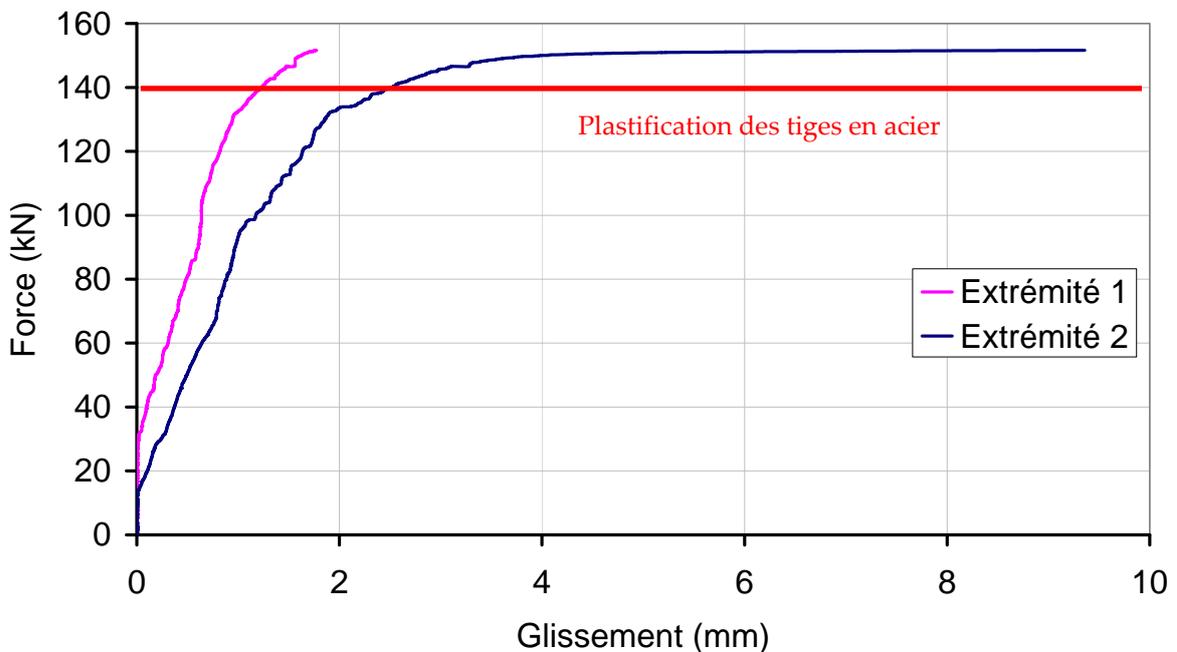


Figure 185 : Comportement d'un assemblage précontraint après sa phase de précontrainte jusqu'à plastification de la tige métallique

De plus au-delà de 100 mm de déplacement du coin intérieur, le matériau bois subit des dommages très importants qui ne sont pas représentés sur le modèle comme le montre la figure 186. Cette forte dégradation de la matière a des conséquences sur la réponse globale du système que le modèle proposé ne peut prendre en compte. Aussi, le domaine de validité du MEF se limitera à un déplacement du coin intérieur de 100 mm.

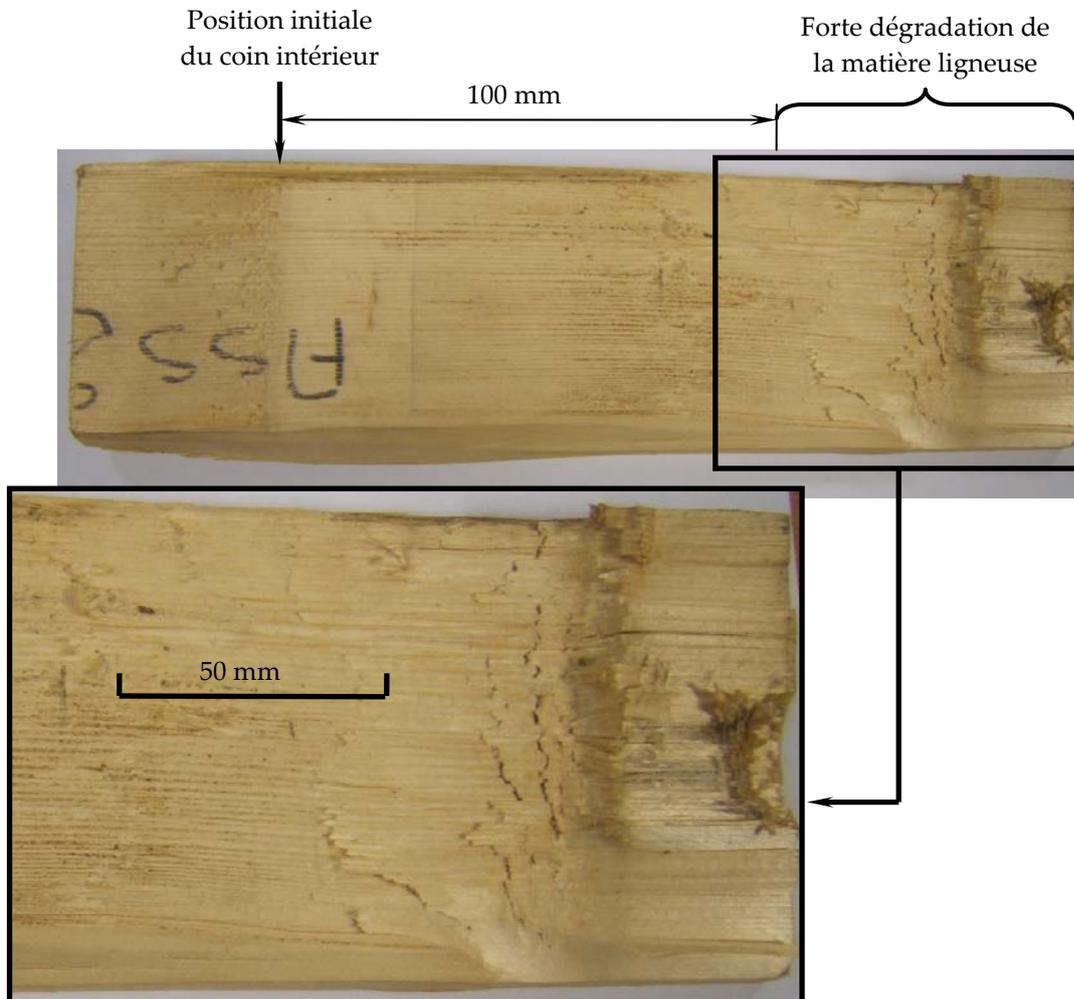


Figure 186 : Extrémité d'un avivé de bois après essai en traction longitudinale par l'intermédiaire d'un assemblage précontraint (Essai 1)

La raideur trouvée par le modèle est de 40 kN/mm ce qui est proche des données expérimentales malgré le fait que le modèle mousse ne prenne pas en compte l'endommagement transversal du matériau. La perte de rigidité due à l'endommagement du bois est sans doute compensée par le fait que le boîtier métallique est modélisé comme parfaitement rigide.

Ainsi, la loi de comportement du bois en compression transversale a été mesurée de manière précise ce qui donne une réponse globale du système très satisfaisante. Ceci confirme la validité du MEF proposé et le fait que la différence observée pour le bambou est due au fait que sa loi de comportement en compression transversale est mal mesurée.

4.4.2. Contraintes dans le matériau fibreux

Pour un déplacement du coin intérieur de 80 mm, les efforts normaux, tranchants et les moments fléchissant dans les différentes poutres de l'élément bois sont mesurés le long du demi avivé modélisé. Ces différents efforts sont sommés et les résultats obtenus sont présentés sur la figure 188. Pour chaque poutre, le moment fléchissant est mesuré en faisant la somme de l'effort normal multiplié par le bras de levier et du moment fléchissant dans la poutre dû à sa flexion. L'avivé de bois est divisé en trois zones (Figure 187) : la zone A correspond à l'endroit où le bois est en contact avec aucun élément métallique, la zone B correspond à l'endroit où le bois est en contact uniquement avec le coin intérieur, la zone C est la zone où l'avivé est en contact avec le coin et le boîtier et la zone D est en contact uniquement avec le boîtier extérieur. Les graphiques de la figure 188 ne représentent que les efforts dans les zones A à C.

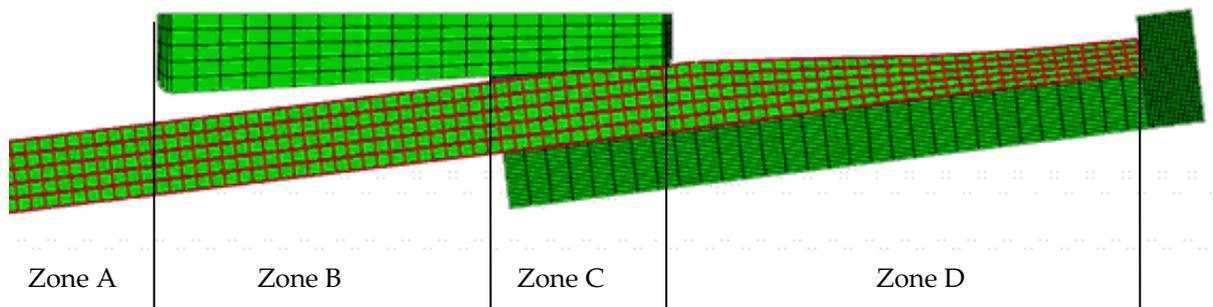
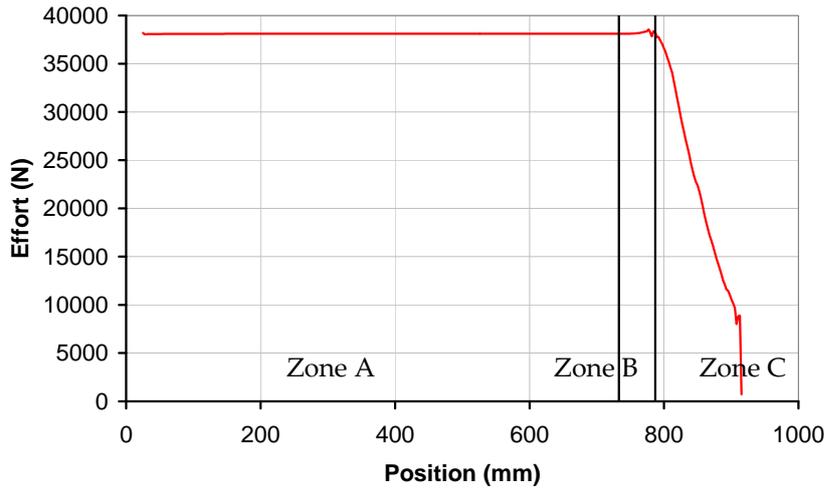


Figure 187 : Découpage d'un avivé de bois en différentes zones

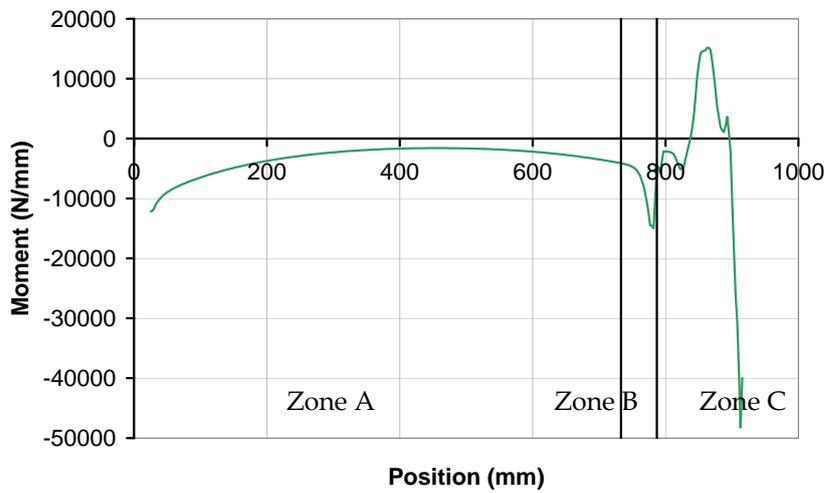
La figure 188 (a) montre l'évolution de l'effort normal le long de l'avivé de bois. L'effort normal est maximal et évolue peu le long de l'avivé tant qu'il n'y a pas contact avec le coin intérieur. Dans la zone B, l'effort normal ne varie pas, puis dans la zone C, cet effort diminue progressivement ce qui correspond au passage progressif de l'effort du bois vers le coin intérieur. Cet effort diminue rapidement à la fin de l'assemblage.

La figure 188 (b) montre l'évolution du moment fléchissant le long de l'avivé de bois. Le moment évolue légèrement tant que le bois n'est pas en contact avec l'assemblage. Cette évolution est due à la courbure de l'avivé à la sortie de l'assemblage. Dans les zones B et C, le moment évolue plus fortement ce qui s'explique par le fait que la courbure du bois est plus forte et que les efforts normaux évoluent de manière différente sur la hauteur de la section.

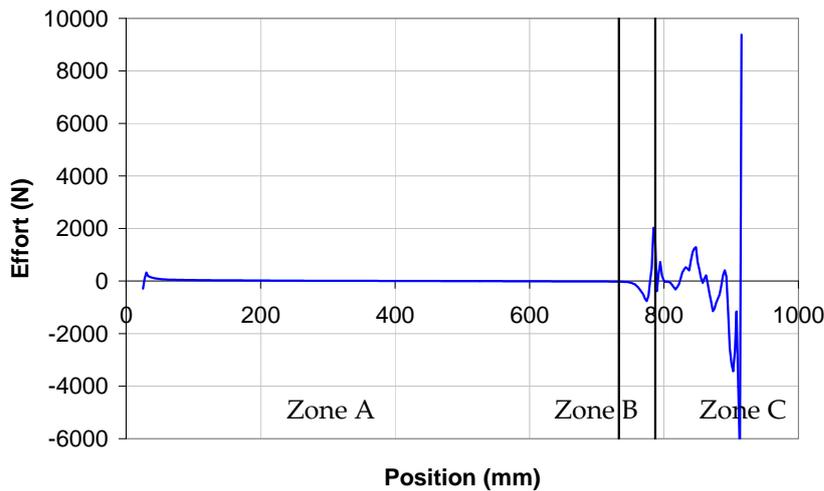
Cette évolution du moment fléchissant donne naissance à un effort tranchant. Ce dernier n'a pas d'influence dans la zone C puisque le bois est confiné entre le coin intérieur et le boîtier extérieur. Dans la zone B, en revanche, cet effort tranchant combiné à l'effort de traction dans l'avivé explique la ruine de la plupart des avivés à la sortie de l'assemblage (Figure 79).



(a) Effort normal



(b) Moment fléchissant



(c) Effort tranchant

Figure 188 : Evolution des efforts de la RDM le long des poutres dans les aivés de bois

La contrainte de compression transversale (mesurée dans la mousse) évolue peu jusqu'à une position de 905 mm. Au-delà de ce point, cette contrainte augmente très fortement comme l'indique la figure 189. Ce point constitue la fin de l'assemblage à l'endroit où l'effort de traction longitudinale est le plus faible. Ainsi, le

fait d'avoir densifié le bois au-delà du plateau de densification a endommagé sur une distance où il y a peu d'effort de traction longitudinale.

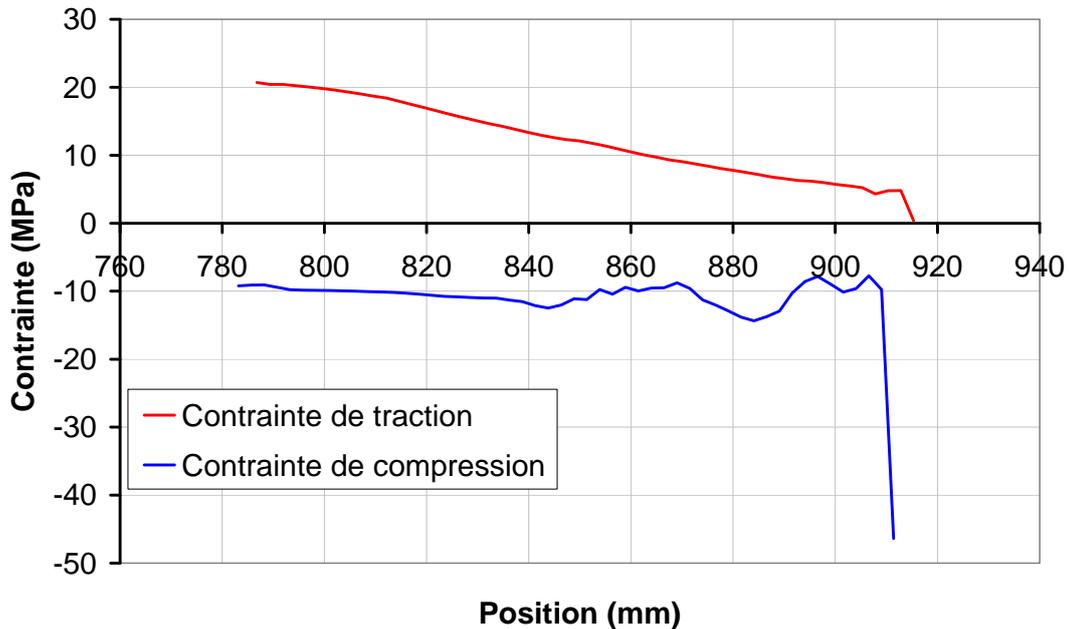
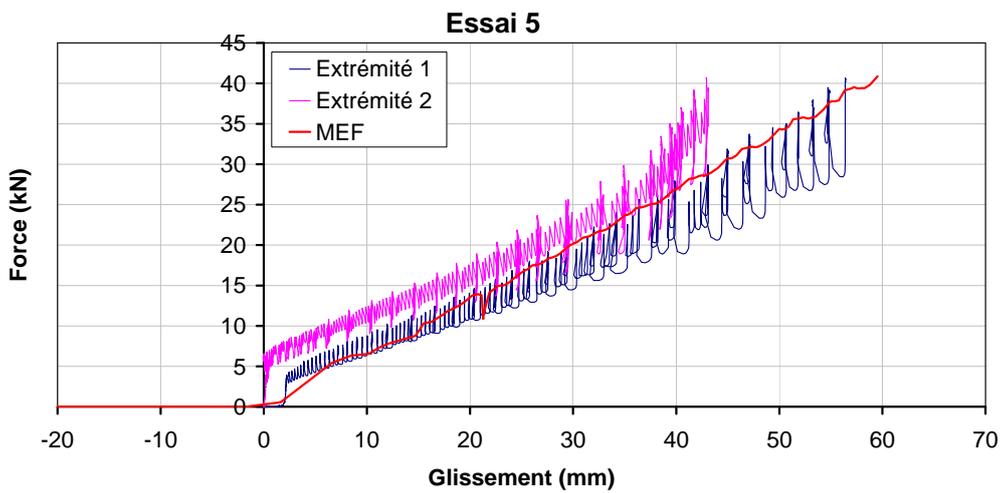
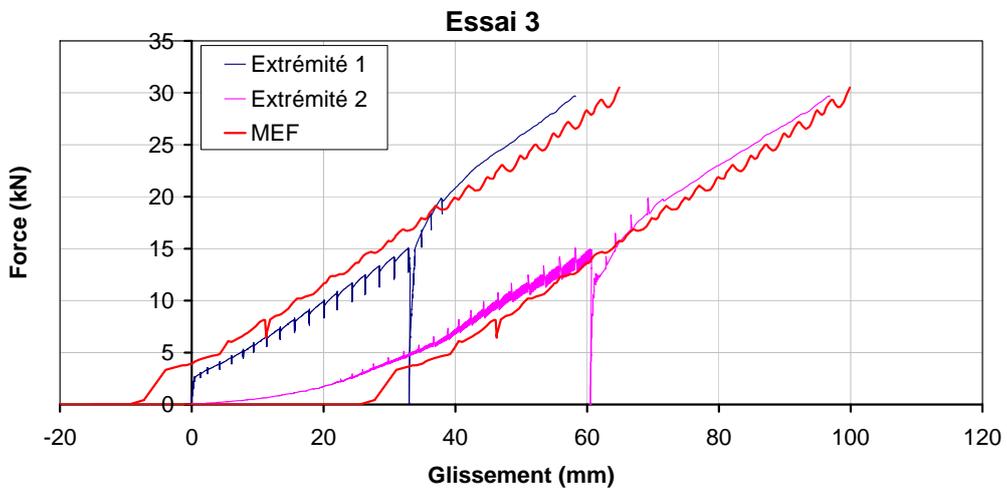
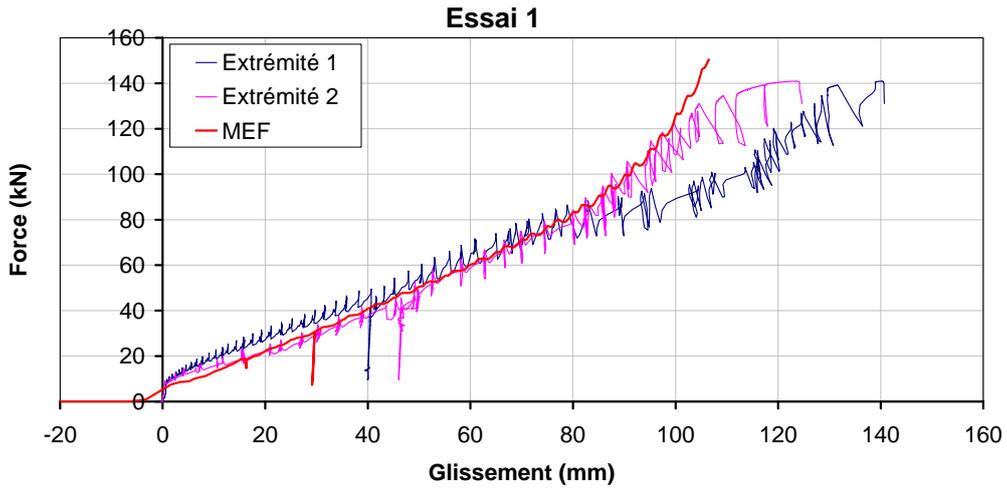


Figure 189 : Evolution des contraintes de traction et de compression le long de la zone C du bois

La phase de densification des assemblages du Chapitre 1 va trop loin et nécessite trop d'énergie. Pour optimiser le procédé, il est nécessaire de ne pas dépasser le plateau de densification pour ne pas endommager la résistance du matériau en traction longitudinale.

4.5. Comparaison de l'ensemble des essais avec le modèle

La figure 190 compare les données expérimentales à la réponse globale de la plupart des essais réalisés et décrits au Chapitre 1. Le coefficient de frottement est le même pour tous les essais : 0,2. Les résultats obtenus semblent tout à fait satisfaisants.



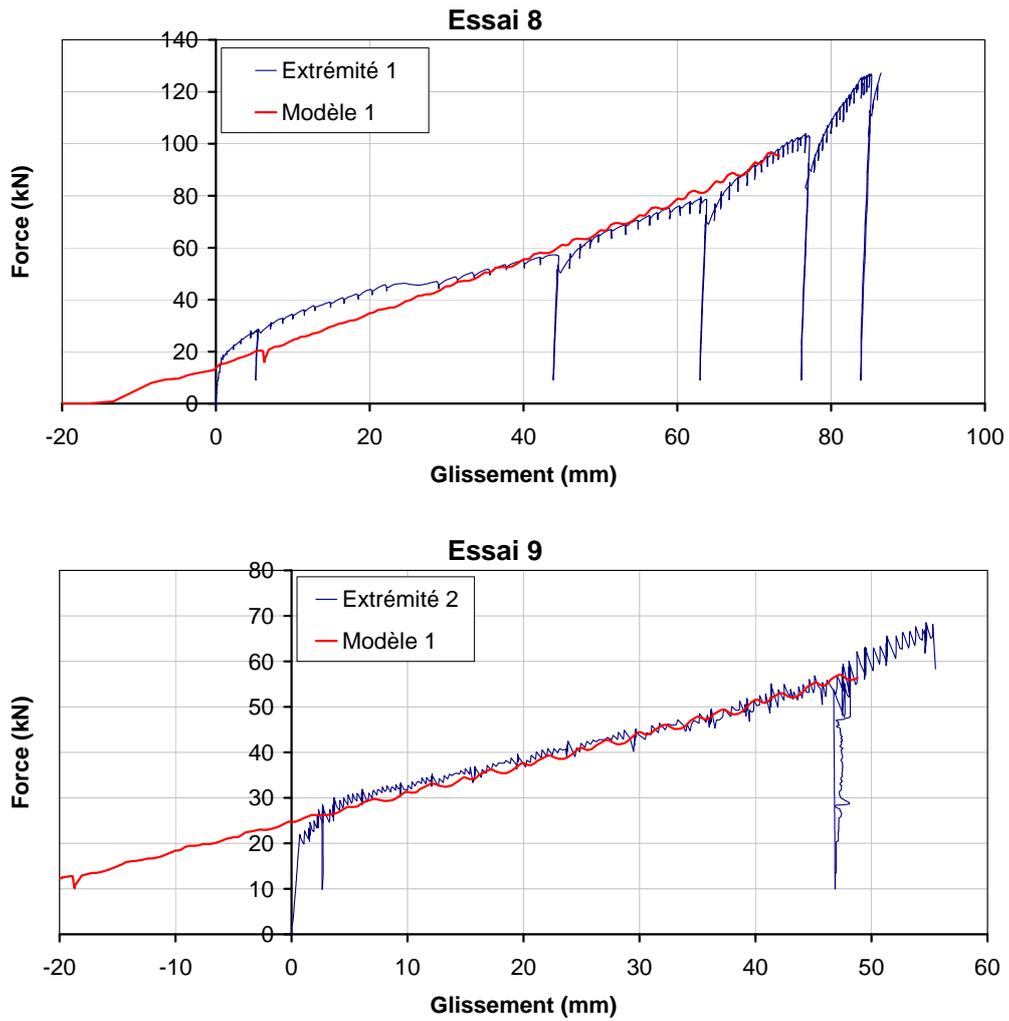


Figure 190 : Comparaison entre les données expérimentales et le modèle par éléments finis

5. CONCLUSION SUR LA MODELISATION DES ASSEMBLAGES FIBREUX PAR UN MODELE MESOSCOPIQUE

Les matériaux fibreux naturels tels que le bois et le bambou sont complexes à modéliser par la méthode des éléments finis et ce pour différentes raisons. Tout d'abord, il s'agit de matériaux fortement anisotropes au comportement mécanique très différents dans les directions longitudinale et transversales. Cette anisotropie est liée à leur structure complexe et très inhomogène. Ce dernier facteur a pour conséquence que l'hypothèse de continuité utilisée la plupart du temps dans les modèles par éléments finis n'est pas utilisable à l'échelle de l'assemblage pour ces types de matériaux. Ainsi, dans une démarche de caractérisation du matériau pour alimenter le modèle, si cette caractérisation est réalisée sur des éprouvettes de tailles macroscopiques, les éléments du modèle ne peuvent pas être de trop petite taille. Pour le bois, la taille des éléments dans la direction transversale doit être inférieure à la largeur moyenne des cernes. Le type de modèle réalisé avec cette taille d'élément est appelé *modèle mésoscopique*. Il a été initialement développé par Bocquet [BOC 1998] et a été utilisé pour ce travail.

Une autre difficulté liée aux matériaux fibreux est l'interaction entre les différentes sollicitations qui sont difficilement mesurables. Aussi, il est choisi ici, dans une première approche, de ne pas prendre en compte la plupart d'entre elles. Un autre point difficile à mesurer est la direction d'écoulement plastique de la matière. Dans la configuration étudiée ici seule la compression transversale du matériau apporte de la non linéarité au système. Ce facteur est pris en compte par un modèle mousse qui a un critère non associé et a été étudié plusieurs fois dans la bibliographie pour modéliser le bois dans cette sollicitation. Il y a deux problèmes principaux liés à ce modèle. Tout d'abord la forme du critère donne l'interaction entre la compression et le cisaillement du matériau, et cette interaction est critiquable. De plus, ce modèle est isotrope.

Pour contourner ce dernier problème, le maillage des matériaux fibreux est formé de deux constituants : la mousse dans la direction transversale et un autre constituant dans la direction longitudinale. Cette superposition a deux intérêts : simuler le comportement isotrope transverse du matériau et simuler l'écoulement plastique de la matière en compression longitudinale (l'écoulement plastique est modélisé par l'effondrement de la structure : il s'agit d'un *modèle structural*). Ce dernier point n'a pas été étudié lors de ce travail et nécessiterait des investigations plus poussées.

Pour la simulation du bambou, la loi de comportement du matériau en compression transversale n'a pas été déterminée convenablement ce qui a pour conséquence que le comportement global du système assemblage précontraints – bambou trouvé par le MEF est éloigné des données expérimentales. Pour le bois en

revanche, cette loi est déterminée de façon satisfaisante : la réponse globale du MEF retranscrit alors de façon parfaitement réaliste les essais.

La façon de modéliser les matériaux fibreux par un modèle mésoscopique structural semble satisfaisante car à partir des lois locales de la matière, il est possible de retranscrire la réponse globale d'un essai mécanique avec des éléments ayant des tailles qui permettent d'en déduire une contrainte avec un sens physique.

Chapitre 5.

Amélioration et optimisation des assemblages précontraints

En regardant plus attentivement les assemblages précontraints appliqués aux chaumes de bambou, il apparaît que leur géométrie est directement fixée par la forme du chaume. De plus, le développement d'efforts parasites qui pourrait entraîner la ruine prématurée de l'ensemble chaume – assemblages précontraints semble limité : la géométrie de ces assemblages proposés au Chapitre 1 paraît presque aboutie. Il est alors possible d'optimiser directement les cônes des assemblages testés en conservant leur principe de fonctionnement ainsi que leur forme.

Pour les assemblages précontraints appliqués aux avivés de bois, le problème n'est pas le même puisqu'il y a des efforts parasites qui entraînent la ruine prématurée du système lors des essais de traction. Il est donc nécessaire de limiter l'apparition de ces efforts parasites. Dans ce cas, le travail réalisé ne vise pas à optimiser l'assemblage mais à l'améliorer. L'optimisation pourra être conduite si une géométrie particulière est retenue pour un besoin industriel. Cette étape n'est pas intégrée dans ce travail.

1. OPTIMISATION DE L'ASSEMBLAGE PRECONTRAIT POUR UN CHAUME DE BAMBOU

Le modèle par éléments finis réalisé étant entièrement paramétrable, il est possible de modifier plusieurs paramètres (notamment la géométrie de l'assemblage) et d'en ressortir une réponse. Ainsi, pour un vecteur d'entrées donné (c'est-à-dire une combinaison de plusieurs paramètres géométriques), il est possible de calculer par le MEF un vecteur sortie. Optimiser l'assemblage précontraint pour les chaumes de bambou signifie trouver la géométrie de l'assemblage offrant les meilleures propriétés mécaniques pour un volume (et donc un coût matière) le plus faible possible.

L'optimisation de l'assemblage précontraint pour le bambou s'est effectuée en trois étapes. Tout d'abord, il a été nécessaire de déterminer les données d'entrée à faire varier ainsi que leurs bornes et l'ensemble des paramètres de sortie à optimiser. A l'aide du programme MEF et des différentes données d'entrées, les variables de sorties ont été calculées. La deuxième étape s'est concentrée sur la réalisation d'une surface de réponse continue à partir des sorties discrètes du MEF. A partir de cette surface continue, il a été possible dans un troisième temps de trouver la solution optimale dans les bornes choisies.

1.1. Phase de calcul par éléments finis

Il est choisi de déterminer la géométrie d'un assemblage optimal pour un chaume de bambou préalablement testé. L'essai à partir duquel l'optimisation est réalisée est l'essai 6. Dans ce cas, le bambou a un diamètre intérieur moyen de 23,5 mm et une épaisseur de paroi de 7,7 mm. Le matériau choisi pour les cônes intérieurs et extérieurs est toujours de l'acier 4.6 (limite élastique de 240 MPa et module d'élasticité de 210 000 MPa avec un comportement élasto-plastique parfait).

La forme de l'assemblage est la même que celle testée expérimentalement et est représentée sur la figure 191. Sur cette dernière, les dimensions variables sont représentées ; il est possible d'en distinguer deux types. Tout d'abord les données qui constituent le vecteur entrée et qui peuvent varier indépendamment les unes des autres :

- Lg_{CI} Longueur du cône intérieur.
- Ep_{CEHaut} Epaisseur du cône extérieur à l'extrémité de l'assemblage.
- Ep_{CEBas} Epaisseur du cône extérieur à l'entrée de l'assemblage.
- α Angle du cône intérieur avec la verticale.

et les variables fixes ou dépendantes des vecteurs d'entrée :

- Lg_{supB} Longueur de bambou permettant le déplacement du cône intérieur et donc la précontrainte de l'assemblage. Pour que le système fonctionne, il est nécessaire que cette longueur soit suffisamment importante pour imposer dans le bambou suffisamment de contrainte de compression. Cette valeur est fixe pour tous les essais et vaut 35 mm.

Lg_{CE} Longueur du cône extérieur. Cette valeur varie avec la longueur du cône intérieur : $Lg_{CE} = Lg_{CI} + Lg_{supB}$

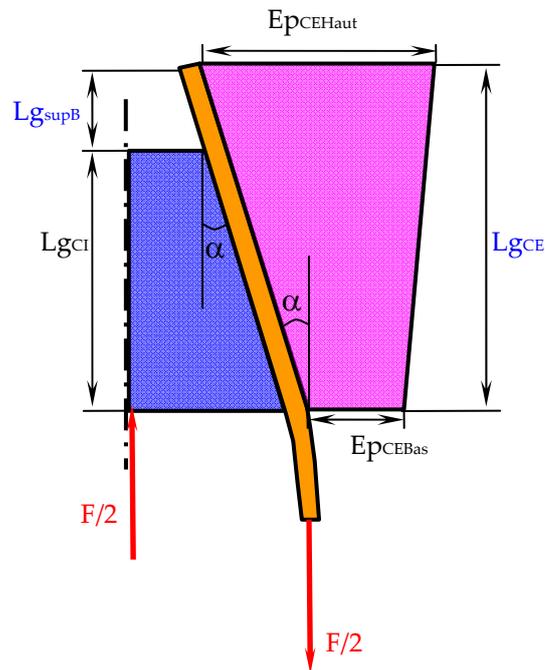


Figure 191 : Forme des assemblages précontraints avec le nom des variables géométriques lors de l'optimisation

Ainsi, quatre variables d'entrées sont définies pour tenter d'optimiser l'assemblage précontraint appliqué pour les chaumes de bambou : la longueur du cône intérieur, l'angle de l'assemblage et les épaisseurs extrêmes du cône extérieur. La géométrie du bambou et les propriétés des matériaux sont quant à elles fixées.

Les bornes des quatre variables d'entrées dépendent de différents paramètres. La longueur de cône intérieur ne peut pas dépasser la longueur des entre-nœuds et doit en plus permettre à la tige de bambou sa flexion pour être plaquée contre le cône intérieur. Ainsi, ce dernier varie entre 50 et 200 mm. L'angle de l'assemblage testé expérimentalement est de 3°. Il est choisi de ne pas dépasser cet angle car au-delà, il est possible que des efforts parasites de flexion apparaissent. Aussi, la valeur de l'angle varie entre 1 et 3°. Pour la géométrie du cône extérieur, les épaisseurs varient entre 1 et 15 mm. A partir de ces valeurs d'épaisseurs extrêmes du cône extérieur, la surface de la coupe de ce dernier (notée S_{CE}) peut être calculée (cette surface étant directement proportionnelle au volume de matière) par la formule suivante :

$$S_{CE} = \frac{(Ep_{CEHaut} + Ep_{CEBas})Lg_{CE}}{2}$$

Les calculs réalisés par le MEF donnent des résultats discrets pour chaque vecteur d'entrée. Chaque combinaison pour les valeurs des quatre paramètres d'entrée résumés dans le tableau 14 est réalisée ce qui fait 192 combinaisons.

Lg _{CI} (mm)	50	100	150	200
α (°)	1	2	3	
Ep _{CEBas} (mm)	1	2	10	15
Ep _{CEHaut} (mm)	1	2	10	15

Tableau 14 : Différentes valeurs que peuvent prendre les données d'entrée pour l'optimisation de l'assemblage précontraint appliqué aux chaumes de bambou

Le but de l'optimisation est d'obtenir les meilleures caractéristiques de l'assemblage pour le minimum de matière. Le modèle par éléments finis est piloté en déplacement : un déplacement du cône intérieur de 22 mm est imposé. Pour ce déplacement imposé, la force maximale au niveau du cône intérieur est mesurée. Plus cette force est grande et plus l'assemblage est raide et donc performant. Ainsi, la force maximale dans le cône intérieur mesurée par le MEF constitue le premier paramètre de sortie ; ce paramètre doit être maximisé. Pour minimiser la matière qui forme l'assemblage, la surface d'une tranche du cône extérieur (calculée directement à partir de sa géométrie) doit être minimisée. Enfin, pour que la contrainte sur la hauteur du cône extérieur soit la plus homogène possible, la variation de la contrainte de Von Mises est calculée grâce au MEF et cette variation doit être minimisée.

A partir du modèle par éléments finis, un vecteur de sortie à trois paramètres est trouvé pour chacun des 192 vecteurs d'entrées (quatre paramètres par vecteur d'entrée). Ainsi à partir du MEF, une surface de réponse discrète est formée. Pour trouver le vecteur d'entrée optimal, il est nécessaire de créer une **fonction objectif** à partir de la combinaison linéaire des paramètres du vecteur de sortie. L'optimal de cette fonction, entre les bornes définies, a peu de chance de se trouver parmi les 192 vecteurs d'entrées. Aussi, il paraît indispensable d'interpoler les réponses trouvées. Etant donnée la non-linéarité du système modélisé, il est clair que l'interpolation n'est pas linéaire. De plus, l'espace de solution est un espace à quatre dimensions qu'il est impossible de représenter. Pour interpoler l'espace de solutions discret trouvé par le MEF et former ainsi un espace continu de solutions plus facile à optimiser, un réseau de neurones est construit. Cette technique semble la plus élaborée puisqu'elle permet de constituer une surface de réponse multicritère à n dimensions et donc étudier ainsi simultanément l'influence des différents paramètres.

1.2. Phase d'interpolation

1.2.1. Introduction aux réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont constitués de plusieurs couches successives de neurones artificiels dont le développement est issu de travaux de simulation des neurones biologiques (Figure 192). Ces derniers sont constitués de trois composants principaux : les dendrites, le corps du neurone et l'axone. Plusieurs

dendrites parviennent jusqu'au corps du neurone. Chaque dendrite reçoit les informations d'un ou plusieurs autres neurones. L'ensemble des dendrites d'un neurone peut être vu comme un intégrateur c'est-à-dire comme un ensemble faisant la somme de toutes les informations électriques qui proviennent des autres neurones. Cette information, arrivant au corps du neurone, est passée aux dendrites des neurones suivant via l'axone si la stimulation est suffisante. Le passage des neurones vers les dendrites se fait par l'intermédiaire de synapses.

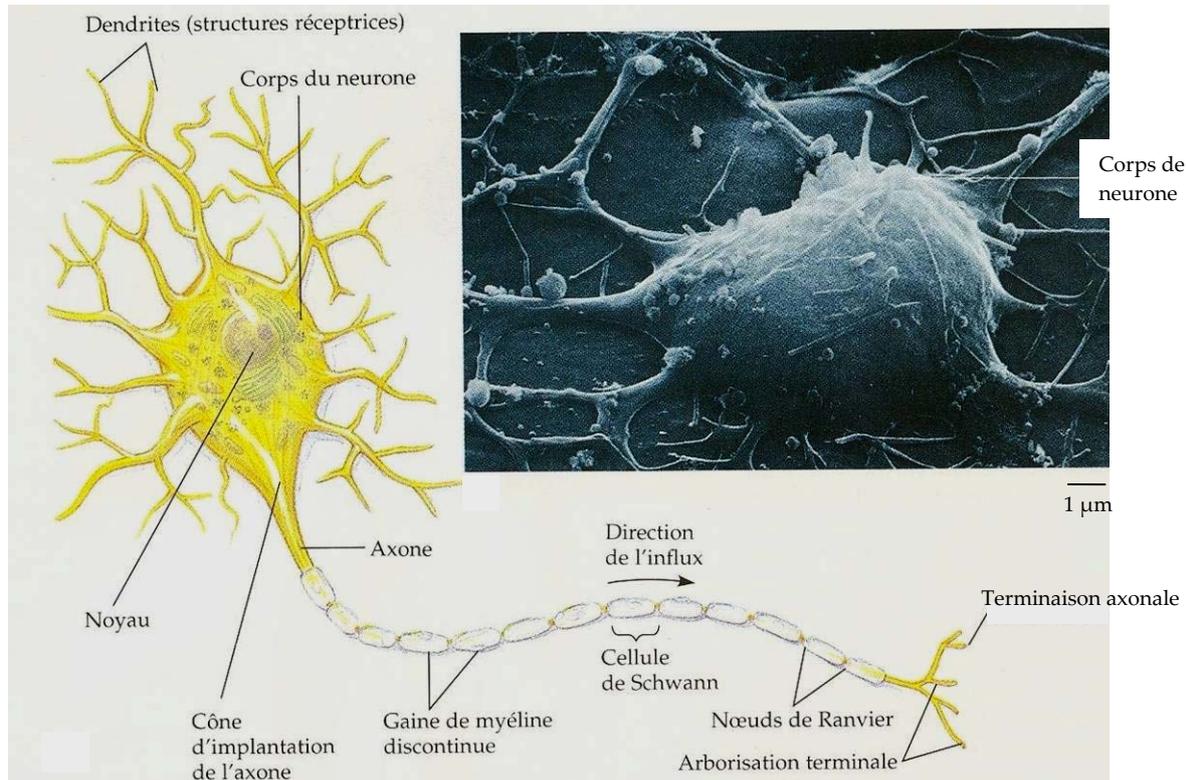


Figure 192 : Réseau de neurones biologiques [CAM 1995]

Le fonctionnement d'un neurone artificiel est directement inspiré du neurone biologique même si sa complexité est bien moins élevée. Ainsi, un neurone artificiel peut se décomposer en un intégrateur et une fonction de transfert (f); une représentation simplifiée est proposée sur la figure 193. Sur cette figure, la réponse donnée par le neurone et le neurone lui-même sont symbolisés par la même notation.

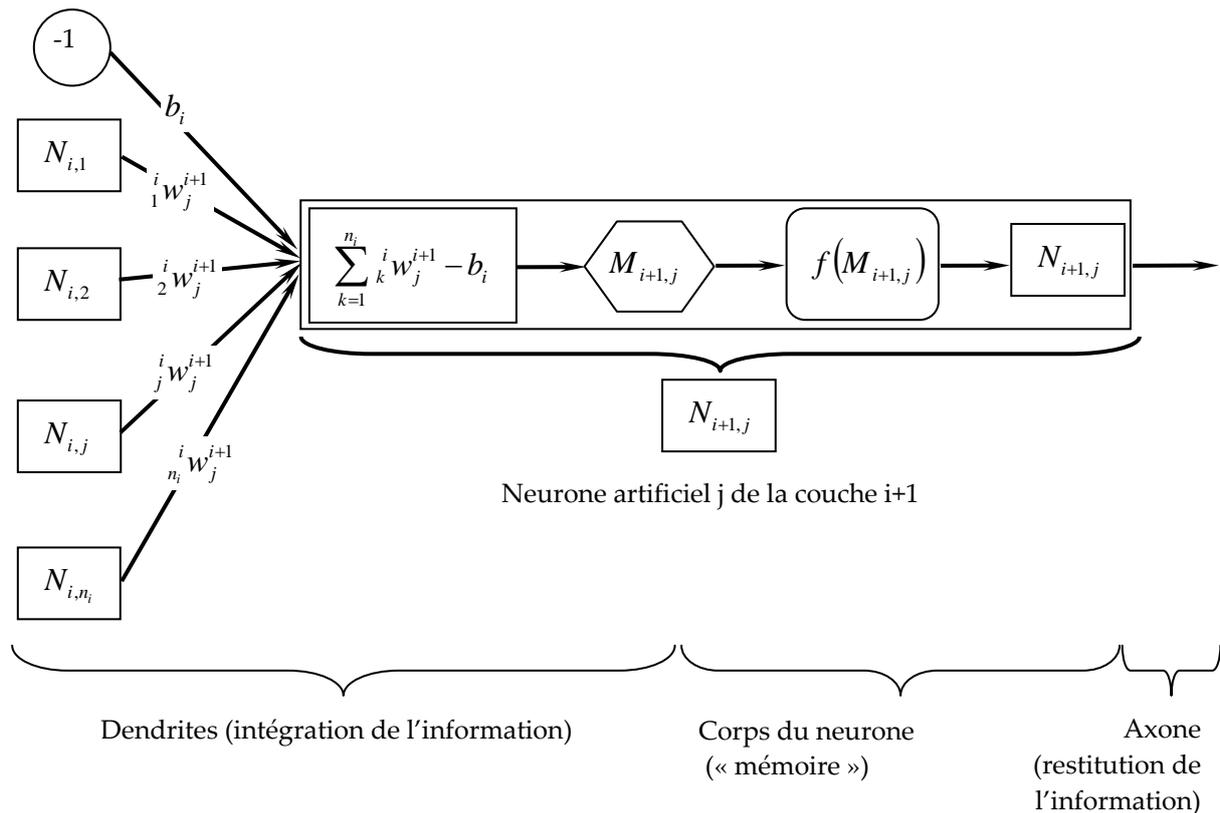


Figure 193 : Représentation simplifiée d'un neurone artificiel

La fonction d'intégration du neurone correspond à une somme pondérée des informations d'entrée du neurone. Ces informations correspondent soit aux vecteurs d'entrées du Réseau de Neurones Artificiel (RNA) soit à la couche de neurone précédente. Les poids permettant la pondération des sommes sont notés ${}^i w_j^{i+1}$ dans le cas général de la pondération entre le neurone h de la couche i et le neurone j de la couche $i+1$. A cette somme pondérée est soustrait le biais (noté b_i lorsqu'il est issu de la couche i) aussi appelé seuil d'activation du neurone. Lorsque le niveau d'activation atteint ou dépasse le seuil b_i , alors le résultat de l'intégration (noté $M_{i+1,j}$ pour un neurone j de la couche $i+1$) devient positif ou nul ; ce résultat est appelé niveau d'activation du neurone. Cette fonction d'intégration du neurone artificiel est comparable aux dendrites du neurone biologique. Dans le cas de ce dernier, l'information transite si le neurone est suffisamment excité. Ce phénomène est également pris en compte dans le neurone artificiel et est réalisé mathématiquement par l'intermédiaire de la fonction de transfert f . Cette fonction peut prendre différentes formes comme l'indique le tableau 15. Les différentes fonctions de transfert fonctionnent entre 0 et 1 ou entre -1 et 1 lorsqu'elles sont symétriques : les données d'entrées du RNA doivent donc être normées par rapport à leur valeur maximale.

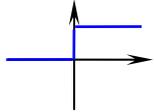
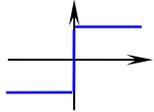
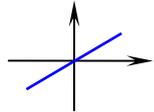
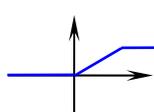
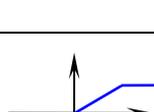
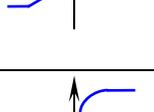
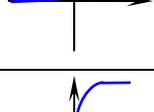
Nom de la fonction	Equation	Forme
Seuil	$N_{i+1,j} = \begin{cases} 0 & \text{si } M_{i+1,j} < 0 \\ 1 & \text{si } M_{i+1,j} \geq 0 \end{cases}$	
Seuil Symétrique	$N_{i+1,j} = \begin{cases} -1 & \text{si } M_{i+1,j} < 0 \\ 1 & \text{si } M_{i+1,j} \geq 0 \end{cases}$	
Linéaire	$N_{i+1,j} = M_{i+1,j}$	
Linéaire saturée	$N_{i+1,j} = \begin{cases} 0 & \text{si } M_{i+1,j} < 0 \\ M_{i+1,j} & \text{si } 0 \leq M_{i+1,j} < 1 \\ 1 & \text{si } M_{i+1,j} \geq 1 \end{cases}$	
Linéaire saturée symétrique	$N_{i+1,j} = \begin{cases} -1 & \text{si } M_{i+1,j} < -1 \\ M_{i+1,j} & \text{si } -1 \leq M_{i+1,j} < 1 \\ 1 & \text{si } M_{i+1,j} \geq 1 \end{cases}$	
Sigmoïde	$N_{i+1,j} = \frac{1}{1 + e^{-M_{i+1,j}}}$	
Tangente hyperbolique	$N_{i+1,j} = \frac{e^{M_{i+1,j}} - e^{-M_{i+1,j}}}{e^{M_{i+1,j}} + e^{-M_{i+1,j}}}$	

Tableau 15 : Quelques équations possibles pour la fonction de transfert [PAR 2004]

Les réseaux de neurones utilisés dans la quasi-totalité des cas sont les réseaux de neurones multicouches [THO 1997]. Il en existe différents types et seuls les réseaux neuronaux multicouches unidirectionnels sont étudiés ici. D'après Parizeau [PAR 2004], les neuronaux multicouches unidirectionnels de type perceptron multicouche sont les plus utilisés pour des problèmes d'approximation, de classification et de prédiction. Le but du réseau de neurones utilisé ici étant d'interpoler les résultats discrets trouvés par le MEF, c'est-à-dire de prédire pour un vecteur de données la sortie que donnerait le MEF, ce type de réseau de neurones semble adapté. Une schématisation de ce type de réseau de neurones est donnée, avec les notations précédemment définies, sur la figure 194.

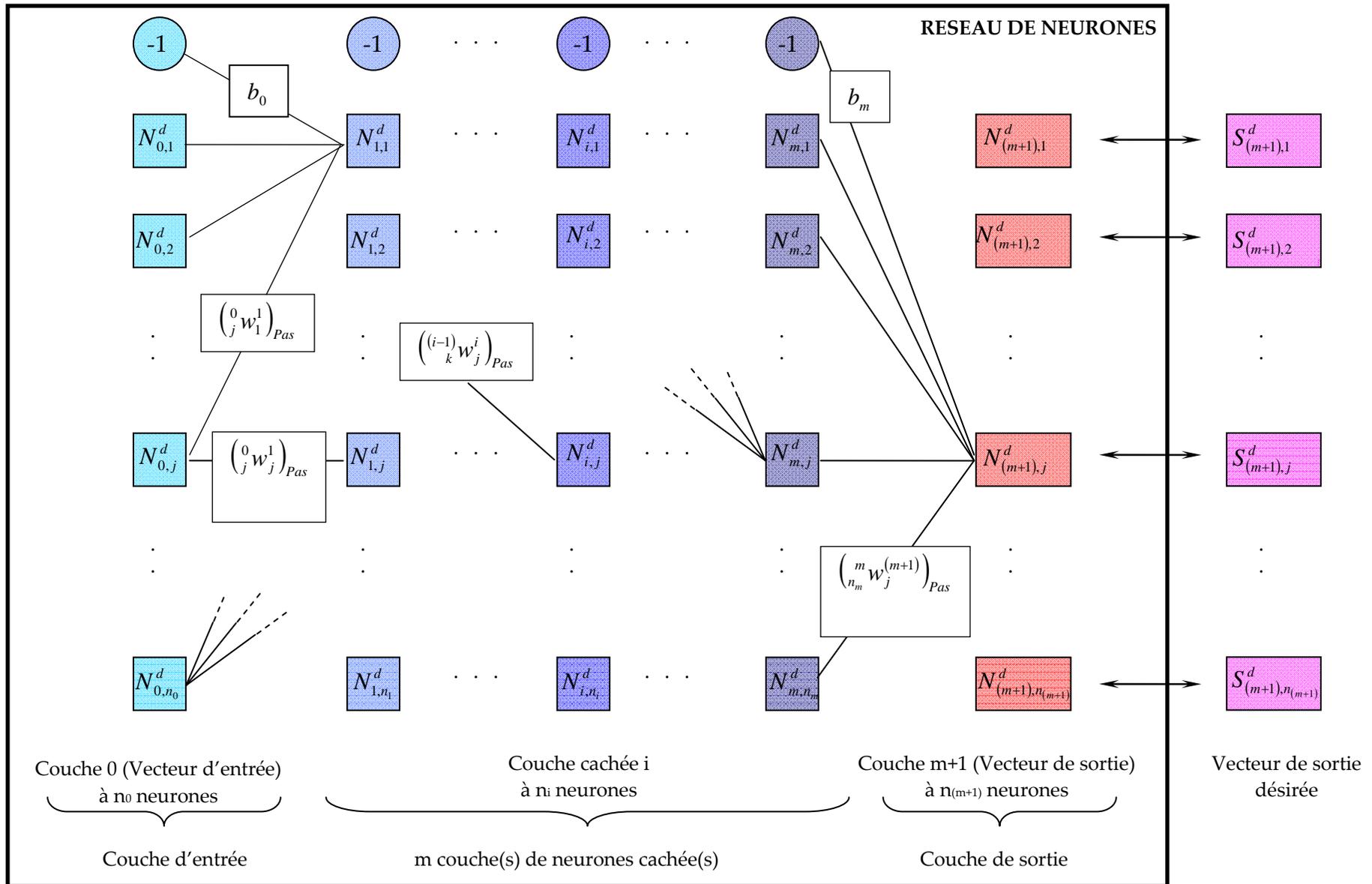


Figure 194 : Schématisation d'un réseau de neurones multicouches sigmoïdaux unidirectionnels réalisé pour la combinaison d (il est à noter que pour alléger le schéma toutes les connexions ne sont pas représentées)

Un réseau de neurones artificiels multicouche unidirectionnel est constitué de plusieurs neurones organisés par couche selon une architecture prédéfinie. Trois ensembles peuvent être distingués dans un réseau de neurones. Tout d'abord la couche d'entrée qui correspond au vecteur des données du problème et ne constitue donc pas une couche de neurones. Le réseau de neurones se termine par une couche de neurones de sortie dont le nombre dépend du nombre de sorties désirées par combinaison. Entre les couches d'entrée et de sortie se trouve un certain nombre de couches de neurones cachés. Le nombre de neurones par couche ainsi que le nombre de couches peut varier d'un réseau à l'autre. En règle générale plus le réseau possède un nombre de couches élevé, plus il arrive à retranscrire l'évolution du phénomène étudié. Pourtant un trop grand nombre de couches ou de neurones risque d'avoir pour conséquence l'adaptation du réseau au bruit : il devient trop rigide et n'arrive donc plus à extrapoler le comportement général du système. Parizeau [PAR 2004] affirme qu'il est possible de démontrer qu'avec un réseau de trois couches (deux couches cachées + une couche de sortie), il est possible de construire des frontières de décision de complexité quelconque, ouvertes ou fermées, concaves ou convexes, à condition d'employer une fonction de transfert non linéaire et de disposer de suffisamment de neurones sur les couches cachées.

Dans le cas d'un RNA multicouche unidirectionnel, les sorties d'un neurone ne peuvent aller que de sa couche vers la couche suivante. L'information de sortie ne peut pas passer entre neurones d'une même couche ou vers une couche précédente (pas de possibilité de bouclage). Ainsi, chaque neurone reçoit les informations d'entrée par la couche de neurones qui la précède et envoie ses informations de sortie vers les neurones de la couche suivante. Dans le cas de la première couche cachée de neurones, les informations d'entrées sont directement données par le vecteur d'entrée. Si tout le RNA est connecté, chaque neurone est connecté à tous les neurones des deux couches qui l'entourent mais il est également possible que le réseau soit partiellement connecté.

Sur la figure 194, les données d'entrée et les sorties des neurones ont un indice d . Ceci est dû au fait que pour l'exemple de la modélisation de l'assemblage précontraint pour le bambou, il y a 192 combinaisons modélisées par le MEF : ainsi d est un incrément qui varie de 1 à 192.

Pour que le RNA donne une solution acceptable, il est nécessaire qu'il passe par une phase d'apprentissage. Cette dernière consiste à faire évoluer les poids synaptiques (${}^i w_j^{i+1}$) jusqu'à ce que l'erreur entre la réponse du réseau de neurones et le vecteur de sortie désiré soit la plus faible possible. Cette méthode, appelée apprentissage par correction de l'erreur, tente de faire tendre l'erreur vers zéro par une modification des poids synaptiques. Les algorithmes traditionnellement utilisés sont la descente du gradient ou le gradient conjugué. Ces algorithmes seront décrits plus précisément dans le paragraphe 1.3.1 de ce chapitre. Un exemple d'algorithme

pour la réalisation d'un réseau de neurones de type perceptron multicouche est proposé en Annexe 3.

Dans la pratique, il est courant de séparer les résultats d'expériences en deux. Une première partie sert lors de l'apprentissage du réseau de neurones et la seconde partie sert à valider le réseau. Cette opération est nécessaire car il est impossible de valider le RNA en utilisant les mêmes données que pour le créer. De cette manière, il peut être vérifié que le réseau approxime bien la fonction cherchée. Ceci a aussi pour but de vérifier que le réseau de neurones tire des expériences un comportement général et qu'il n'est pas soumis à un sur-apprentissage et à une adaptation au bruit.

1.2.2. Implémentation du réseau de neurones pour l'interpolation des données discrètes issues du MEF

Barthram [BAR 2009] a étudié le comportement mécanique d'assemblages par tourillons soudés. Pour caractériser la résistance de ces derniers en fonction de différents paramètres (sept paramètres différents), il a réalisé un réseau de neurones de type perceptron multicouche. Ce dernier est constitué de sept données d'entrée, d'une couche cachée à six neurones plus le biais et une couche de sortie à un neurone. La fonction de transfert de la couche cachée est une tangente hyperbolique et celle de sortie est une fonction linéaire. Le RNA utilisé est complètement connecté

Pour trouver l'interpolation entre les résultats discrets du MEF pour l'assemblage précontraint pour une tige de bambou, le même genre de RNA que Barthram est utilisé. Néanmoins, comme la réponse du MEF est plus stable que les données expérimentales trouvées par Barthram, il est possible de travailler avec plus de couches cachées (présence de moins de bruit). Ainsi, trois couches de neurones (deux couches cachées et la couche de sortie) sont utilisées avec le même nombre de neurones par couche cachée. De plus, comme les résultats recherchés sont tous positifs, la fonction de transfert utilisée au niveau des couches cachées est une fonction sigmoïde. Pour l'apprentissage du RNA, l'algorithme utilisé est la descente du gradient qui nécessite de définir un pas de gradient. La bibliographie [PAR 2004] indique d'utiliser une valeur autour de 0,7 : ce pas est pris égal à 0,69 pour l'exemple étudié. L'erreur à atteindre pour arrêter la phase d'apprentissage est de 0,01 et le nombre d'itérations maximum réalisés lors de la phase d'apprentissage est de 300 000. Le nombre de neurones par couche doit être optimisé pour trouver des résultats satisfaisants.

Pour optimiser le RNA, les 192 combinaisons sont divisées de manière aléatoire en deux populations : 75% des combinaisons (144 combinaisons) sont utilisées pour réaliser l'apprentissage du RNA et 48 combinaisons sont conservées pour vérifier la validité du RNA. Concrètement, le RNA fait son apprentissage à partir des 144 combinaisons d'entrée de la première population par rapport aux 144 combinaisons de sortie correspondantes. Une fois cet apprentissage terminé, les 48 combinaisons d'entrée de la seconde population sont entrées dans le réseau de neurones et les résultats trouvés par le procédé sont comparés aux résultats trouvés par le MEF.

Pour vérifier la validité de RNA, chacun des trois résultats obtenus pour chaque combinaison est tracé en fonction du résultat désiré (trouvé par le MEF). Ainsi, comme les valeurs sont normées (comprises entre 0 et 1), le coefficient de corrélation de cette droite suffit pour vérifier la validité du RNA : plus le coefficient est proche de 1 meilleur est le réseau neuronal. Il est utile de signaler ici qu'il y a une part aléatoire dans l'apprentissage du RNA, aussi les résultats obtenus sont une tendance qui a été vérifiée un certain nombre de fois plus qu'une vérité figée. L'évolution des coefficients de corrélations des trois résultats pour chaque combinaison de la population pour valider le RNA en fonction du nombre de neurones dans chacune des deux couches cachées est présentée sur la figure 195.

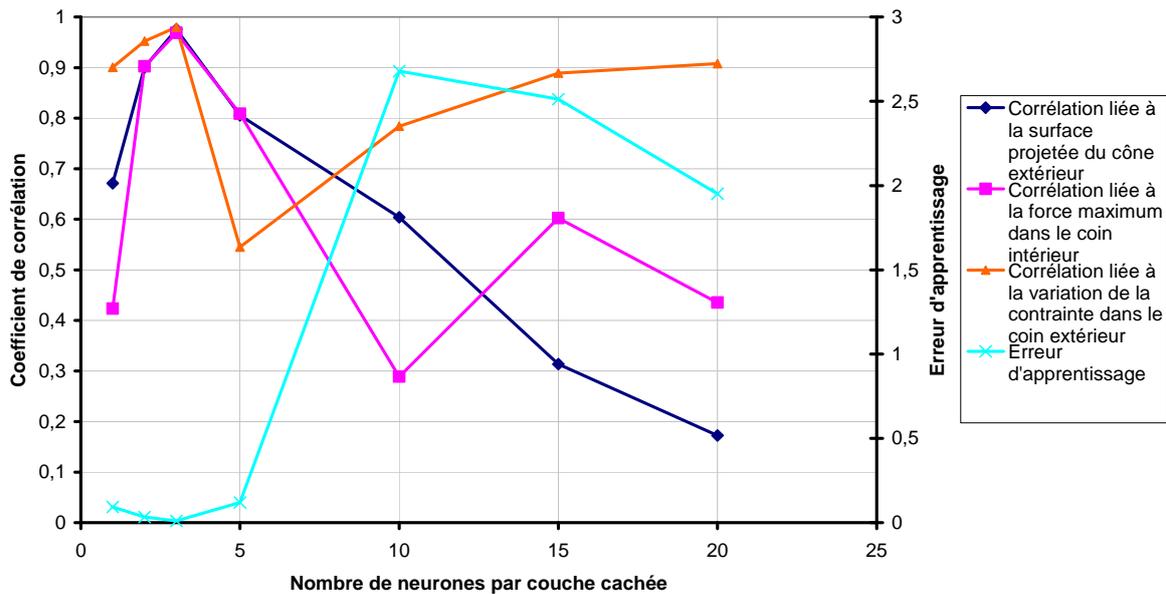
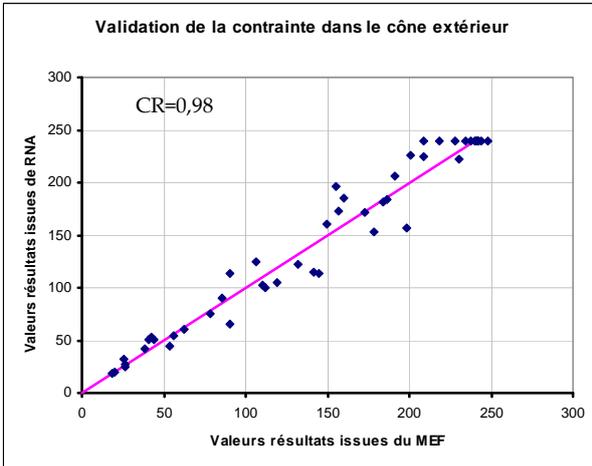
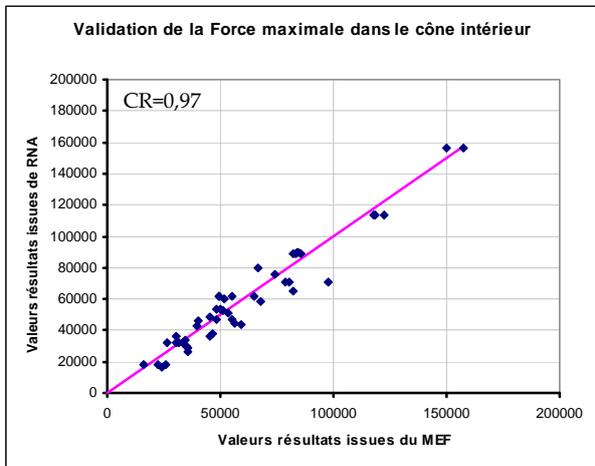
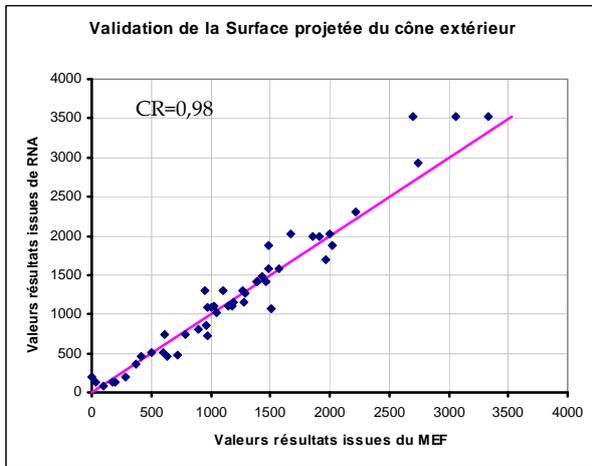
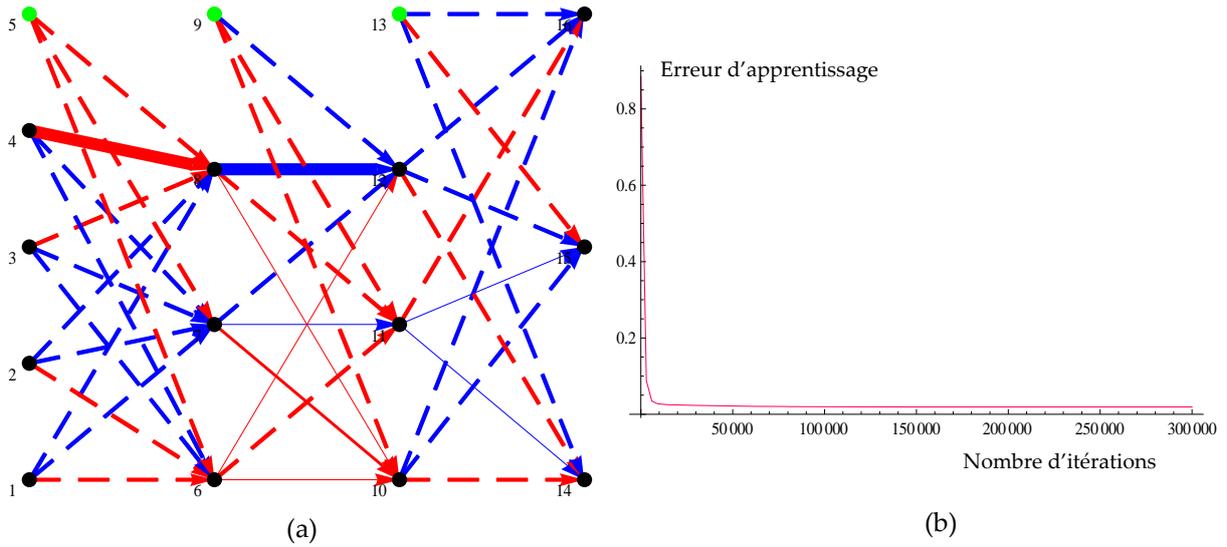


Figure 195 : Détermination du nombre de neurones optimal par couche cachée pour le RNA pour interpoler les données discrètes du MEF de l'assemblage précontraint pour le bambou

La figure 195 montre clairement que pour le perceptron multicouche décrit, lorsqu'il y a trois neurones pour chacune des deux couches cachées, les coefficients de corrélation calculés de la manière décrite ci-dessus sont les plus élevés (0,97 en moyenne) et l'erreur d'apprentissage est la plus faible. La figure 196 montre l'allure du RNA, l'évolution de l'erreur d'apprentissage au cours de la phase d'apprentissage ainsi que les courbes liant les résultats de RNA à ceux désirés pour la population de validation du RNA.



(c)

Figure 196 : Caractéristiques du RNA utilisé pour interpoler les résultats trouvés par MEF

(a) Architecture du RNA

(b) Evolution de l'erreur d'apprentissage au cours de l'apprentissage

(c) Comparaison entre les résultats obtenus par le RNA et le MEF pour la population de validation du réseau neuronal

A partir de la fonction continue formée par le RNA, il est possible de prédire la réponse du MEF pour les différents paramètres d'entrée. La figure 197 montre la réponse du RNA en faisant varier la longueur du cône intérieur. A partir de la fonction continue formée par le RNA, il est possible d'optimiser l'assemblage précontraint pour un chaume de bambou.

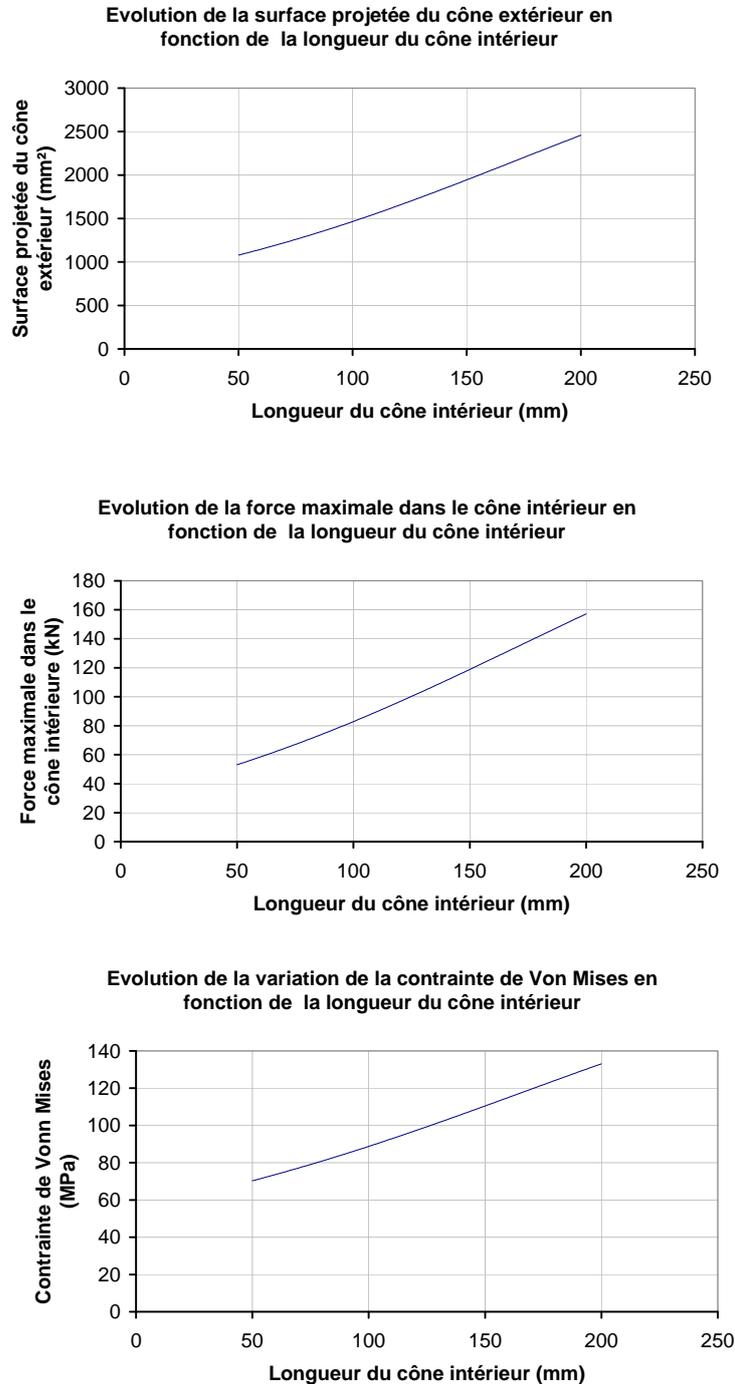


Figure 197 : Réponse du réseau de neurones en faisant varier la longueur du cône intérieur

1.3. Phase d'optimisation

A partir du RNA, une fonction continue liant les paramètres d'entrée (longueur du cône intérieur, angle de l'assemblage, épaisseurs extrêmes du cône extérieur) aux paramètres de sortie (force maximale dans le cône intérieur, surface projetée du cône extérieur et variation de la contrainte de Von Mises dans le cône extérieur) est créée. Pour trouver la combinaison d'entrée optimale, il est nécessaire de créer une fonction objectif qui est une combinaison linéaire de chaque combinaison de sortie. Ainsi, cette fonction objectif qui est la fonction à minimiser ou maximiser selon la combinaison linéaire réalisée est une fonction à quatre dimensions dans le cas de l'exemple étudié. Dans le cas général, la fonction objectif est une fonction à n dimensions qui doit être optimisée.

L'optimisation d'une telle fonction n'est pas simple et ce pour deux raisons : la plupart de temps, son trop grand nombre de dimensions fait qu'elle n'est pas représentable, et il est possible qu'elle ait des optimums locaux. Il existe différentes façons plus ou moins efficaces d'optimiser un système qui sont décrites dans le paragraphe suivant.

1.3.1. Choix de l'algorithme d'optimisation utilisé

La méthode la plus simple pour trouver l'optimum d'une fonction objectif est la méthode énumérative. Cette méthode s'emploie dans un espace fini et discrétisé. Un algorithme énumératif évalue la valeur de la fonction à optimiser en chaque point de l'espace solution. Par cette exploration exhaustive de l'espace de recherche des paramètres, toutes les combinaisons possibles sur une plage de variation limitée par l'utilisateur sont comparées entre elles. La solution optimale est celle pour laquelle la valeur est optimale.

En pratique, la plupart des espaces de recherche sont trop grands pour pouvoir explorer toutes les possibilités une par une. Cette méthode est très gourmande en temps et manque donc d'efficacité. Pour être utilisée, elle suppose de connaître un ordre de grandeur des paramètres qui donnent une réponse optimale et de ne pas être trop exigeant sur la précision. Pour le système à optimiser ici, cette méthode ne semble donc pas adaptée.

Pour résoudre ce problème, les méthodes déterministes sont utilisées. Le principe de ces méthodes est d'utiliser au mieux les informations connues sur la fonction objectif à optimiser. Pour utiliser ces méthodes, cette fonction doit être continue et dérivable sur l'espace de recherche. Les méthodes déterministes correspondent principalement aux méthodes dites de gradient appelées aussi méthodes de descente (ou de montée) suivant la plus forte pente. Une représentation simplifiée de cette méthode est réalisée sur la figure 198.

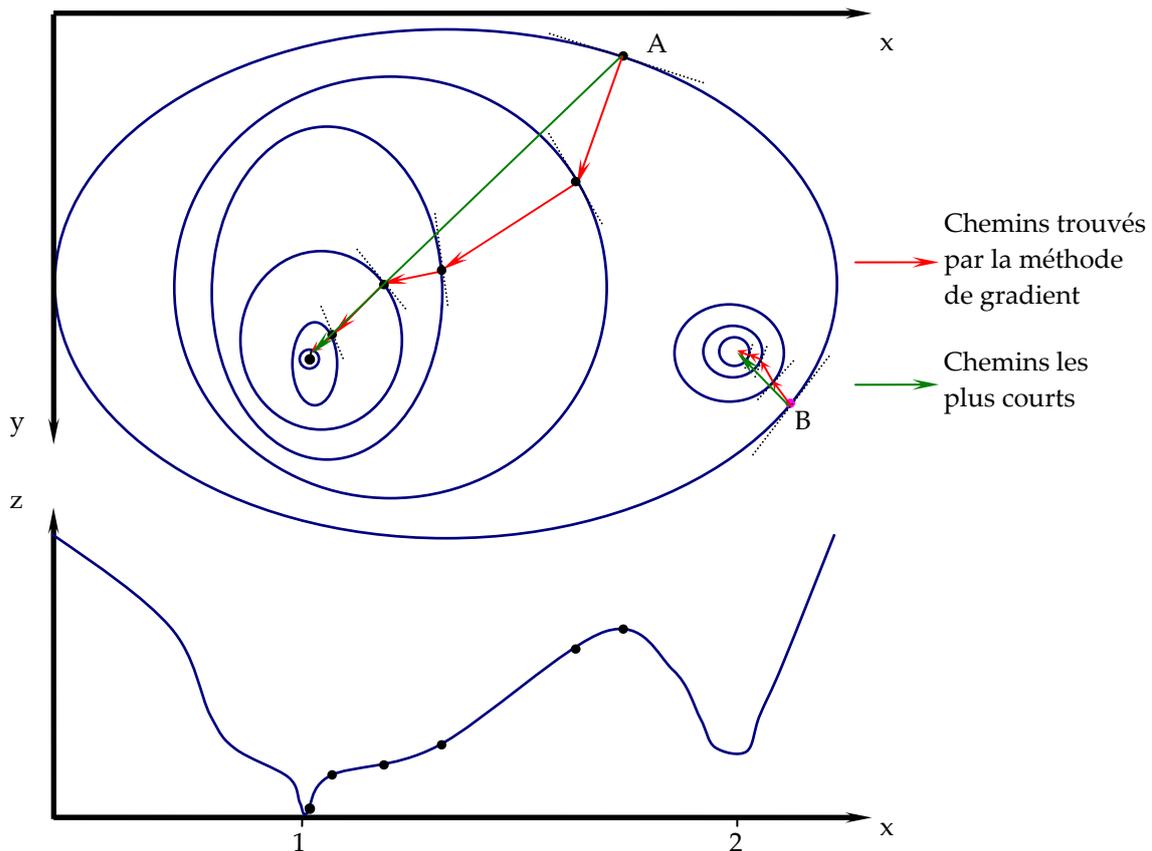


Figure 198 : Détermination de l'optimum d'une fonction par la méthode des gradients

La figure 198 montre l'exemple d'une cuvette dont le point le plus bas veut être déterminé. Dans ce cas, il y a deux valeurs d'entrées qui sont les coordonnées x et y et une valeur de sortie qui est l'altitude z . La fonction objectif ici est donc directement l'altitude z . Ce problème peut être généralisé à un système à n dimensions d'entrées. La première combinaison d'entrée est prise au hasard et à partir de ce point un chemin est déterminé pour trouver le point optimum (point A). Pour trouver la direction de ce chemin, le gradient en ce point est calculé (par des méthodes numériques la plupart du temps) ce qui donne la direction opposée de progression de la recherche du minimum d'une fonction (ou la direction dans le cas de la recherche d'un maximum). En donnant un incrément, à partir de ce gradient, un résultat est déterminé. Si la solution est améliorée, la direction est conservée et avec cet incrément un nouveau résultat est déterminé. Cette opération est répétée jusqu'à ce que la solution ne soit pas améliorée. Dans ce cas, le gradient en ce point est calculé et donc la direction du chemin est changée. La même opération est alors réalisée jusqu'à ce que la solution ne soit plus améliorée et ainsi de suite. Le processus est arrêté lorsqu'une certaine valeur est atteinte et/ou qu'un certain nombre d'incréments est dépassé.

Ce type d'algorithme peut être utilisé lors de la phase d'apprentissage d'un RNA c'est-à-dire pour réduire l'erreur entre les solutions trouvées par le RNA et les solutions désirées. Dans ce cas, la fonction objectif est le carré de la différence entre la

sortie du RNA et celle désirée. Cette fonction doit être minimisée et les paramètres d'entrées sont les poids du RNA.

Des méthodes comme le gradient conjugué ont été développées afin d'améliorer la vitesse de convergence. Ces méthodes mettent en relation par une fonction mathématique la direction de descente au pas i avec la direction de descente au pas $i-1$. D'autres méthodes comme les méthodes de Newton, encore appelée Newton-Raphson et les méthodes Quasi-Newton ont été développées. Elles possèdent de bonnes propriétés en termes de convergence mais ont l'inconvénient d'être gourmandes en temps de calcul.

Ces méthodes sont très efficaces lorsque la fonction à optimiser ne possède qu'un seul optimum. Dès que cette fonction possède plusieurs optimaux locaux, ces méthodes tendent à converger vers l'optimum local le plus proche. Ainsi, pour l'exemple de la figure 198, le minimum global se trouve au point 1, mais il existe un minimum local en 2. Si le point de départ (déterminé par hasard) est le point B, le minimum trouvé est alors le minimum local au point 2. Pour la fonction à optimiser, il y a certainement présence d'optimum locaux, aussi ces méthodes ne paraissent pas adaptées.

Pour surmonter l'obstacle des minimums locaux, l'idée d'autoriser de temps en temps une dégradation temporaire de la situation lors de la réalisation du chemin d'optimisation est amenée. Ces algorithmes mettent en œuvre des stratégies probabilistes afin de trouver une solution qui s'approche le plus de l'optimum global du problème : ce sont des méthodes stochastiques. Les algorithmes les plus utilisés pour ces méthodes sont la méthode de Monte Carlo, le recuit simulé et les méthodes évolutionnistes.

La méthode de Monte Carlo est la plus simple des méthodes stochastiques [LEV 2007]. Elle consiste à tirer sur l'espace de recherche, à chaque itération, une combinaison d'entrées de manière aléatoire. Le résultat de la fonction objectif obtenu pour cette combinaison est comparé au résultat trouvé à l'itération précédente. Si le résultat trouvé est meilleur que celui trouvé au pas précédent, la combinaison d'entrée ainsi que le résultat associé sont enregistrés et le processus continue. Sinon, le point précédent est conservé et la procédure continue jusqu'à ce que les conditions d'arrêt soient atteintes. D'après Levasseur [LEV 2007], cette méthode est robuste mais peu efficace et d'autres méthodes pseudo-aléatoires telles que les algorithmes évolutionnistes ou le recuit simulé lui sont préférées.

Pour expliquer le principe du recuit simulé, Levasseur utilise une analogie avec une bille qui oscille sur une pente comme illustré sur la figure 199. Dans le premier cas, (Figure 199 (a)), si la bille est laissée tomber, elle va osciller avant de se stabiliser au fond du creux. Dans le cas de la figure 199 (b), la bille est lâchée dans une pente qui se termine avec une remontée. Si la bille n'est pas lâchée de suffisamment haut, la pente peut la bloquer et elle va retomber dans le minimum local. En revanche, en

lâchant la bille de plus haut, le minimum local peut être évité. Mais fournir trop d'énergie n'est pas une bonne solution, car la bille risque de quitter le minimum global pour aller se nicher dans un autre minimum local (Figure 199 (c)). La bonne stratégie consiste alors à laisser la bille descendre suivant la plus grande pente, puis la laisser remonter le côté opposé, mais en réduisant progressivement la hauteur quelle peut atteindre. Ainsi, comme le montre la figure 199 (d), arrivée dans le creux A, elle pourra remonter en B et tomber en C. Cependant, si elle arrive en C, elle ne pourra plus remonter en B, car la hauteur BC est devenue trop importante. La détermination de la hauteur que peut franchir la bille est le paramètre primordial, pourtant celle-ci ne peut être déterminée qu'empiriquement ce qui rend l'utilisation de cet algorithme délicate.

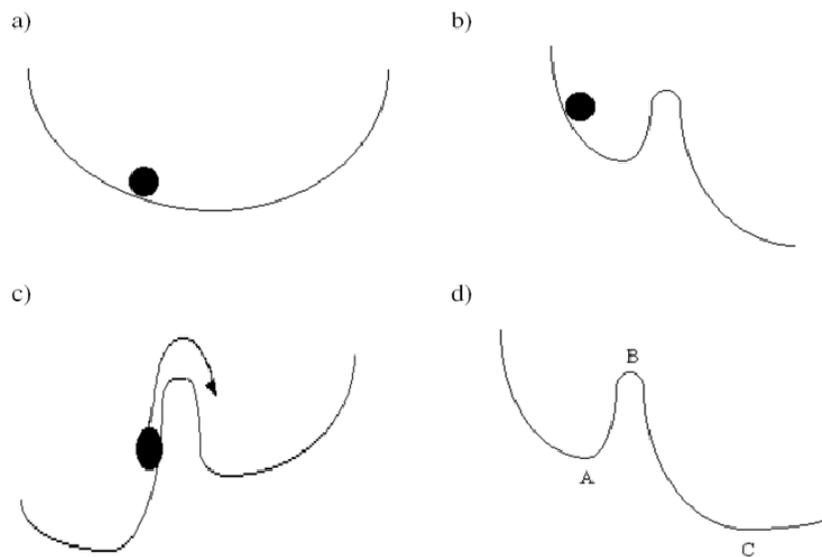


Figure 199 : Illustration du principe d'optimisation par Recuit Simulé : exemple d'une bille qui oscille sur une pente [LEV 2007]

Il existe d'autres algorithmes basés sur ces méthodes (la recherche avec tabous, la recherche à voisinage variable, la méthode GRASP ou les méthodes de bruitage) qui utilisent des principes proches de ceux décrits ci-dessus.

D'autres algorithmes ont été développés en se basant sur les observations du monde du vivant. L'optimisation par essaims particulaires est basée sur un modèle développé par les biologistes permettant de simuler le déplacement d'un groupe d'oiseaux. Cet algorithme s'appuie sur des concepts d'autorégulation tout comme l'algorithme de colonies de fourmis. Les algorithmes évolutionnistes quant à eux sont basés sur les mécanismes de sélection naturelle découverts par Charles Darwin. Ces mécanismes permettent l'apparition de nouvelles espèces mieux adaptées au milieu dans lequel elles évoluent. Les exemples les plus courants d'algorithmes évolutionnistes sont l'algorithme génétique et l'évolution différentielle.

Sathiya et al. [SAT 2009] ont travaillé sur l'optimisation des paramètres du soudage par friction en utilisant trois méthodes d'optimisation différentes : le recuit simulé, l'optimisation par essaims particulaires et l'optimisation par algorithme

génétique. Leurs travaux ont montré que l'algorithme génétique donne les meilleurs résultats. De plus, d'après Dréo et al. [DRE 2005], les algorithmes évolutionnaires sont bien adaptés lorsqu'il y a présence de plusieurs optima et permettent de fournir un échantillon de solutions de compromis lors de la résolution de problèmes comportant plusieurs objectifs, éventuellement contradictoires.

Etant donné la complexité du système étudié, et le fait que les objectifs recherchés soient contradictoires (réduction du volume d'acier de l'assemblage et maximisation des caractéristiques mécaniques du système), il est choisi d'employer un algorithme évolutionniste pour trouver un ou plusieurs assemblages précontraints optimaux pour un chaume de bambou donné. Le paragraphe suivant décrit donc de manière plus approfondie ces algorithmes.

1.3.2. Principe de fonctionnement des algorithmes évolutionnistes

Il existe deux types principaux d'algorithmes évolutionnistes : les algorithmes génétiques et les algorithmes à évolution différentielle. Le principe de fonctionnement de ces deux algorithmes est le même aussi ils sont décrits ci-dessous en parallèle.

Avant de décrire le principe de fonctionnement des algorithmes évolutionnistes, il est nécessaire de définir un certain nombre de termes. Chaque paramètre d'entrée est défini sur une certaine plage de données. Un jeu de paramètres d'entrée constitue une combinaison d'entrée. La fonction (définie par le RNA pour l'exemple étudié) donne pour une combinaison d'entrée une combinaison de sortie. A partir de cette combinaison de sortie, une fonction objectif est définie par combinaison linéaire des paramètres de sortie : la fonction objectif peut donc être directement définie par les paramètres d'entrée. Pour les algorithmes évolutionnistes, une combinaison d'entrée est appelée **individu**. Un individu est constitué de plusieurs paramètres d'entrée appelés **gènes**. Chaque individu possède le même nombre de gènes noté n .

La principale différence entre l'algorithme génétique et celui d'évolution différentielle réside dans la manière de coder les individus. Dans le cas de l'algorithme génétique, les individus sont la plupart du temps codés en binaire (il est possible également de les coder en décimale ou analogique) c'est-à-dire en la succession de bits (de valeur 0 ou 1) ce qui permet de coder tout type d'objets (réels, entiers, booléens ou chaînes de caractères) et d'en faciliter leur manipulation. La figure 200 représente le chromosome d'un individu (un chromosome par individu) à quatre gènes codés en binaire. Dans le cas d'un algorithme d'évolution différentielle en revanche, les individus ne sont pas codés et sont manipulés tel quel ce qui rend leur manipulation plus délicate mais évite les étapes de codage-décodage.

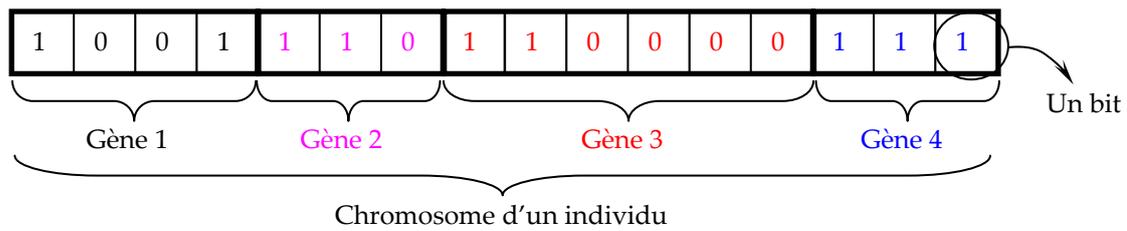


Figure 200 : Représentation binaire d'un individu à quatre gènes pour une optimisation par un algorithme génétique

La première étape des algorithmes évolutionnistes est une étape d'initialisation. Il s'agit de créer au hasard une population initiale de p individus dans le domaine de validité de leurs gènes. Le nombre d'individus p est déterminé par l'utilisateur. D'après Levasseur [LEV 2007], cette variable est le paramètre de contrôle majeur de l'algorithme. Si la taille de la population est trop petite, l'algorithme converge prématurément avant d'identifier l'optimum. Si la taille de la population est trop grande, la solution optimale identifiée est meilleure mais le temps de calcul est beaucoup plus long. Cette population créée au hasard constitue la génération $g = 1$. Pour un individu $n^\circ i$, de génération g , il est possible de définir n gènes : le gène $n^\circ j$ de cet individu est noté $x_{i,j}^g$. Chaque individu possède des gènes à partir desquels il est possible de calculer la fonction objectif notée $f(x_{i,1}^g, x_{i,2}^g, \dots, x_{i,n}^g)$. A partir de cette fonction objectif, il est possible de définir la performance de l'individu qui mesure son degré d'**adaptation** à l'objectif visé. Dans le cas où la fonction objectif veut être maximisée, l'individu $n^\circ i$ est d'autant plus performant que la valeur de la fonction objectif $f(x_{i,1}^g, x_{i,2}^g, \dots, x_{i,n}^g)$ est plus grande.

Un algorithme évolutionniste consiste à faire évoluer progressivement par générations successives, la composition de la population en maintenant sa taille constante. Le point remarquable de ce type d'algorithme par rapport au recuit simulé est que l'évolution ne se fait pas sur un seul individu mais sur une population constituée de plusieurs individus. Au fur et à mesure des générations, l'objectif est d'améliorer globalement la performance des individus en respectant les deux mécanismes de l'évolution des êtres vivants selon la théorie de Darwin [DRE 2005]. Le premier mécanisme est la **sélection** qui favorise la reproduction et la survie des individus les plus performants. Le second est la **reproduction** qui permet le brassage et la mutation des gènes des parents pour former des descendants aux performances nouvelles.

D'après Dréo et al. [DRE 2005], le passage d'une génération à la suivante peut se découper en quatre phases : une phase de sélection, une phase de reproduction (divisée en une opération de croisement et une opération de mutation), une phase d'évaluation des performances et une phase de remplacement. Ces quatre étapes se retrouvent sur l'organigramme de l'algorithme génétique proposé par Bourazza [BOU 2006] reproduit sur la figure 201. Pour l'algorithme de l'évolution différentielle, les phases de croisement et de mutations sont inversées.

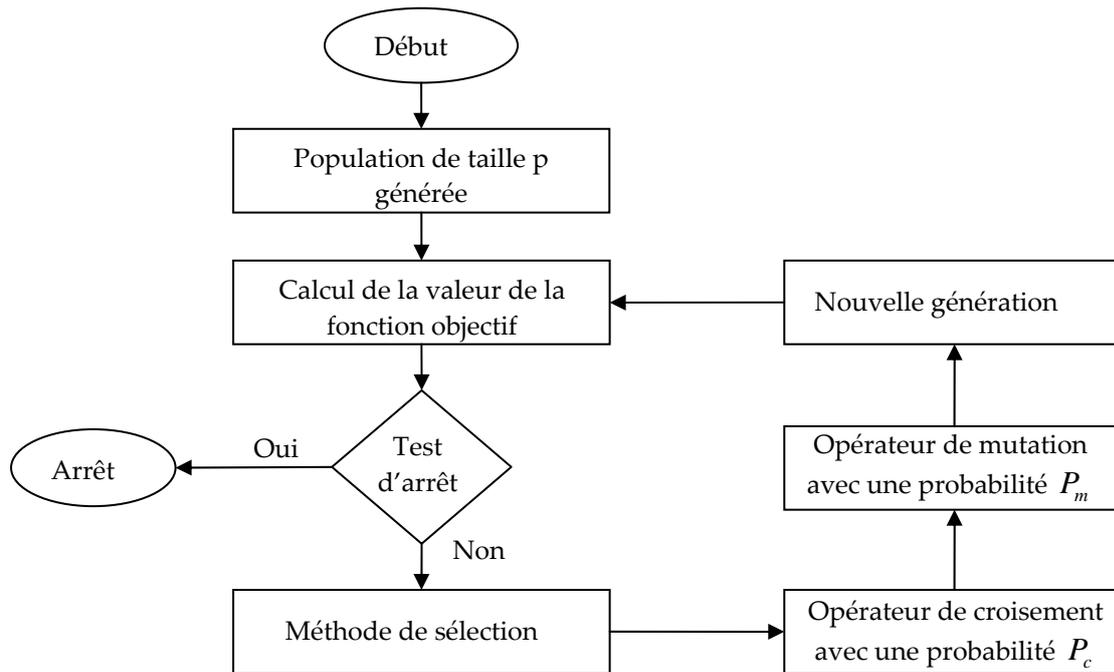


Figure 201 : Organigramme de l'algorithme génétique (d'après [BOU 2006])

La sélection des éléments de la population consiste à repérer les éléments susceptibles d'être croisés. En règle générale, ce sont les éléments qui possèdent le plus grand potentiel vis-à-vis de la fonction objectif. Certains algorithmes d'optimisation utilisent une sélection aléatoire. Les individus sélectionnés sont appelés **individus parents**.

A partir des individus parents, des **individus enfants** sont formés lors de la phase de reproduction. Cette phase se divise en une opération de croisement et une opération de mutation (l'ordre de ces deux opérations varie selon l'algorithme considéré).

Le but de l'opération de croisement est de mélanger les gènes des populations parents pour créer une population enfant plus riche. Pour se faire une probabilité de croisement P_c est définie par l'utilisateur. Un nombre aléatoire est tiré et si ce nombre est inférieur à P_c alors le croisement entre deux individus parents sélectionnés lors de la phase de sélection est réalisé.

Le but de l'opération de mutation est de permettre à l'algorithme d'explorer la plupart des points du domaine et donc d'éviter les optimaux locaux. Cette opération, réalisée avec une probabilité P_m réside dans le changement d'un ou d'une partie de gène d'un chromosome.

Etant donné que les individus ne sont pas codés de la même manière suivant que l'algorithme choisi soit un algorithme génétique ou d'évolution différentielle, le mode opératoire pour ces deux opérations de la phase de reproduction est différent.

Pour les algorithmes génétiques, il existe plusieurs façons de réaliser l'opération de croisement est la plus élémentaire est celle mettant en jeu des opérateurs à un point. Dans ce cas, les chromosomes des individus parents sont séparés en deux de manière aléatoire sans tenir compte des gènes. Le premier enfant sera alors constitué en partie des gènes du premier parent (jusqu'au point de croisement) et en partie des gènes du deuxième parent (à partir du point de croisement). Le deuxième enfant est quant à lui construit de la même manière avec les parties restantes des gènes parentaux. Cette opération de croisement à un point élémentaire est représentée sur la figure 202. D'autres opérateurs ont été développés et sont parfois beaucoup plus complexes mais le principe de base reste le même.

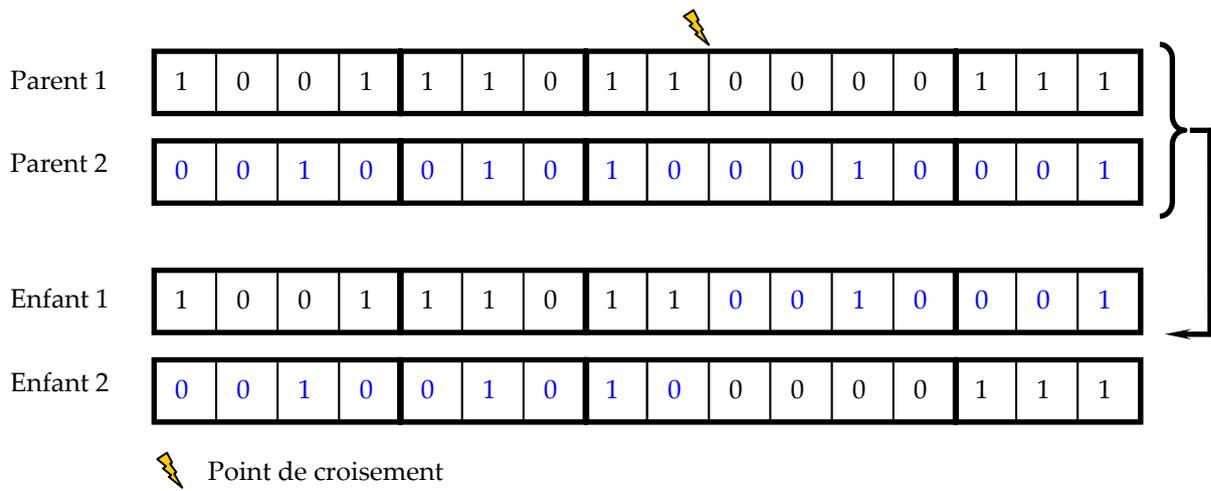


Figure 202 : Opérateur de croisement à un point dans le cas d'un algorithme génétique (d'après [BOU 2006])

Pour les algorithmes génétiques, les chromosomes des individus étant codés sous la forme d'un mot numérique constitué d'une succession de bits de valeur 0 ou 1, la mutation consiste juste à changer un bit ou plusieurs bits de 0 vers 1 et vis versa (Figure 203).

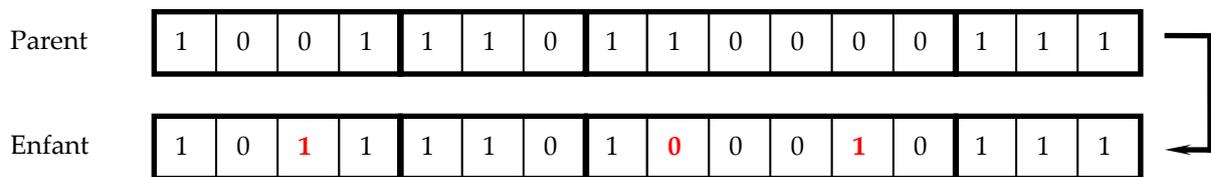


Figure 203 : Opérateur de mutation dans le cas d'un algorithme génétique (d'après [BOU 2006])

Pour les algorithmes d'évolution différentielle, la première opération de la phase de reproduction est l'opération de mutation. Dans ce cas, l'opérateur définit un paramètre η qui gère la vitesse d'évolution de la population. Ce coefficient est un réel défini positif le plus souvent pris supérieur à 1 de façon à diminuer le temps de calcul. Trois individus sont tirés au hasard de la population initiale. Ils sont numérotés respectivement r_0 , r_1 et r_2 . Le gène mutant à la génération g issu de ces trois gènes est noté $m_{i,j}^g$ et se calcule par la formule :

$$m_{i,j}^g = x_{r0,j}^g + \eta(x_{r1,j}^g - x_{r2,j}^g).$$

Pour les algorithmes d'évolution différentielle, l'opération de croisement se passe entre un individu initial et un mutant (tous les deux ayant les mêmes indices). Pour chaque gène, l'algorithme vérifie si l'opération de croisement doit avoir lieu (ceci se fait de manière aléatoire par l'utilisation de la probabilité de croisement P_c). Si l'opération de croisement doit avoir lieu, le gène de l'individu enfant est le gène mutant, sinon c'est le gène du parent. La figure 204 résume la phase de reproduction dans le cas des algorithmes d'évolution différentielle.

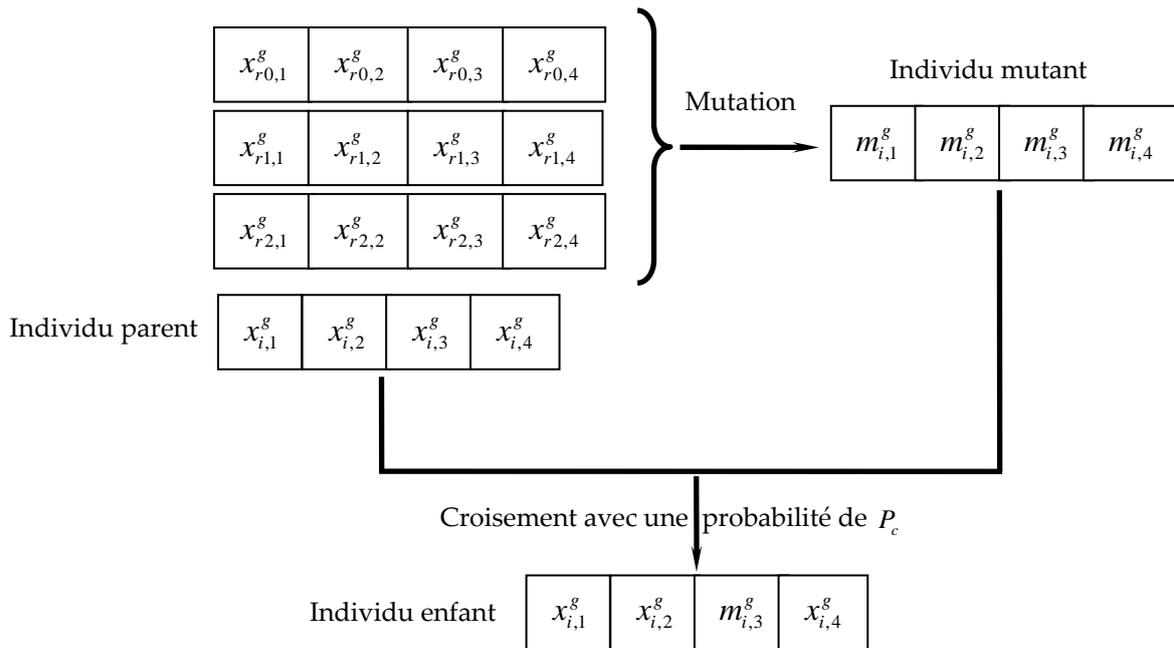


Figure 204 : Opération de mutation et de croisement dans le cas des algorithmes d'évolution différentielle : exemple d'un individu à quatre gènes à la génération g

Quel que soit l'algorithme évolutionniste choisi, l'étape d'évaluation des performances consiste à vérifier pour chaque individu issu de la population enfant si la fonction objectif s'est améliorée par rapport à l'individu de même rang issu de la population initiale. Si la fonction objectif doit être maximisée, l'individu enfant a des performances meilleures que celles de l'individu parent si sa fonction objectif est supérieure.

L'étape de remplacement consiste à remplacer ou pas l'individu parent par l'individu enfant. Dans la plupart des cas, si la solution est améliorée, l'individu enfant remplace l'individu parent. Il est également possible que la totalité de la population parent soit remplacée par la population enfant. Cette phase de remplacement permet de réaliser les individus parents de la génération $g + 1$.

Les algorithmes évolutionnistes sont interrompus après un certain nombre de génération, selon un critère d'arrêt à préciser.

D'après Price et al. [PRI 2005], les algorithmes d'évolution différentielle, sont des algorithmes évolutionnistes plus adaptés aux problèmes d'optimisation continus que les algorithmes génétiques. Dans l'exemple à optimiser, la fonction donnée par le RNA est continue : un algorithme évolutionniste est donc choisi pour réaliser l'optimisation de la fonction continue issue du RNA interpolant les résultats issus de la modélisation par éléments d'un assemblage précontraint appliqué à un chaume de bambou. De plus, pour l'optimisation des assemblages par tourillons, Barthram [BAR 2009] a utilisé cet algorithme ce qui lui a donné des résultats satisfaisants. L'algorithme d'évolution différentielle utilisé est présenté en Annexe 4.

1.3.3. Optimisation de l'assemblage précontraint pour les chaumes de bambou

Il est utile de rappeler que l'objectif ici est de trouver le minimum de la fonction objectif issue du RNA décrit au paragraphe 1.2.2 de ce chapitre. La fonction objectif est une combinaison linéaire du vecteur résultats issus du RNA pour un vecteur de valeur d'entrées défini. Le but étant de diminuer la surface projetée du cône extérieur, de maximiser la force dans le cône intérieur et de minimiser la variation de contrainte de Von Mises dans le cône extérieur, la fonction objectif prend la forme suivante :

$$f_{Obj} = \alpha S_{CE} - \beta F_{CI} + \gamma \Delta\sigma_{CE}$$

- avec f_{Obj} Fonction objectif à minimiser
 S_{CE} Surface projetée du cône extérieur
 F_{CI} Force maximale dans le cône intérieur
 $\Delta\sigma_{CE}$ Variation de la contrainte de Von Mises dans le cône extérieur
 α Coefficient strictement supérieur à 0 permettant de pondérer S_{CE}
 β Coefficient strictement supérieur à 0 permettant de pondérer F_{CI}
 γ Coefficient strictement supérieur à 0 permettant de pondérer $\Delta\sigma_{CE}$.

Les paramètres entrés dans l'algorithme d'évolution différentielle sont résumés dans le tableau 16. Le nombre d'individus de la population est un paramètre crucial [LEV 2007]. Price et al. [PRI 2005] préconisent d'utiliser dix fois le nombre de paramètres à optimiser (nombre de gènes) soit pour l'exemple choisi $4 \times 10 = 40$ individus. Enfin, les autres paramètres sont déterminés à partir des travaux de Barthram [BAR 2009].

Paramètre	Notation	Valeur
Nombre d'individus de la population	p	40
Paramètre gérant la vitesse d'évolution de la population	η	0,2
Nombre de générations maximum (critère d'arrêt de l'algorithme)	g_{max}	1000

Tableau 16 : Paramètres gérant l'algorithme d'évolution différentielle utilisé pour l'optimisation du système

A partir de ces paramètres, trois optimisations sont réalisées en faisant varier les coefficients α , β et γ de l'interpolation linéaire formant la fonction objectif. Chaque optimisation donne un vecteur d'entrée optimal et le RNA donne le vecteur résultat interpolé pour cette combinaison d'entrée. Le vecteur résultats issu du RNA est confronté aux résultats issus du MEF (avec les paramètres d'entrée optimisés). Les valeurs des coefficients α , β et γ et les valeurs des vecteurs d'entrées optimaux pour les trois optimisations réalisées sont résumées dans le tableau 17.

	α	β	γ	Lg _{CI} (mm)	α (°)	Ep _{CEBas} (mm)	Ep _{CEHaut} (mm)
Optim 1	1	1	1	194,76	3,00	1,00	8,03
Optim 2	1	2	1	199,99	3,00	2,28	13,83
Optim 3	1,1	1	1	130,43	3,00	1,00	7,46

Tableau 17 : Valeurs des coefficients de la fonction objectif et de la géométrie des assemblages optimaux pour les trois optimisations réalisées

Pour l'optimisation n°1, les trois coefficients sont pris égaux à 1 : il n'y a pas de paramètre favorisé par rapport aux autres. Pour l'optimisation n°2, en revanche, le paramètre force est favorisé par rapport aux deux autres par un coefficient 2 : ce modèle permet d'améliorer les performances mécaniques de l'assemblage au détriment de son coût matière. Enfin, la troisième optimisation favorise le paramètre surface projetée par un coefficient 1,1 : ce modèle favorise donc le coût matière au détriment des propriétés mécaniques. Le tableau 18 résume les résultats obtenus par le RNA et le MEF pour les trois optimisations.

	α	β	γ	S_{CE} (mm ²)			F_{CI} (kN)			$\Delta\sigma_{CE}$ (MPa)		
				RNA	Calcul analytique	Ecart	RNA	MEF	Ecart	RNA	MEF	Ecart
Optim 1	1	1	1	1118,8	1037,6	7,3%	142,0	151,0	6,4%	191,34	222,70	16,4%
Optim 2	1	2	1	2042,3	1892,6	7,3%	157,2	155,7	0,9%	158,6	140,4	11,5%
Optim 3	1,1	1	1	469,4	699,9	49,1%	102,1	112,0	9,7%	181,3	220,5	21,6%

Tableau 18 : Comparaison entre les données trouvées par RNA et par MEF pour les trois optimisations réalisées sur l'assemblage précontraint pour un chaume de bambou

Pour les deux premières optimisations l'écart entre le RNA et le MEF (ou le calcul analytique pour S_{CE}) est plutôt faible : il est en moyenne de 10,0% pour la première optimisation et de 6,6% pour la deuxième. En revanche, cet écart est plus important pour la troisième optimisation (26,8%). Aussi, seuls les résultats issus du MEF seront comparés dans la suite de ce paragraphe.

La première remarque à faire est que l'angle de l'assemblage optimum pour les trois fonctions objectif est de 3°. De plus, pour avoir les meilleures performances mécaniques possibles, la longueur du cône intérieur doit être proche de 200 mm qui est la borne supérieure de ce paramètre.

Le fait de doubler l'influence de la force sur la fonction objectif provoque une augmentation de 3% de la force maximale dans le cône intérieur (pour un même

déplacement de 22 mm) et une augmentation de 45 % de la surface projetée et donc du volume du cône extérieur. De plus en multipliant par 1,1 le paramètre lié à la surface projetée du cône extérieur, ce dernier voit son volume diminué de 58% pour une diminution de la force maximale dans le cône intérieur de 26%. Ainsi, l'évolution des performances mécaniques de l'assemblage et de son coût matière n'est pas linéaire. La figure 205 illustre ce phénomène : pour une faible augmentation des propriétés mécaniques du système, son coût matière augmente très rapidement. Ceci s'explique par le fait que le cône extérieur entre en plastification si la force de précontrainte est trop importante et qu'il n'y a pas assez de volume d'acier.

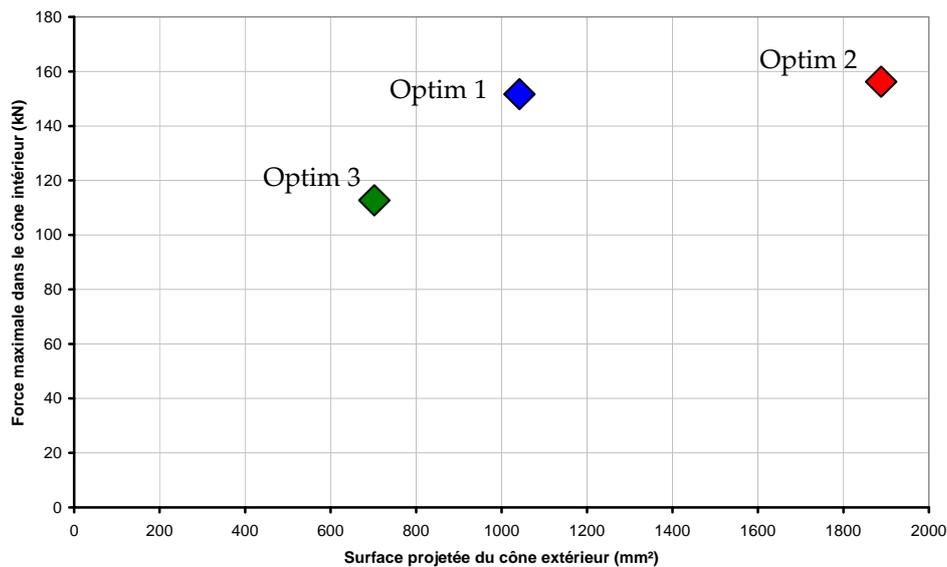


Figure 205 : Evolution des performances mécaniques de l'assemblage précontraint pour un chaume de bambou (calculé comme la force maximale dans le cône intérieur pour un déplacement de ce dernier de 22 mm) en fonction de son coût matière (calculé comme la surface projetée du cône intérieur)

La figure 206 représente le comportement de l'assemblage précontraint à optimiser dans différents cas. Les courbes en trait fin représentent le comportement de quelques combinaisons d'entrées ayant servi à alimenter le RNA. Suivant l'angle de l'assemblage et la longueur du cône intérieur, 12 lots de 16 assemblages peuvent être réalisés et seules les courbes extrêmes de ces lots sont représentées. Par-dessus ces courbes sont ajoutées les courbes de comportement des trois modèles optimisés. Cette figure montre bien que le fait d'augmenter l'influence de la force (Optim 2) n'apporte presque rien d'un point de vue mécanique. En revanche pour la courbe issue de la troisième optimisation, le comportement mécanique est dégradé de manière plus importante.

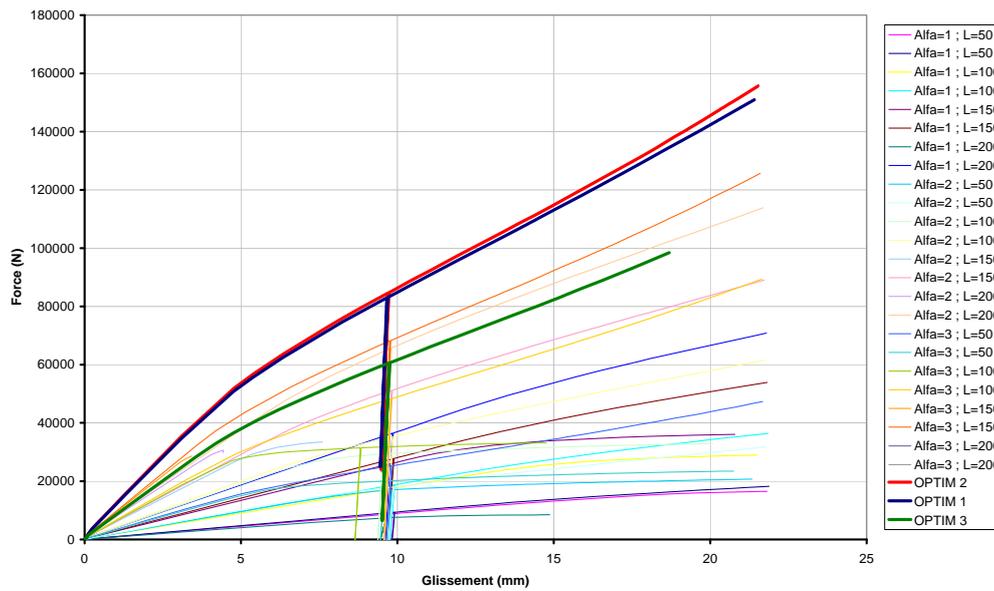


Figure 206 : Comparaison entre les lois de comportement issu du MEF pour les systèmes ayant servi à alimenter le RNA et les trois systèmes optimisés (Alfa=angle de l'assemblage et L=longueur du cône intérieur)

La géométrie des trois assemblages issus de l'optimisation est comparée sur la figure 207.

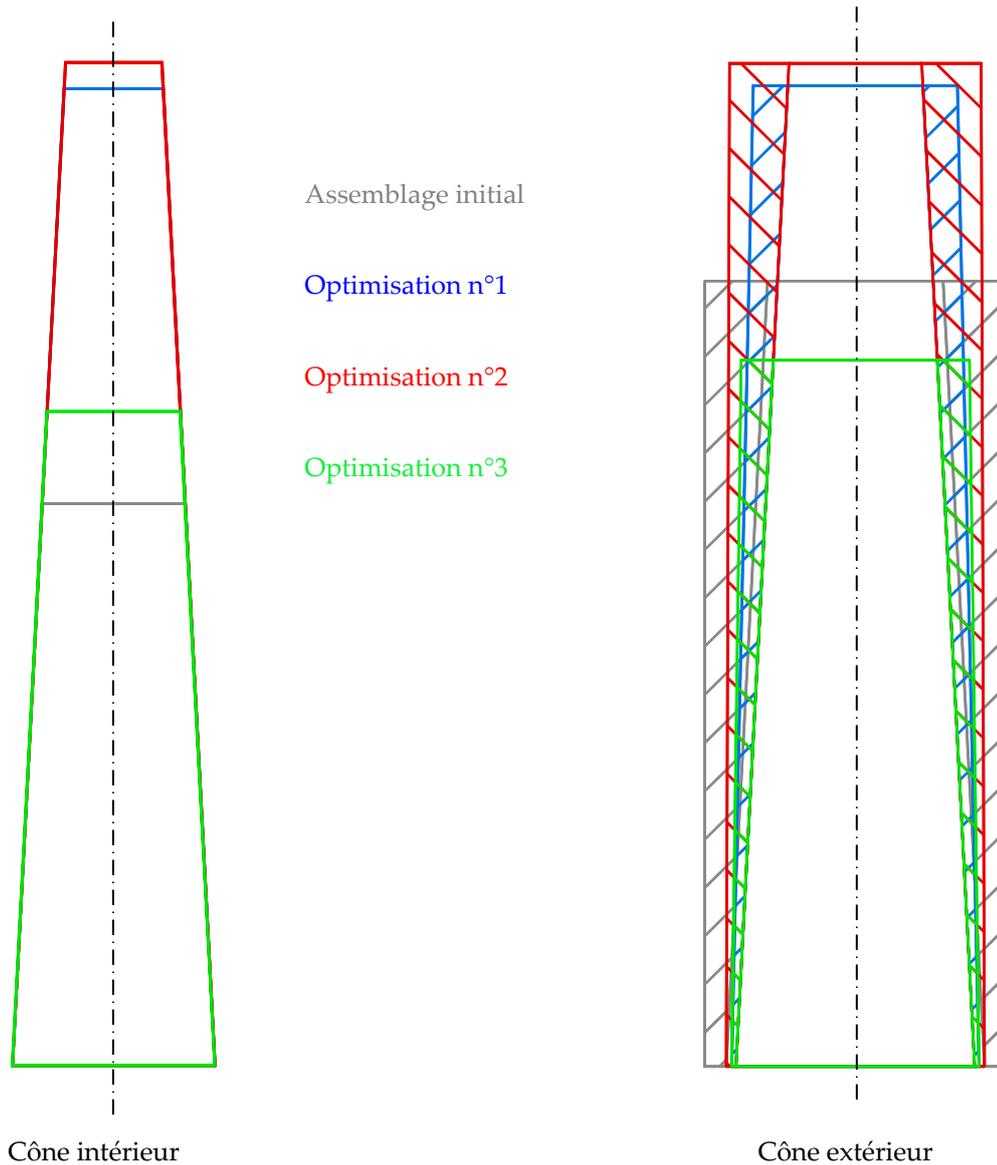


Figure 207 : Comparaison des coupes longitudinales des coins intérieurs et extérieurs des trois assemblages optimisés et de l'assemblage initial

Enfin, la contrainte de Von Mises dans le coin extérieur peut être mesurée (Figure 208). Il apparaît que dans le cas de la première optimisation, le cône extérieur subit une plastification sur 50 mm environ et pour la troisième optimisation sur 25 mm. Dans les trois cas, il existe une zone à l'entrée de l'assemblage (surface hachurée sur la figure 208) où la contrainte est faible. La contrainte est maximale à environ 25 mm de l'entrée de l'assemblage et sur le reste de sa longueur, la contrainte diminue.

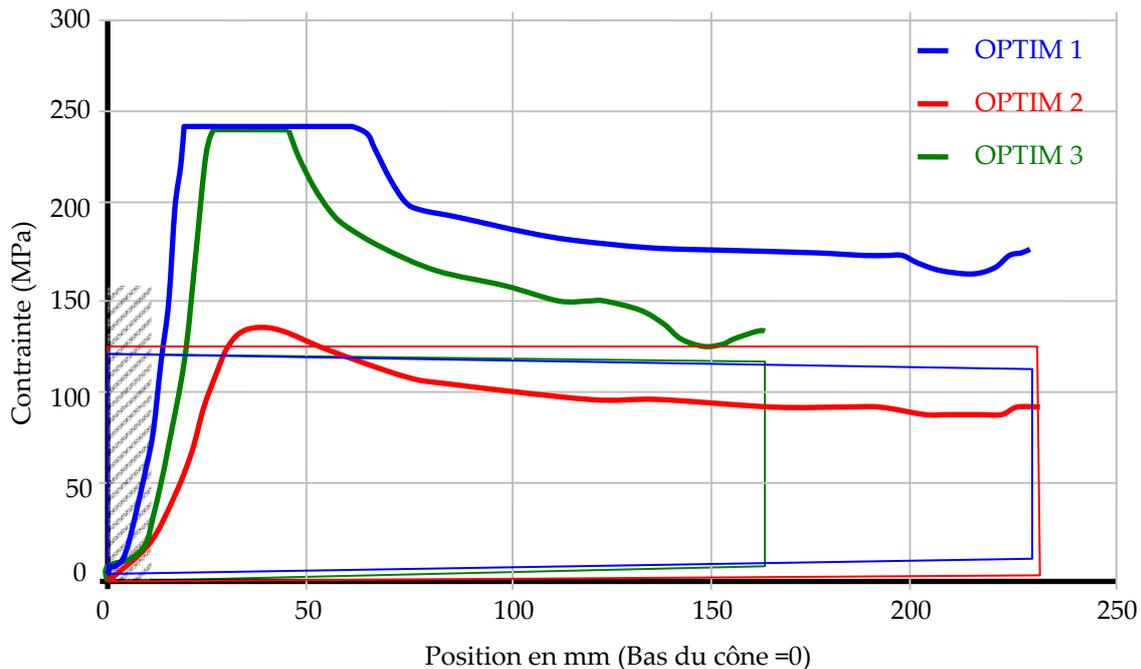


Figure 208 : Evolution de la contrainte de Von Mises sur la hauteur du cône extérieur des assemblages précontraints optimisés pour un chaume de bambou

L'assemblage issu de l'optimisation n°1 possède une longue distance où l'acier est plastifié. Ceci est dû au fait que le cône intérieur est long ce qui augmente la surface de contact avec le bambou et donc permet le passage de beaucoup d'effort du cône vers le bambou ce qui entraîne l'apparition d'une force de précontrainte importante (renforcée par l'angle important de 3°) qui doit être équilibrée par la résistance du cône extérieur. Ce dernier est donc fortement sollicité. Comme dans l'optimisation n°1, la fonction objectif est autant optimisée d'un point de vue performances mécaniques et volume de matière, ce dernier est minimisé ce qui explique la forte zone plastifiée. Dans le cas de l'optimisation n°2, en revanche, l'optimisation est plus axée sur les performances mécaniques : le cône extérieur est donc plus volumineux et donc moins sollicité. Pour l'assemblage optimisé n°3, la longueur du cône intérieur est plus courte donc permet de transférer moins d'efforts vers le bambou (surface de contact plus faible) et donc transmet moins d'efforts de compression vers le bambou (par rapport aux deux autres assemblages optimisés). Cependant, comme l'optimisation est plus basée sur la diminution du volume de matière, le cône extérieur est peu épais et donc plastifié sur une certaine longueur.

1.3.4. Perspectives et conclusion sur les assemblages précontraints pour les chaumes de bambou

La démarche d'optimisation présentée ci-dessus donne plusieurs géométries utilisables industriellement mais présente surtout une méthode qui pourrait apporter une réponse à une problématique industrielle précise. De plus, le réseau de neurones réalisé permet de connaître l'assemblage à réaliser pour une performance mécanique donnée. Cependant, le travail est loin d'être terminé et l'optimisation des assemblages précontraints pour les chaumes de bambou doit encore être améliorée.

En effet, l'aspect viscoplastique du matériau bambou n'a pas été traité et pris en compte dans le modèle éléments finis. Cet aspect est primordial et demanderait des investigations plus poussées. De plus, le comportement en compression transversale du bambou doit être déterminé par un procédé plus précis pour être entré comme loi précise dans le MEF.

L'apprentissage du RNA n'est pas parfait et demanderait de lui fournir plus de données d'entrées notamment avec des angles intermédiaires. Il serait envisageable de se servir directement du MEF pour trouver l'optimum de l'assemblage par un algorithme évolutionniste. Dans ce cas, le RNA est remplacé par le MEF qui donne en temps réel la fonction objectif pour un vecteur d'entrée donné. Cette élaboration serait plus précise car elle éviterait la phase d'approximation liée au RNA mais demanderait un temps de calcul beaucoup plus long et sous-entend que le MEF converge à chaque vecteur d'entrée.

Enfin, il est possible d'imaginer de changer la géométrie du cône extérieur. Par exemple, il est envisageable de la réduire en longueur au niveau de l'entrée de l'assemblage. Il serait également envisageable de ne pas mettre un cône en entier mais une succession de plusieurs cerces parallèles.

2. AMELIORATION DE L'ASSEMBLAGE POUR LES AVIVES DE BOIS

La phase d'optimisation de l'assemblage pour le bambou a été possible pour deux raisons. Tout d'abord, il n'y a pas eu au cours des essais décrits au Chapitre 1 l'apparition d'efforts parasites provoquant la ruine prématurée de l'assemblage. Ceci n'est pas le cas pour les assemblages précontraints pour les avivés de bois. De plus, pour les tiges de bambous, la géométrie de l'assemblage est complètement définie par la forme même des chaumes. Pour le bois en revanche, cette phase d'optimisation nécessiterait un travail autour d'un assemblage répondant à un problème précis : ce travail ne peut donc être réalisé qu'en partenariat avec un industriel.

Un travail d'amélioration de la réponse mécanique de l'assemblage précontraint pour le matériau bois a néanmoins été réalisé. Deux pistes sont proposées : l'utilisation d'un nouveau matériau à base de bois plus résistant et la conception d'un nouvel assemblage tentant de diminuer les efforts parasites mis en évidence aux chapitres précédents.

2.1. Essais sur un nouveau matériau : le LVL

Le matériau composite bois utilisé pour améliorer la réponse mécanique de l'assemblage précontraint et repousser l'apparition de ruptures dues à des efforts parasites est le Lamibois ou LVL (Laminated Veneers Lumber). Il s'agit d'un matériau composé de placages en bois avec le fil de bois majoritairement orientés dans la même direction [AFN 2005]. Le LVL utilisé lors de ces essais a été fourni par l'entreprise Finforest ; il s'agit de Kerto S[®] réalisé à base d'Epicéa du Nord très dense avec des épaisseurs de cernes d'environ 1 mm et dont toutes les lamelles sont orientées dans la même direction. Ce matériau est fortement orthotrope et un avivé en Kerto S[®] possède une épaisseur 100% radiale et une largeur 100% tangentielle comme le montre la figure 209. La masse volumique moyenne de ce matériau est de 510 kg/m³.

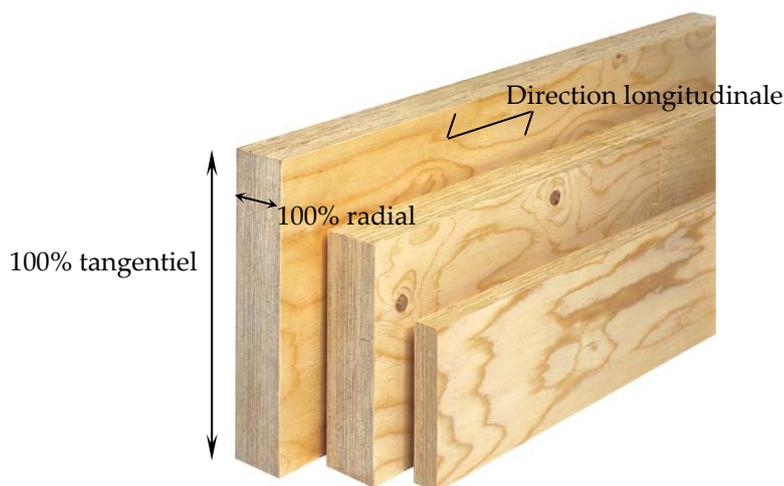


Figure 209 : Directions principales d'un avivé en Kerto S[®]

L'utilisation de ce matériau est justifiée par ses caractéristiques mécaniques en comparaison avec celles du bois massif. En effet, la lamellation du matériau bois permet de diviser les défauts comme des nœuds en petits morceaux répartis dans l'épaisseur de l'avivé : ces défauts deviennent si petits et le nombre de placages si grands qu'ils deviennent pratiquement sans influence. Ce phénomène a deux conséquences : l'amélioration des caractéristiques mécaniques du matériau qui se rapprochent de celles du bois sans défaut et le resserrement des courbes de distribution de rupture. Ainsi, en comparant les valeurs caractéristiques d'un bois massif de résineux de classe C22 (classement d'après la norme EN 338-2003 [AFN 2003]) à celles du Kerto S® (valeurs de la norme EN 14374-2004 [AFN 2005]), il est possible de constater une amélioration de la capacité résistante du matériau composite en traction longitudinale de 169%.

Dans un premier temps, le LVL est utilisé avec l'assemblage simple décrit au Chapitre 1. Ces essais permettent de vérifier si le fait d'utiliser un matériau aux propriétés mécaniques plus élevées et resserrées que le bois massif permet d'améliorer la résistance mécanique de l'ensemble assemblage précontraint - avivés.

Le même protocole que celui décrit pour le bois massif au Chapitre 1 est réalisé pour tester l'ensemble avivés en LVL - assemblages précontraints. La phase de densification du matériau composite s'effectue dans sa direction radiale. Un problème inattendu est survenu lors de la mise en place de la précontrainte dans l'assemblage : le LVL subit un matage très important en sortie d'assemblage. Pour expliquer ce phénomène, des essais de compression radiale du Lamibois sont réalisés en utilisant le même protocole que celui utilisé pour tester le bois en compression transversale (Figure 82). Le comportement obtenu est comparé au comportement d'un bois de 510 kg/m³ en compression transversale (comportement déterminé à partir de l'équation [4] du Chapitre 2). Cette comparaison est présentée sur la figure 210 qui montre que la limite élastique du bois en compression est plus élevée que celle du LVL utilisé. Ceci est lié au fait que ce matériau dans son épaisseur est 100% radiale ce qui n'est jamais le cas pour le bois. Or, en compression radiale, la limite élastique est plus faible qu'en compression tangentielle (ce phénomène est difficilement constatable sur le bois massif à l'échelle mésoscopique). De plus, pour le LVL, il n'y a pas de réelle limite élastique et le passage sur le plateau de densification se fait de manière progressive contrairement au bois massif.

Pour contourner ce problème de matage du matériau en sortie d'assemblage, il est choisi d'augmenter la limite élastique du LVL par densification sur une distance supérieure à la longueur de l'assemblage. Cette densification ne doit pas aller trop loin pour ne pas détériorer les caractéristiques du matériau. Ainsi, la longueur de densification de la Figure 67 est passée de 180 mm à 250 mm. Par cette action, ce problème de matage n'est plus apparu aux contraintes auxquels le matériau a été amené.

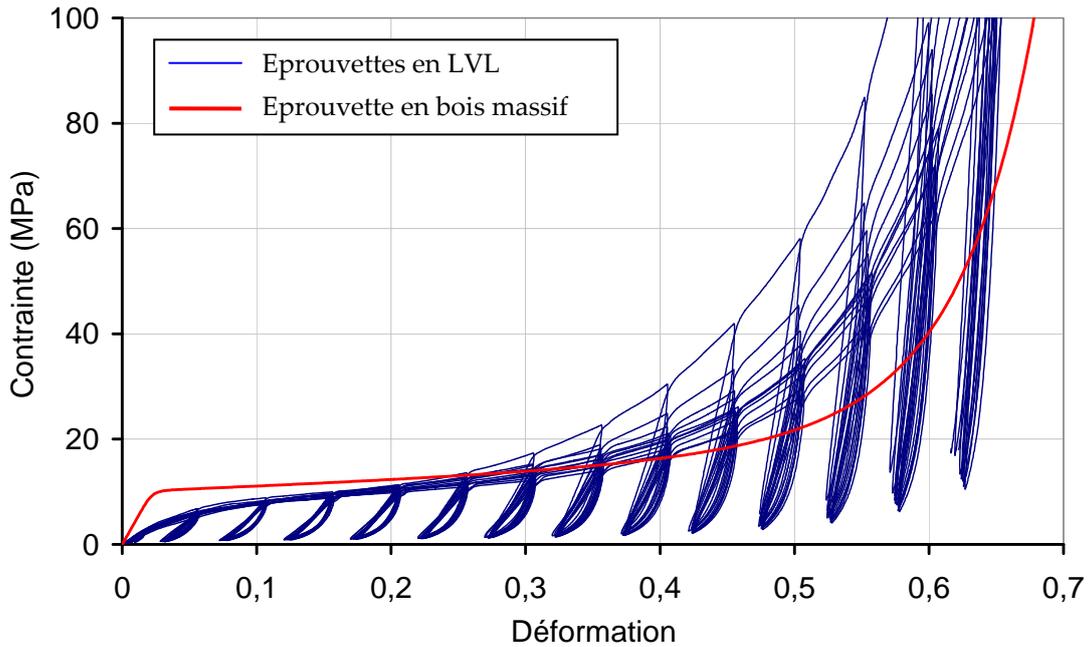


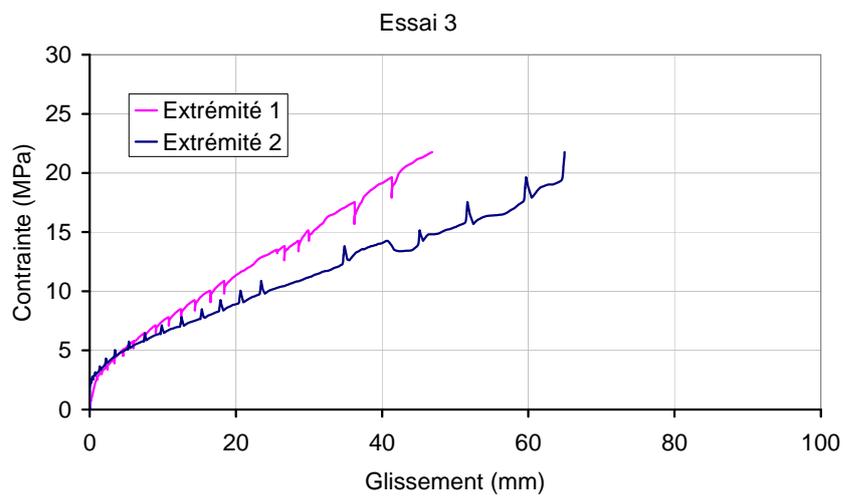
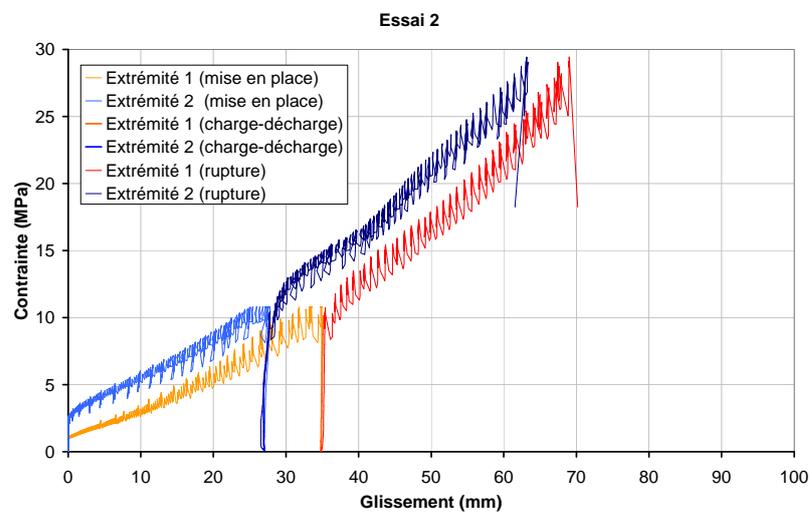
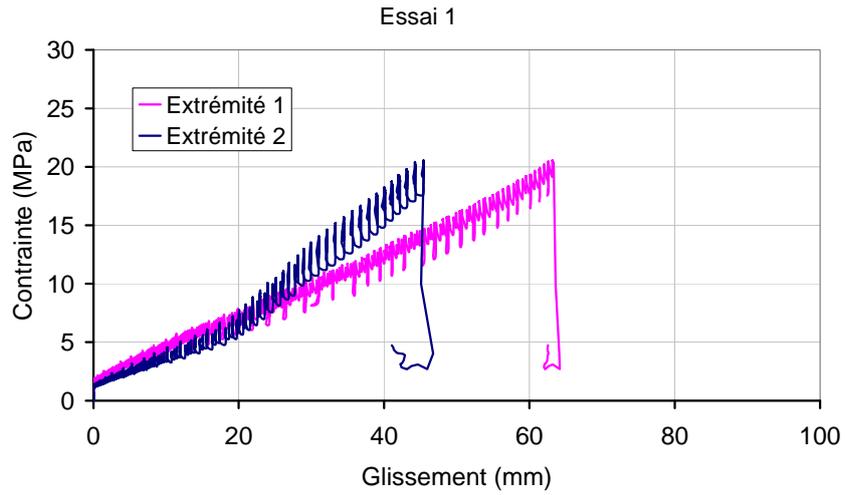
Figure 210 : Comparaison entre le comportement en compression transversale du bois massif (formule du Chapitre 2) et celui en compression radiale du LVL

Cinq essais sont réalisés sur les avivés en LVL avec le même assemblage que celui utilisé pour le bois massif. Les caractéristiques géométriques ainsi que la contrainte à rupture (calculée de la même manière que pour le bois massif) sont reportés sur le tableau 19.

N° essai	Section (mm ²)	Longueur (mm)	F _{rupt} (kN)	σ _{rupt} (MPa)	Localisation rupture
1	55x25x2	1500	56,54	20,56	LVL
2	55x25x2	1500	80,96	29,44	LVL
3	70x25x2	1500	76,18	21,77	LVL
4	70x25x2	1500	84,33	24,09	LVL
5	70x25x2	1500	104,57	29,88	LVL

Tableau 19 : Résultats obtenus pour les différents essais sur les assemblages précontraints pour le LVL (F_{rupt} : force à rupture, σ_{rupt} : contrainte à rupture)

Les courbes d'essais pour les cinq éprouvettes testées sont reportées sur la Figure 211 et les images des ruptures observées sur la figure 212.



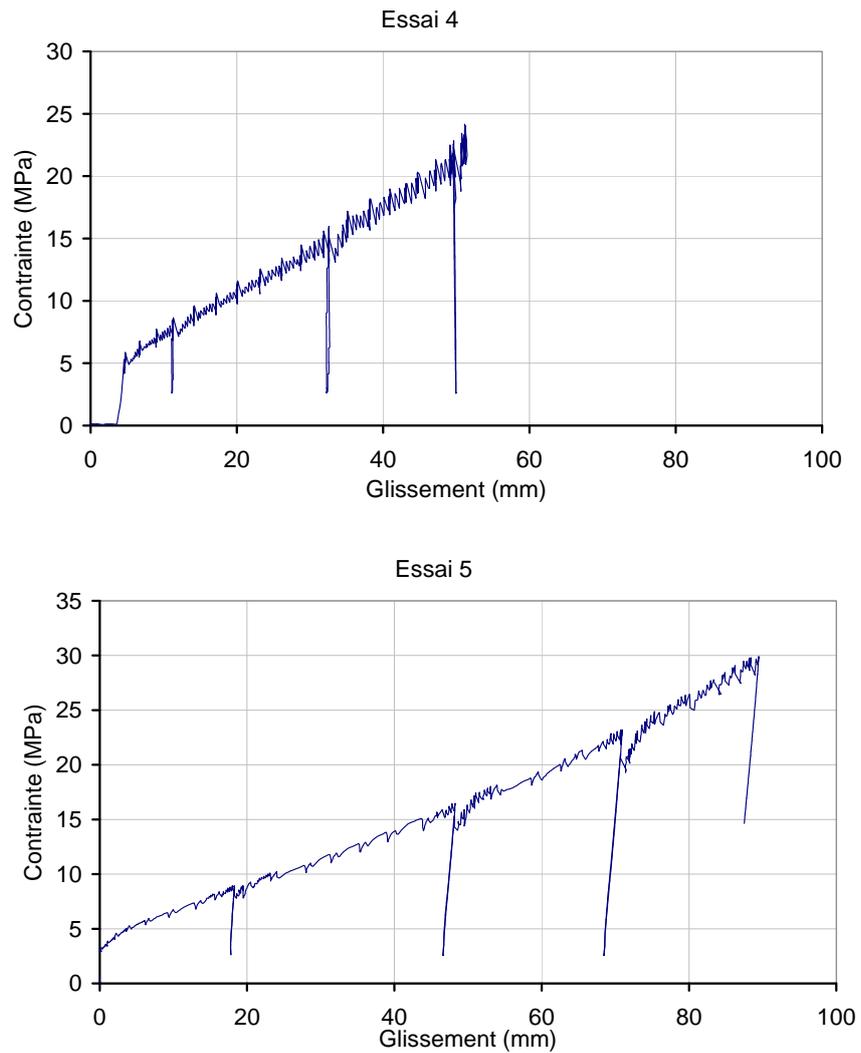


Figure 211 : Comportement des assemblages précontraints pour le LVL



Figure 212 : Ruptures observées pour les essais d'assemblages précontraints pour les avivés en LVL

Ces essais montrent que malgré les caractéristiques mécaniques intéressantes du matériau LVL par rapport au bois massif, la résistance de l'ensemble avivés en LVL – assemblages précontraints n'atteint pas des valeurs supérieures à celles

observées pour le bois. De plus, la rupture apparaît toujours à la sortie de l'assemblage, là où les efforts de traction transversale sont les plus élevés. Le Kerto S® ayant des propriétés proches du bois massif C22 en traction transversale, il semble logique que ce matériau n'apporte rien de plus que le bois massif en terme de résistance moyenne puisque ce sont les efforts parasites de cisaillement amenés par la compression transversale qui plafonnent cette résistance.

Pour aller plus loin dans l'amélioration de la résistance globale du système avivés – assemblages précontraints, il est nécessaire d'éliminer ces efforts parasites. Pour ce faire, une nouvelle géométrie d'assemblage précontraint est proposée.

2.2. Proposition d'un nouvel assemblage pour éviter l'apparition de rupture prématurée

Pour limiter l'apparition d'efforts parasites particulièrement néfastes à la résistance globale du système avivés en bois ou en LVL – assemblages précontraints, deux améliorations sont proposées. Tout d'abord, les avivés doivent sortir parallèlement du boîtier extérieur pour limiter l'apparition d'un moment de flexion lié à la courbure des avivés. De plus, il est nécessaire d'éliminer la zone B de la figure 187, où le coin intérieur est en contact avec les avivés sans que ces derniers ne soient retenus par le boîtier extérieur entraînant l'apparition d'efforts de cisaillement.

Un nouvel assemblage est donc proposé. Il est constitué d'un boîtier extérieur et de trois coins intérieurs comme l'indique la figure 213. Parmi les trois coins intérieurs, le coin nommé coin principal est le même que celui utilisé dans l'assemblage précontraint du Chapitre 1. Ce coin permet de faire transiter l'effort de traction fourni par la tige filetée à deux coins dits secondaires. Ces derniers, placés de part et d'autre du coin principal sont usinés en bois durs. Ils permettent de faire transiter l'effort de compression aux avivés en bois ou en LVL aux extrémités préalablement densifiées de la même manière que pour l'assemblage précontraint utilisé jusqu'alors. Grâce à sa forme et aux déplacements relatifs de ces trois constituants, l'ensemble des trois coins intérieurs permet d'appliquer aux deux avivés un effort de compression transversale qui augmente en même temps que l'effort de traction longitudinale (précontrainte active). L'ensemble avivés – coins intérieurs est maintenu par un boîtier extérieur dont les faces en contact avec les avivés ont un angle avec l'horizontale noté γ sur la figure 213 et qui correspond à l'angle pris par les avivés après leur phase de densification.

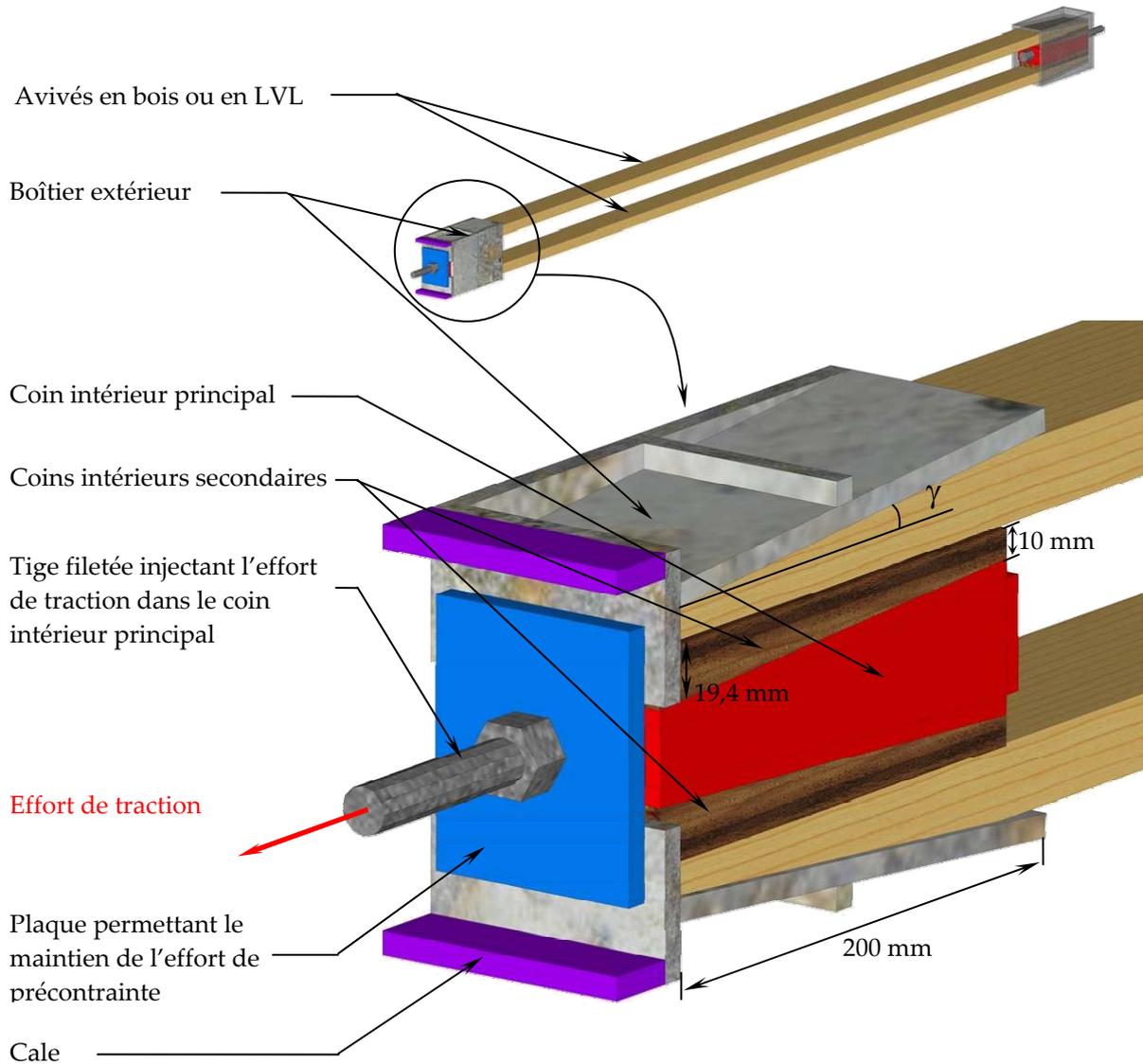


Figure 213 : Nouvel assemblage précontraint pour les avivés en bois ou en LVL

Lors de la mise en place de la précontrainte dans l'ensemble, seul le coin principal se déplace horizontalement en injectant des efforts de compression transversale aux avivés par l'intermédiaire des coins secondaires qui ne se déplacent pas horizontalement. Cet assemblage permet de faire transiter un effort de traction longitudinale vers les avivés de bois uniquement par le frottement entre les coins intérieurs secondaires et les avivés. Ces derniers sortent du boîtier extérieur sans rayon de courbure (pas de moment parasite) et il n'y a pas de zone où le coin intérieur principal est en contact avec les avivés sans que ces derniers ne soient maintenus par le boîtier extérieur.

Pour éviter que les avivés ne soient sollicités en traction lors de la mise en précontrainte de l'assemblage, le dispositif décrit sur la figure 75 est utilisé. Ce dispositif permet de précontraindre l'assemblage : les cales présentées sur la figure 213 permettent de maintenir un espace entre le bloc rigide sur lequel prend appui le

boîtier extérieur afin de permettre un serrage manuel d'un boulon sur la tige filetée pour maintenir la précontrainte.

Un essai avec cet assemblage est réalisé sur deux avivés en LVL (Kerto S®) de section 55x25 mm² chacun. Chacun des deux assemblages est précontraint à 100 kN. Une fois cette précontrainte appliquée, il est possible de constater que les avivés en LVL sont légèrement matés en compression transversale à la sortie de l'assemblage comme l'indique la figure 214. Ce matage important est préjudiciable au bon fonctionnement de l'assemblage et s'explique par la faible résistance du LVL en compression transversale malgré le fait que cette zone de densification ait été allongée.

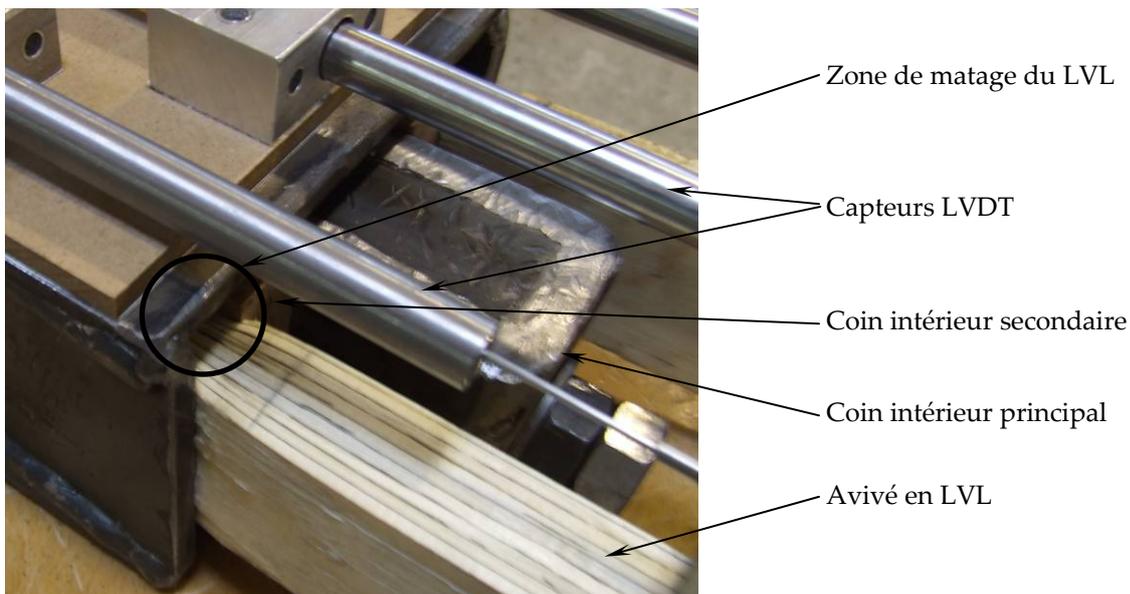


Figure 214 : Détail d'une zone d'assemblage précontrainte

L'essai, piloté en force est constitué de plusieurs cycles de charges décharges comme l'indique la figure 215. L'essai suit le même protocole que ceux réalisés lors du Chapitre 1 avec deux modes de mesure du glissement de l'assemblage : les capteurs LVDT et l'analyse d'images (système VDM) comme l'indique la figure 216.

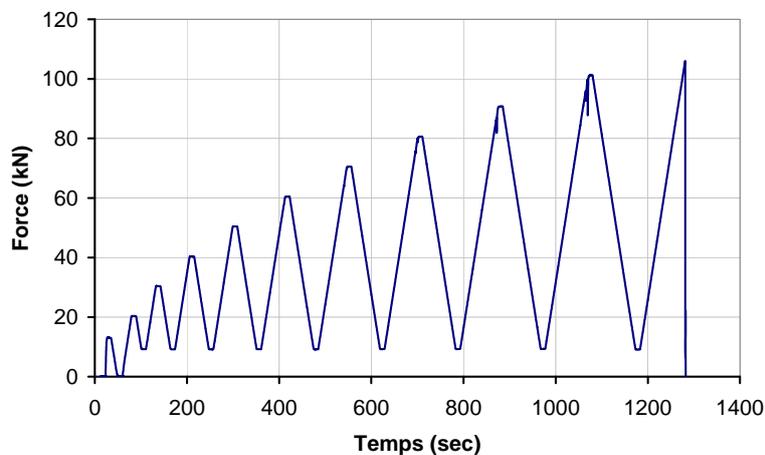


Figure 215 : Cycles de chargement imposés au système



Figure 216 : Dispositif expérimental permettant de tester l'assemblage précontraint en traction longitudinale et d'en mesurer ses glissements

Les deux modes de mesure permettent d'obtenir deux courbes mais seule celle mesurée par analyse d'images est exploitable du fait des faibles déplacements obtenus. Le comportement du nouvel assemblage précontraint est présenté sur la figure 217.

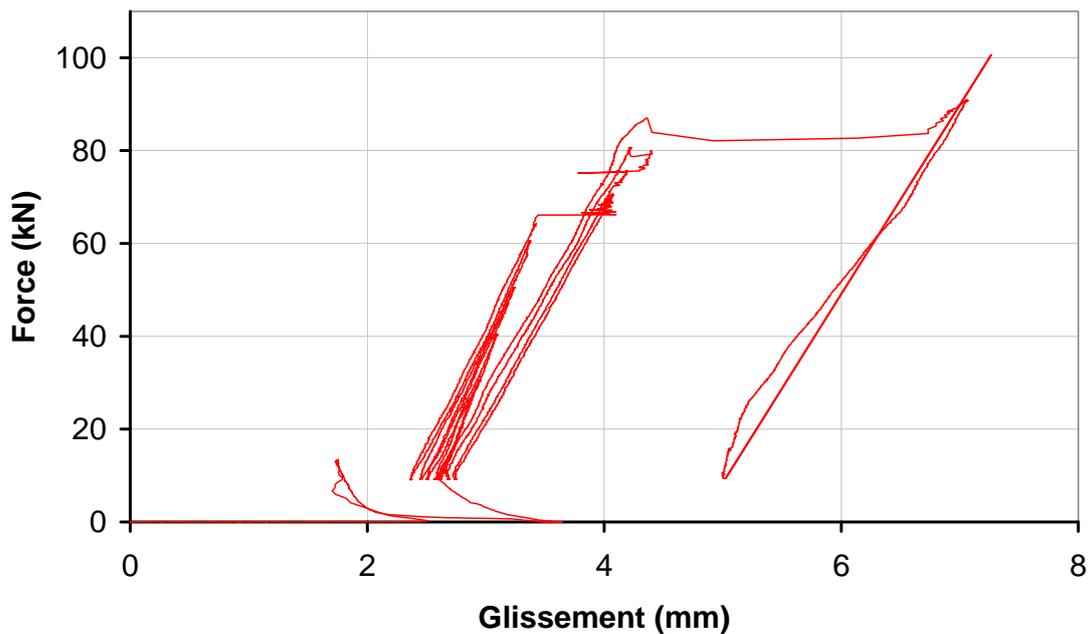


Figure 217 : Comportement du nouvel assemblage précontraint

Au début de la courbe, l'analyse d'images mesure un glissement important de l'ordre de 2,5 mm pour un effort nul. Ce phénomène s'explique par le réalignement de l'ensemble par rapport au vérin et n'est pas à considérer dans l'analyse de l'assemblage. Jusqu'à une charge de 80 kN, l'assemblage subit un glissement de 1,5 mm et a une raideur de 60 kN/mm. Autour de 90 kN, l'assemblage subit un glissement important de l'ordre de 2 mm. Ce glissement important apparaît avant la charge de 100 kN à laquelle l'assemblage a été précontraint. Ceci peut s'expliquer par le fait que la manière dont la précontrainte est pratiquée n'est pas optimale. Il serait

cependant nécessaire de s'intéresser à ce phénomène par des investigations plus poussées. Après ce glissement important, le chargement continue jusqu'à 106 kN puis c'est la rupture à la sortie de l'assemblage comme l'indique la figure 218.



Figure 218 : Mode de rupture du système nouvel assemblage précontraint – avivés en LVL

La rupture apparaît à l'endroit où la matière a subi un matage important en compression transversale (matage visible sur la figure 214) au moment où l'assemblage commence à subir des glissements importants. Le fait d'utiliser du LVL permet de monter assez haut en contrainte de traction (36 MPa) et d'utiliser ainsi aux maximums les fortes capacités de ce type d'assemblage mais pose le problème du matage du matériau lié à sa faible limite élastique en compression transversale. Des investigations plus poussées sont nécessaires pour trouver une solution à ce problème. Le fait de précontraindre l'assemblage avant de le solliciter en traction longitudinale semble plus favorable. En effet, lors des glissements importants du coin intérieur, ce dernier sollicite de façon non homogène les avivés de bois en traction longitudinale : il est alors possible qu'un avivé reprenne toute la charge à un moment donné. Ce phénomène peut provoquer la ruine prématurée de l'assemblage lorsqu'il est précontraint et sollicité en traction de manière simultanée.

Malgré la ruine de l'assemblage due au matage important du LVL, cet essai montre qu'il est possible d'améliorer la résistance de l'ensemble avivés en LVL – assemblage précontraints de 40% et de garantir un seuil de résistance après précontrainte du système (Figure 219). L'assemblage proposé n'est pas optimal car les deux coins intérieurs secondaires subissent une compression transversale importante qui perturbe les mesures et peut expliquer les glissements importants apparus prématurément. Ce matage diminue également la raideur de l'assemblage.

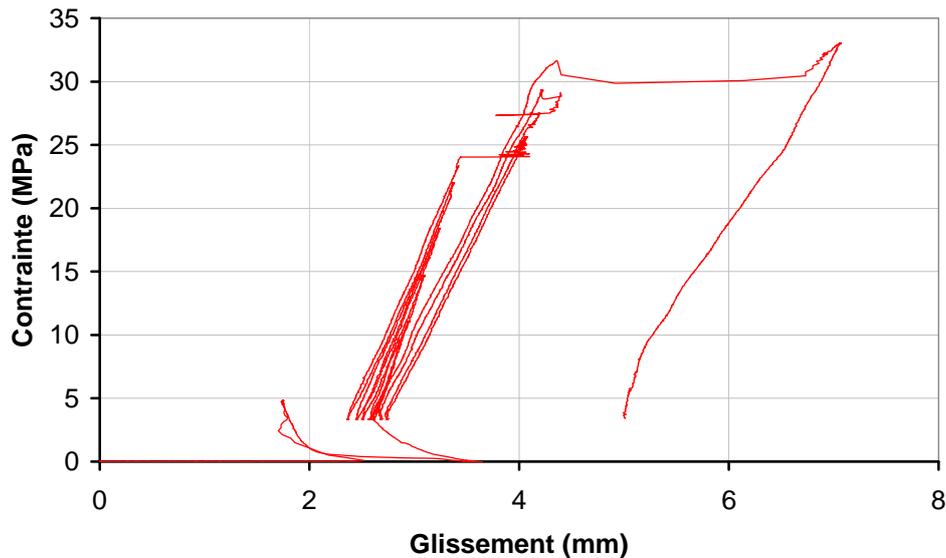


Figure 219 : Contrainte dans les éléments en fonction du glissement du nouvel assemblage précontraint

2.3. Conclusion et perspectives sur les assemblages précontraints pour les avivés de bois ou dérivés

Par l'ensemble des essais réalisés, il a été possible de montrer la faisabilité d'appliquer de la précontrainte à des avivés en bois ou à un de ses dérivés. A partir de la modélisation par éléments finis, il a été possible de montrer la présence d'efforts parasites sur le premier assemblage simple réalisé permettant la précontrainte des avivés en bois. Un nouvel assemblage a été proposé et a permis d'augmenter la résistance de l'ensemble avivés – assemblages précontraints.

Le comportement viscoplastique du bois n'a jamais été pris en compte dans la caractérisation des assemblages précontraints lors de ces travaux. Ce comportement est primordial d'autant plus que le bois est densifié à son extrémité. Le comportement viscoplastique du matériau peut avoir des conséquences immédiates sur le maintien de la charge de précontrainte dans l'assemblage. Il peut également avoir des conséquences à long terme sur les performances des assemblages. La seule indication disponible à ce sujet est le comportement de l'éprouvette en bois massif n°1 qui a été testées deux fois à un an d'intervalle (Figure 72) et qui montre que lors de ce laps de temps, la précontrainte injectée dans l'assemblage ainsi que sa raideur n'ont pas diminué.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a permis de montrer qu'il était possible d'appliquer le principe de précontrainte pour deux matériaux fibreux, le bambou et le bois avec les avantages attendus. Ce système d'assemblage appliqué à ces matériaux permet de les solliciter en traction longitudinale (forte capacité résistante) en limitant l'introduction d'efforts parasites de traction transversale et de cisaillement ce qui permet d'arriver à des performances très intéressantes pour le bambou et d'autres qui peuvent être encore améliorées pour le bois.

Il a été choisi, lors de ces travaux, de modéliser par la méthode des éléments finis la phase de mise en place de la précontrainte pour chacun des matériaux fibreux. Pour réaliser ces modèles, il était nécessaire de caractériser précisément le comportement en compression transversale au-delà de la limite élastique de ces matériaux fibreux jusque dans la phase de densification. Une loi de comportement générale est proposée pour *Picea abies*. Pour cette espèce, l'influence de la compression transversale sur sa résistance en traction longitudinale est expliquée et également mesurée puis modélisée de différentes manières. Pour le bambou en revanche, la loi de comportement individuelle de chaque chaume utilisé pour les essais sur les assemblages précontraints est déterminée. Le protocole choisi ne permet cependant pas de caractériser de manière suffisamment précise la loi propre de ce dernier. Un nouveau protocole est proposé mais nécessite des moyens plus fins d'investigation pour établir correctement les lois de comportement du bambou.

Le modèle éléments finis proposé est un modèle mésoscopique structural dans lequel les éléments ont une taille relativement importante (échelle du cerne pour le bois). Ce modèle se définit par la superposition de deux constituants : une formulation de type mousse isotrope non linéaire pour la direction transversale et une formulation linéaire pour prendre en compte le comportement du matériau dans la direction longitudinale. Malgré les nombreuses simplifications de ce type d'approche où toutes les interactions ne sont pas prises en compte, le modèle simule de manière très satisfaisante la réponse globale du système à partir des données locales du matériau (loi de comportement en compression transversale).

Ce travail de thèse s'inscrit dans une démarche à long terme de modélisation du matériau bois par éléments finis par ce modèle mésoscopique en cours d'amélioration. Ainsi, la raideur des assemblages précontraints étant un de leurs avantages majeurs, il semble nécessaire d'intégrer l'endommagement du matériau qui a été mesuré pour encore affiner la réponse du modèle. Pour pouvoir développer ce genre d'assemblage en structure, il reste à étudier le comportement viscoplastique de l'assemblage. Pour avoir testé à deux reprises à plus d'un an d'intervalle un assemblage bois précontraint, il a été constaté que sa capacité de résistance maximale n'était pas affectée. Cet essai bien qu'unique est déjà encourageant. Une étude

CONCLUSION GENERALE

complète doit donc démarrer sur ce point particulier très peu abordé dans la littérature.

A partir des modèles éléments finis réalisés, une démarche d'optimisation des assemblages est mise en place. Elle est appliquée à l'assemblage précontraint en bambou qui possède une forme intrinsèque proche d'un besoin et d'une épure architecturale. En considérant quelques critères basiques, la forme de l'assemblage peut évoluer pour satisfaire un besoin industriel. Une grande part des éléments est à présent réunie pour appliquer la démarche au matériau bois. Pour aller plus loin dans leur développement et aboutir à du transfert de technologies, il est nécessaire à présent de se rapprocher d'industriels pour concevoir et optimiser des assemblages précontraints en bois répondant à une problématique précise. Les développements futurs de nouveaux matériaux à base de bois devront également faire partie de la réflexion pour le développement de cette technique.

Dans le contexte actuel où le développement durable est une priorité dans la construction, l'utilisation de ce type d'assemblages y trouve toute sa place. En effet, les assemblages précontraints permettent d'utiliser des matériaux fibreux naturels dans des conditions proches de leur capacité résistante et le type de liaison mis en jeu étant uniquement mécanique (absence de colle), ils sont démontables et réutilisables après la fin de vie des ouvrages.

BIBLIOGRAPHIE

- [A] -

[AFN 1985]

AFNOR - Association française de normalisation (1985) Essai de compression axiale, NF B 51-007.

[AFN 2003]

AFNOR - Association française de normalisation (2003) Bois de structure - Classe de résistance. NF EN 338.

[AFN 2005]

AFNOR - Association française de normalisation (2005) Structure en bois - LVL (Lamibois) - Exigences. EN 14374-2004.

[AFN 2007]

AFNOR - Association française de normalisation (2007) Détermination de caractéristiques de fondation et de la portance locale d'éléments d'assemblage de type broche. NF EN 383.

[AST 2007]

ASTM (2007) Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. ASTM D143.

[AT 2008]

CSTB (2008) Avis technique 3/08-567 pour le procédé goujons collés RESIX de l'Etablissement SIMONIN Frères

[ABA 2009]

Abaqus(2009) ABAQUS User's Manual.

[ACC 1992]

ACCORSI, M.A., LONG, R.P. & SARISLEY, E.F. (1992) Prestress retention system for laminated timber bridge. Brevet américain US5097558.

[ADA 1998]

ADALIAN, C. (1998) Comportement du bois en compression dynamique multiaxiale - Application à la simulation de crashes de conteneur. Thèse de Doctorat d'Etat de l'université de Bordeaux I.

[ALB 2006]

ALBERMANI, F., GOH, G. Y. & CHAN, S.L. (2006) Lightweight bamboo double layer grid system. *Engineering Structures*, 29.

[AND 1999 a]

ANDO, K. & ONDA, H. (1999 a) Mechanism for deformation of wood as a honeycomb structure I: Effect of anatomy on the initial deformation process during radial compression. *Journal of Wood Science*, 45, 120-126.

BIBLIOGRAPHIE

[AND 1999 b]

ANDO, K. & ONDA, H. (1999 b) Mechanism for deformation of wood as a honeycomb structure II: First buckling mechanism of cell walls under radial compression using the generalized cell model. *Journal of Wood Science*, 45, 250-253.

- [B] -

[BAM 2009]

BAMBUTEC Konstruktion. (2009) Bambutec <<http://www.bambutec.org/>>.

[BAR 2009]

BARTHAM C. (2009), Optimisation du procédé de soudage du bois par tourillons coniques à l'aide d'un réseau de neurones, Mémoire de master de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.

[BEA 2009]

BEAULIEU, C. (2009), Etude de l'interaction des contraintes de cisaillement et de compression transversale dans le bois d'Epicéa afin de l'insérer dans un MEF, Mémoire de master de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.

[BER 1994]

BERALDO, A.L. (1994) Généralisation et optimisation de la fabrication d'un composite biomasse végétal-ciment à variations dimensionnelles limitées vis à vis des variations d'humidité. Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université de Nancy I.

[BER 2009]

Bertsche System (2009) Bertsche System <www.bertsche-office.de>.

[BLA 2008]

BLAß, H.J. & BEJTKA, I. (2008) Numerische Berechnung der Tragfähigkeit und der Steifigkeit von querzugverstärkten Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln, Universität Karlsruhe.

[BLO 2006]

BLOMBERG, J. (2006) Mechanical and Physical Properties of Semi-Isostically Densified Wood. Thèse de Doctorat d'Etat de Lulea University of Technology.

[BOC 1997]

BOCQUET, J.F. (1997) Modélisation des déformations locales du bois dans les assemblages brochés et boulonnés. Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université Blaise Pascal Clermont II.

[BOC 1999]

BOCQUET, J.F. (1999) Application d'effort de précontrainte dans des assemblages de type brochés. Travaux non publiés.

[BOC 2005]

BOCQUET, J.F. (2005) Essais sur des assemblages bois-bois traditionnels. Travaux non publiés.

BIBLIOGRAPHIE

[BOD 1982]

BODIG, J. & JAYNE, B.A. (1982) Mechanics of wood and wood composites
Van Nostrand Reynold company, New York, ISBN-0-44200822-8.

[BOU 1993]

BOUCHAIR, A. (1993) Modélisation non linéaire du comportement local des
assemblages bois. Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université Blaise Pascal
Clermont II.

[BOU 2006]

BOURAZZA, S., (2006), Variantes d'algorithmes génétiques appliquées aux
problèmes d'ordonnancement. Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université du
Havre

[BRU 1989]

BRUSNOWITZ, G. (1989) Junction connection for frameworks consisting of
bamboo. Brevet allemand DE3817236 (A1).

- [C] -

[CAM 1995]

CAMPBELL, N.A. (1995) Biologie, DeBoeck Université, ISBN DE BOECK 2-
8041-2084-8

[COR 1979]

CORE, H.A., COTE, W.A. & DAY, A.C. (1979) Wood structure and
identification. 2nd Edition, Syracuse University Press.

[COU 2009]

COUTAGNE, L. (2009) Caractérisation du bois comprimé, Mémoire de fin
d'Étude de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.

[CRO 1997]

CROSNIER, B. & KAZI-AOUAL, M. (1997) Bambous : caractéristiques,
comportement et systèmes constructifs. Annales GC Bois, 2.

- [D] -

[DEM 2005]

DE MAGISTRIS, F. (2005) Wood fibre deformation in combined shear and
compression. Thèse de Doctorat d'Etat de Stockholm (Suède).

[DEB 2009]

DEBOER, D. (2009) Deboer Architects <www.deboerarchitects.com/> Rebrique
Bamboo.

[DRE 2005]

DREO, J., PETROWSKI, A. & SIARRY, P. (2005) Métaheuristiques pour
l'optimisation difficile : recuit simulé, recherche avec tabous, algorithmes
évolutionnaires et algorithmes génétiques, colonies de fourmis... Eyrolles,
ISBN 2-212-11368-4

BIBLIOGRAPHIE

[DIN 2000]

DINWOODIE, J.M. (2000) Timber: Its nature and behaviour, 2nd edn. E & FN Spon, London & New York, ISBN 0-419-23580-9.

- [E] -

[EBE 2002]

EBERHARDSTEINER, J. (2002) Mechanisches Verhalten von Fichtenholz - Experimentelle Bestimmung der biaxialen Festigkeitseigenschaften. Springer-Verlag, Wien, New York.

- [F] -

[FLE 2005]

FLEISCHMANN, M. (2005) Numerische Berechnung von Holzkonstruktionen unter Verwendung eines realitätsnahen orthotropen elasto-plastischen Werkstoffmodells. Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université de Vienne.

[FLE 2007]

FLEISCHMANN, M., KRENN, H., EBERHARDSTEINER, J. & SCHICKHOFER, G. (2007) Numerische Berechnung von Holzkonstruktionen unter Verwendung eines orthotropen elasto-plastischen Werkstoffmodells. Holz Roh Werkst, 65, 301-313.

[FRA 1992]

FRANCOIS, P. (1992) Plasticité du bois en compression multiaxiale. Application à l'absorption d'énergie mécanique., Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université de Bordeaux I.

- [G] -

[GAU 1980]

GAUTHERIN, M. T. (1980) Critère de contrainte limite du bois massif. Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université Pierre et Marie Curie - Paris (VI).

[GIB 1997]

GIBSON, L.J. & ASHBY, M.F. (1997) Cellular solids: structure and properties, 2nd edn., Cambridge University Press, Cambridge, UK, ISBN-0-521-49911-9.

[GIB 1982 a]

GIBSON, L.J., ASHBY, M.F., SCHAJER, G.S. & ROBERTSON, C.I. (1982(a)) The mechanics of Two-Dimensional Cellular Materials. Proceedings of the Royal Society, London, A382, 25-42.

[GIB 1982 b]

GIBSON, L.J. & ASHBY, M.F. (1982(b)) The mechanics of three-Dimensional Cellular Materials. Proceedings of the Royal Society, London, A 382, 43-59.

BIBLIOGRAPHIE

[GRO 1971]

GROSSER, D. & LIESE, W. (1971) On the anatomy of Asian bamboos, with special reference to their vascular bundles. *Wood Science and Technology*, 5, 290-312.

[GRO 2004]

GROSSE, M. & RAUTENSTRAUCH, K. (2004) Numerical modelling of timber and connection elements used in timber-concrete-composite constructions. International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB-W18). Edinburg - Scotland.

[GRO 2005]

GROSSE, M. (2005) Zur numerischen Simulation des physikalisch nichtlinearen Kurzzeittragverhaltens von Nadelholz am Beispiel von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen. Thèse de Doctorat d'Etat de Bauhaus-Universität Weimar.

[GUI 1987]

GUITARD, D. (1987) *Mécanique du matériau bois et composites*, Cepadues-Editions ISBN: 2.85428.152.7.

- [H] -

[HEG 2004]

HEGER, F. (2004) Etude du phénomène de l'élimination de la mémoire de forme du bois densifié par post-traitement thermo-hydro-mécanique. Thèse de Doctorat d'Etat de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

[HEL 2001]

HELNWEIN, P., EBERHARDSTEINER J., HANHIJARVI, A. (2001) Constitutive model for the short-term failure analysis of wood under multiaxial states of stress: Effect of radial compression, *Proceedings of the First International Conference of the European Society for Wood Mechanics*, Lausanne, Switzerland. Building Material Laboratory, Materials Science and Engineering Department, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL)

[HIR 2006]

HIRT, M.A., BEZ, R. & NUSSBAUMER, A. (2006) *Construction métallique : notions fondamentales et méthodes de dimensionnement*, PPUR presses polytechniques, 10.

[HOL 1999]

HOLMBERG, S., PERSSON, K. & PETERSSON, H. (1999) Nonlinear mechanical behaviour and analysis of wood and fibre materials. *Computers and Structure*, 72, 459-480.

- [J] -

[JAN 1981]

JANSSEN, J.J.A. (1981) Bamboo in building structures. Thèse de Doctorat d'Etat de Eindhoven University of Technology.

[JAN 2000]

JANSSEN, J.J.A. (2000) Design and building with bamboo. INBAR Technical report, 20. (www.inbar.int)

[JAY 2003]

JAYANETTI, L. (2003) Bamboo in construction -status and potential. Proceedings of International Workshop on bamboo industrial utilisation - 10/2003, (www.inbar.int).

- [K] -

[KAS 2005]

KASAL, B. & LEICHTI, R.J. (2005) State of the art in multiaxial phenomenological failure criteria for wood members. Prog. Struct. Eng. Mater., 7, 3:13.

[KEL 1994]

KELLER, R. (1994) Le bois, matériau d'ingénierie (Texte rassemblé par P. Jodin) - Chapitre I: La Constitution du bois, Association pour la recherche sur le bois en Lorraine, Ecole nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts.

[KOL 1968]

KOLLMANN, F.F.P. & COTE, W.A. (1968) Principles of wood science and technology, Vol I: Solid Wood, Springer-Verlage, reprint 1984.

[KUL 1999]

KULTIKOVA, E.V. (1999) Structure and properties relationships of densified wood. Thèse de Doctorat d'Etat de Virginia Polytechnic Institute and State University.

- [L] -

[LAN 2002]

LANGLAIS, G. (2002) Maison de bambou, Hanzen ISBN 2850258296

[LEI 1999]

LEIJTEN A.J.M. (1999) Locally reinforced timber joints with expanded tube fasteners. Delft University of Technology, Fac. Of Civil Engineering, THE NETHERLANDS

[LEV 2007]

LEVASSEUR, S. (2007) Analyse inverse en géotechnique : développement d'une méthode à base d'algorithmes génétiques. Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université Joseph Fourier

BIBLIOGRAPHIE

[LIE 1987]

LIESE, W. (1987) Research on bamboo. *Wood and Science Technology*, 21(3), 189-209.

[LIE 2003]

LIESE, W. (2003) Structures of a bamboo culm affecting its utilization. *Proceedings of International Workshop on bamboo industrial utilisation*, 10.

[LON 2005]

LONDONO, J.B. & CHEYNE, D. (2005) Method for preparing a terminal assembly for bamboo. *Brevet américain US2004238070 (A1)*.

- [M] -

[MAC 1968]

MACKENZIE, W.M. & KARPOVICH, H. (1968) The Frictional Behaviour of Wood. *Wood and Science Technology*, 2, 139-152.

[MAC 2005]

MACKENZIE-HELNWEIN, P., MULLNER, H.W., EBERHARDSTEINER, J. & MANG, H.A. (2005) Analysis of Layered Wooden Shells using an Orthotropic Elasto-Plastic Model for Multiaxial Loading of Clear Spruce Wood. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 194, 2661-2685.

[MAI 1984]

MAITI, S.K., GIBSON, L.J. & ASHBY, M.F. (1984) Deformation and Energy Absorption Diagrams for Cellular Solids. *Acta Metallurgica*, 32, n°11, 1963-1975.

[MAI 2009]

Mairie de Metz. (2009) www.mairie-metz.fr Rubrique Centre Pompidou-Metz.

[MAN 1968]

MANDARY, W.L. (1968) Relationship between perpendicular compressive stress and shear stress of wood. *Wood Science*, 1, 3, 177-182.

- [N] -

[NAH 1986]

NAHAS, M.N. (1986) Survey of failure and post-failure theories of laminated fiber-reinforced composites. *Journal of Composites Technology and Research*, 8-4, 138-153.

[NAV 2000]

NAVI, P. & GIRARDET, F. (2000) Effect of THM treatment on the structure and properties of wood. *Holzforschung*, 54(3), 287-293.

- [P] -

- [PAR 1967]
PARAMESWARAN, N. & LIESE, W. (1976) On the fine structure of bamboo fibres. *Wood Science and Technology*, 10, 231-246.
- [PAR 2004]
PARIZEAU, M., Réseaux de neurones (2004), Rapport pédagogique GIF-21140 et GIF64326. Québec : Université Laval
- [PEI 2002]
PEILLIEN, Y. & PETITDEMANGE, L. (2002) Conception d'un assemblage performant pour les structures en bambous. Mémoire de fin d'Étude de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.
- [PER 1984]
PERKITNY, T. & JABLONSKI, W. (1984) On the assesment of properties of densified wood (Zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften von Pressvollholz). *Holz Roh Werkst*, 42, 81-84.
- [PLU 1992]
PLUVINAGE, G. (1992) La rupture du bois et ses composites, Cépaduès- Editions ISBN 2.85428.292.2.
- [PRI 2005]
PRICE, K.V., STORN, R.M., LAMPINEN, J.A., *Differential Evolution - A practical approach to global optimization*. s.l. : Springer, 2005. ISBN-10 3-540-20950-6.

- [R] -

- [RAB 2001]
RABOT-QUERCI, M.L. (2001) Mise au point d'un mode d'assemblage sur du bambou. Mémoire de DEA de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.
- [RAC 2005]
RACHER, P. & BOCQUET, J. F. (2005) Non-linear analysis of dowelled timber connections: a new approach for embedding modelling. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 5, 1-9.
- [RAY 1996]
RAY, B.T. (1996) Structural elements. Brevet américain US005809713A.
- [RED 1993]
REDINGTON, M. (1993) Deformation and damage in juvenile wood. COST 508 - Wood Mechanics - Workshop on wood: Pasticity and damage. University of Limerick, Ireland.
- [REI 2001]
REITERER, A. & STANZL-TSCHEGG, S. (2001) Compressive behaviour of softwood under uniaxial loading at different orientations to the grain *Mechanics of materials*, 33, 705-715.

BIBLIOGRAPHIE

[ROT 2009]

ROTTKE, E. (2009) <<http://bambus.rwth-aachen.de/index.html>>, Rebrique: "Construction with Bamboo" - "Bamboo Connections".

- [S] -

[SAI 1982]

SAIKI, H. (1982) The structure of domestic and imported woods in Japan. An atlas of scanning electron micrographs., Jpn. For. Techn. Assoc., Tokyo.

[SAT 2009]

SATHIYAA, P., ARAVINDANB, S., NOORUL HAQA, A. & PANEERSELVAMA, K. (2009), Journal of materials processing technology 209, pp. 2576–2584.

[STE 1995]

STEP1 (1995) Timber Engineering, Edité par Blaß H.J., Aune P., Choo B.S., Görlacher R., Griffiths D.R., Hilson B.O., Racher P., Steck G.

- [T] -

[TAB 1997]

TABARSA, T. & CHUI, Y. M. (1997) Effects of hot-pressing on properties of white spruce. Forest -Prod J, 47, 71-76.

[TAB 1999]

TABARSA, T. & CHUI, Y. (1999) Microscopic characterisation of wood behaviour in radial compression. Fourth International Conference on the Development of Wood Science, Wood Technology and Forestry. Missenden Abbey, UK: Forest Products Research Centre, Buckingham Chilterns University College; High Wycombe; UK.

[TAB 2000]

TABARSA, T. & CHUI, Y. (2000) Stress-strain response of wood under radial compression. Part I. Test method and influences of cellular properties. Wood and fiber science, 32,2, 144-152.

[TAB 2001]

TABARSA, T. & CHUI, Y. (2001) Characterizing microscopic behavior of wood under transverse compression. Part II. Effect of species and loading direction. Wood and fiber science, 33,2, 223-232.

[THO 1975]

THOBY, M. (1975) Validité de tests précoces d'appréciation des caractères technologiques du bois de Douglas. Application à une plantation comparative de 24 provenances de Douglas (Peyrat le Château) en liaison avec des caractères morphologiques et auxométriques., Rapport de stage ENITEF, Station de Recherches sur la Qualité des Bois, INRA-CRF, Nancy - Champenoux.

BIBLIOGRAPHIE

[THO 1997]

THOMAS, P. (1997), Contribution à l'identification de systèmes non linéaires par réseaux de neurones, Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université Henry Poincaré Nancy I.

[TOU 2006]

TOUSSAINT, P. (2006) Analyse d'assemblages par tiges collées. Mémoire de Master de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.

[TRI 1984]

TRIBOULOT, P. (1984) Caractérisation mécanique du bois densifié à froid. Travaux non publiés.

[TRO 2001]

TROUY-TRIBOULOT, M. C. & TRIBOULOT, P. (2001) Matériau bois Structure et caractéristiques. Techniques de l'Ingénieur, traité Construction, c925, 1-26.

[TRU 1999]

TRUMEL, M. & BOUDASSOU, B. (1999) Bambous, Les Carnets de Courson Editions du Collectionneur ISBN : 978-2-909450-54-4

- [W] -

[WAN 1950]

WANGAARD, F. F. (1950) The mechanical properties of wood. John Wiley & Sons, New-York.

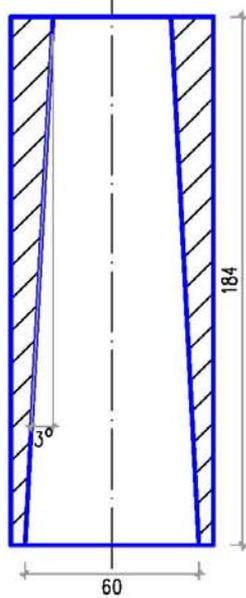
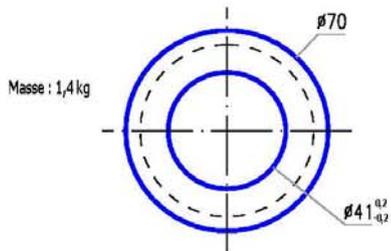
- [Z] -

[ZHO 1981]

ZHOU, F. (1981) Studies on physical and mechanical properties of bamboo woods. Nanjing Techn. Coll. Forest Prod.

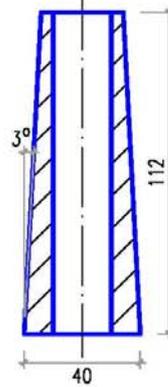
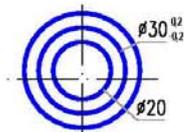
ANNEXE 1

Plan de l'assemblage précontraint pour un chaume de bambou



1

Masse : 0,5 kg



2

2	2	Cône intérieur				
1	2	Cône extérieur				
Rap. N° Pièce	Nb Désignation		Observation			
Matériau	Traitement	Tol. géom.	Usinage	Ech.		
Ac 65 ou équivalent	Rouge	+/- 0,1	Sur 6,3 pour indiquer usinage	1 / 2		
ENSTIB-LERMAB				Dessinateur: Pascal TOUSSAINT Date: 12 / 02 / 2012		
ASSEMBLAGES BAMBOU Ferrures à 3°						
ENSTIB 27 rue du Maréchal 91841 91851 EPINAY Cedex 9		Tel : 45-33-26-96-12 Fax : 03-20-20-51-38		Familles	Inds	

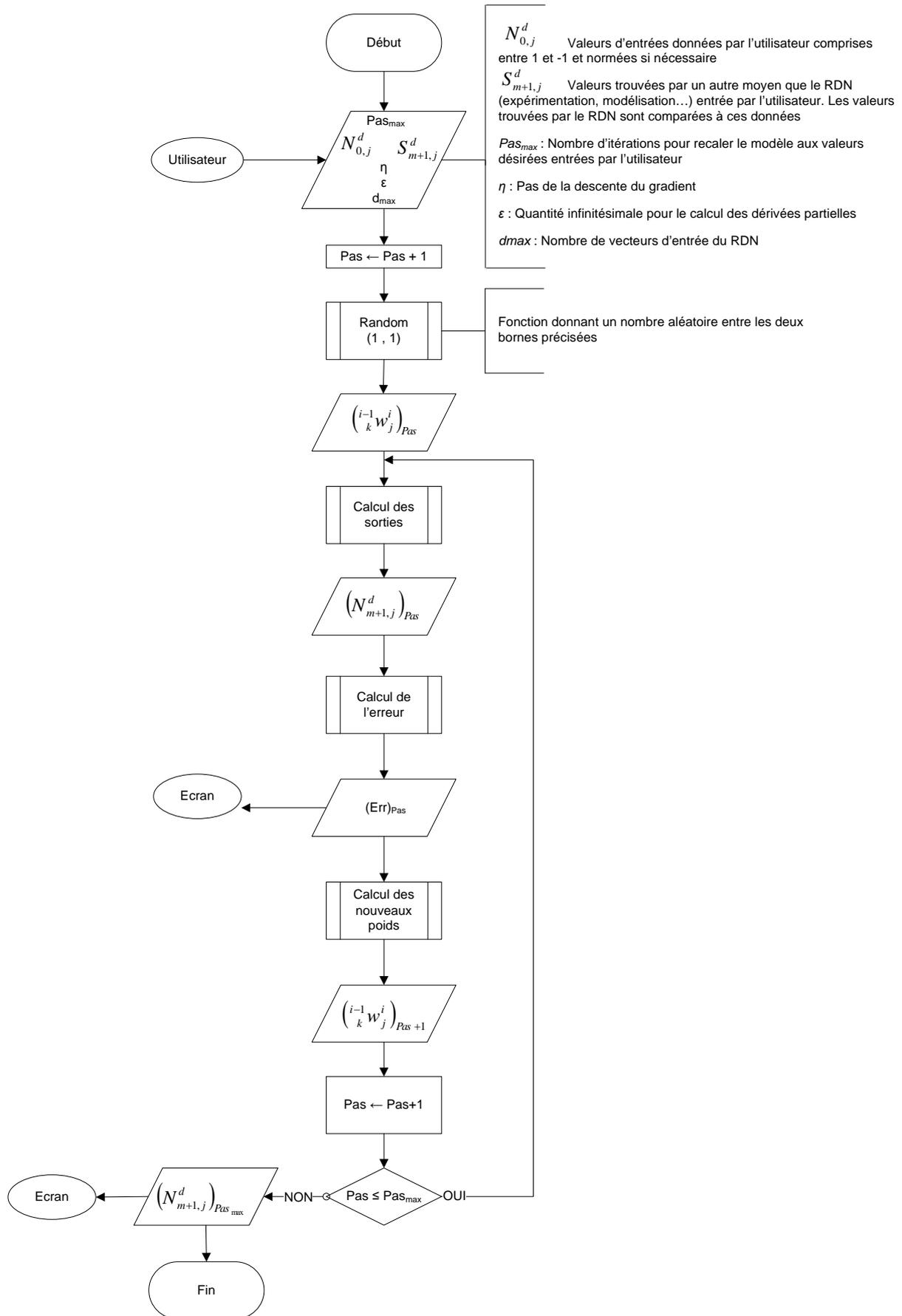
ANNEXE 2

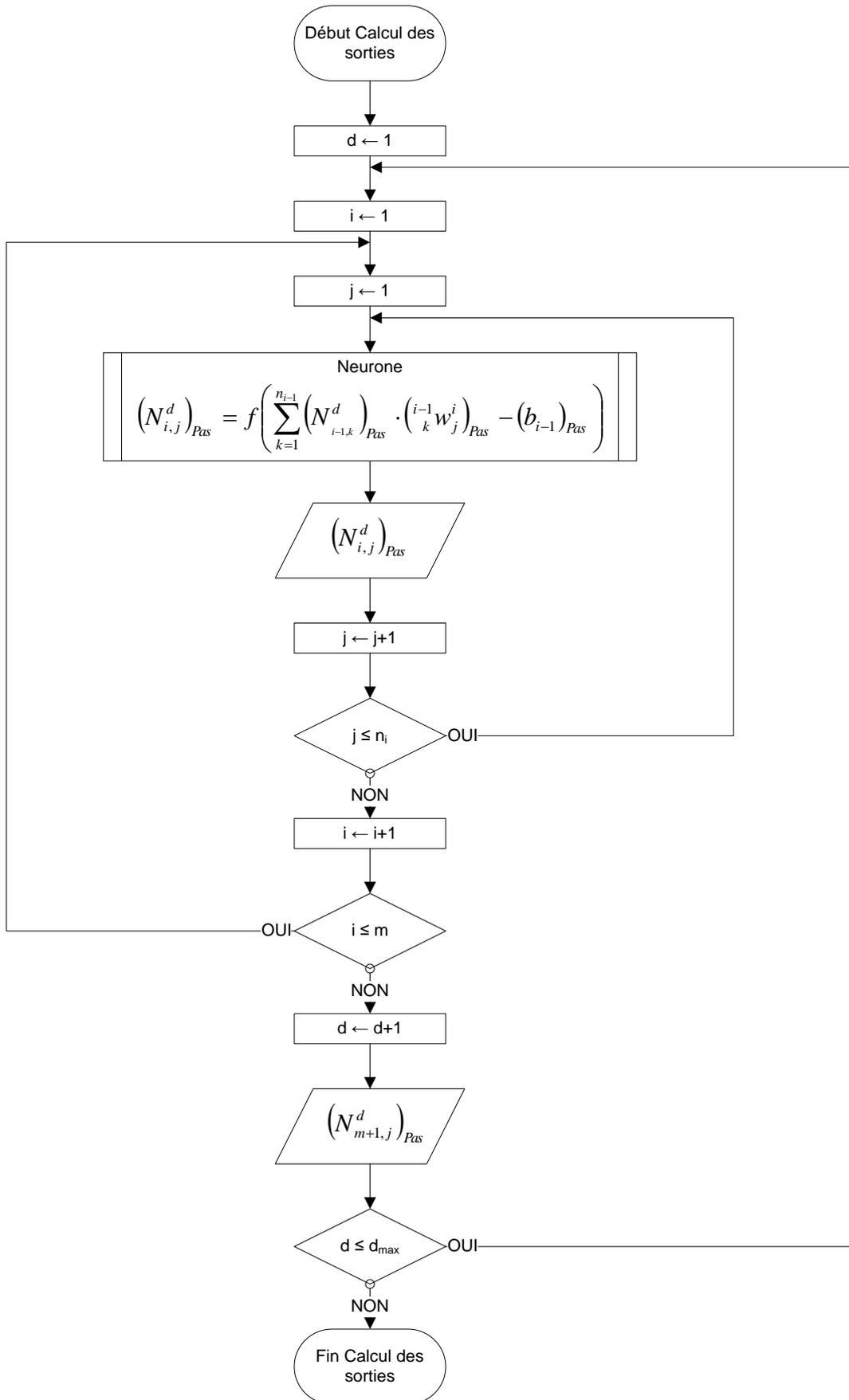
Plan de l'assemblage précontraint pour deux avivés de bois

ANNEXE 3

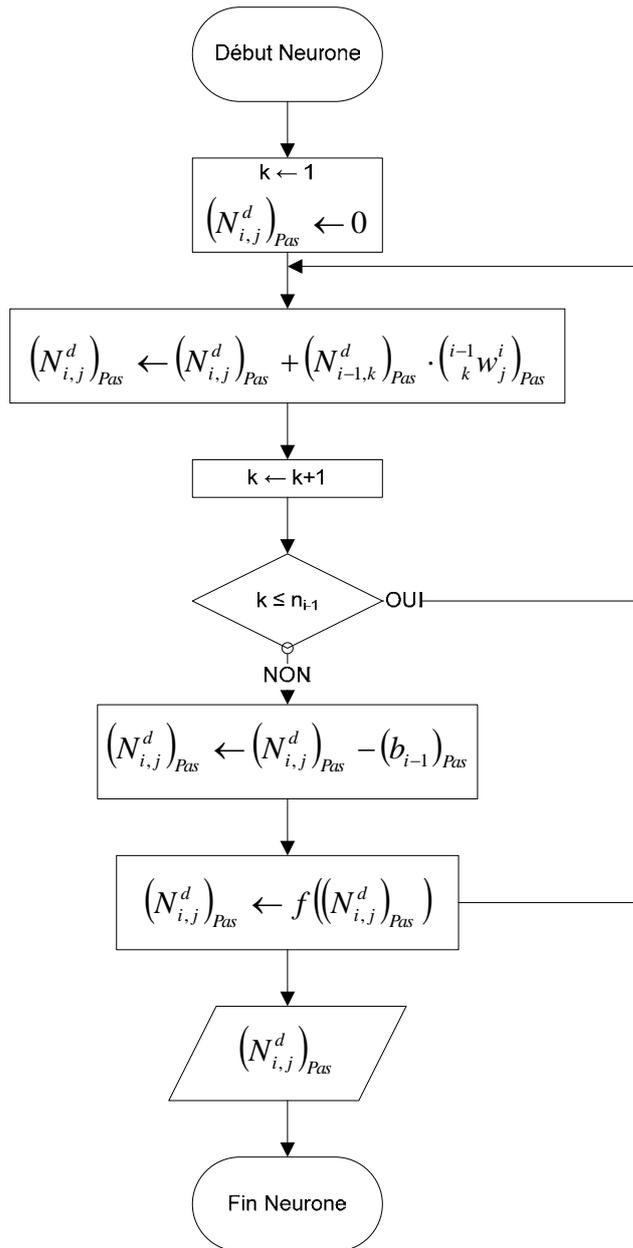
Organigramme de programmation d'un perceptron
multicouche

ANNEXE 3

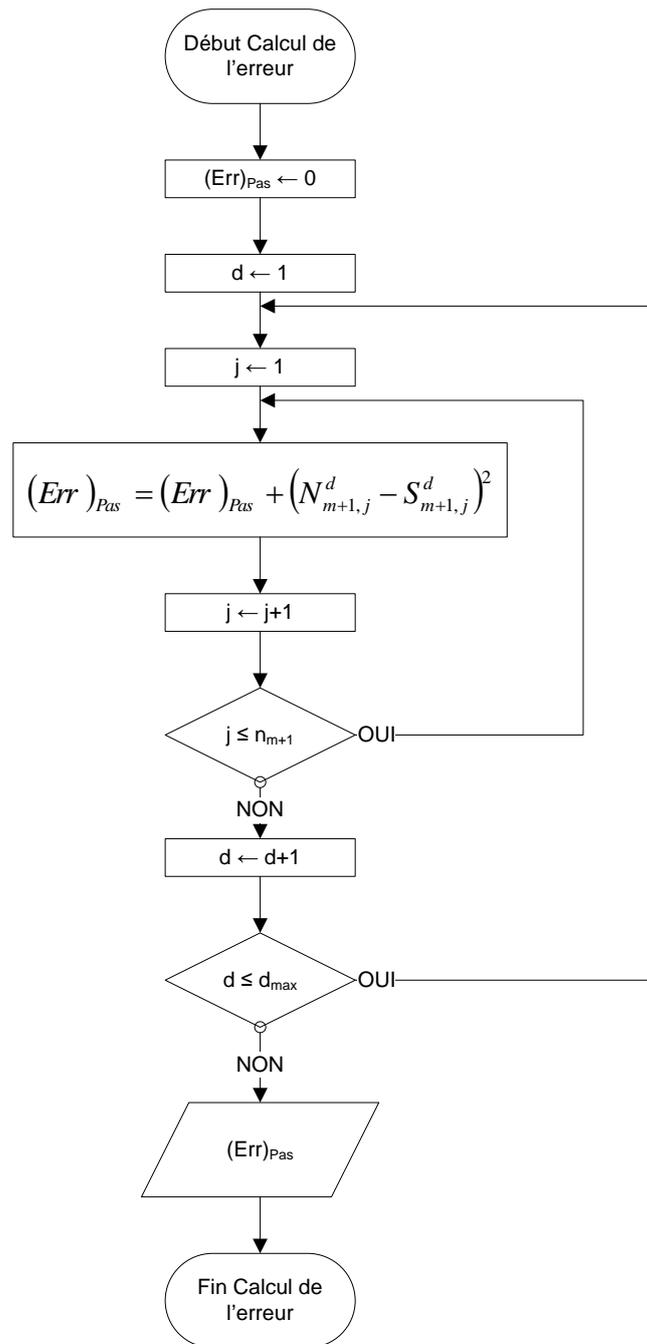


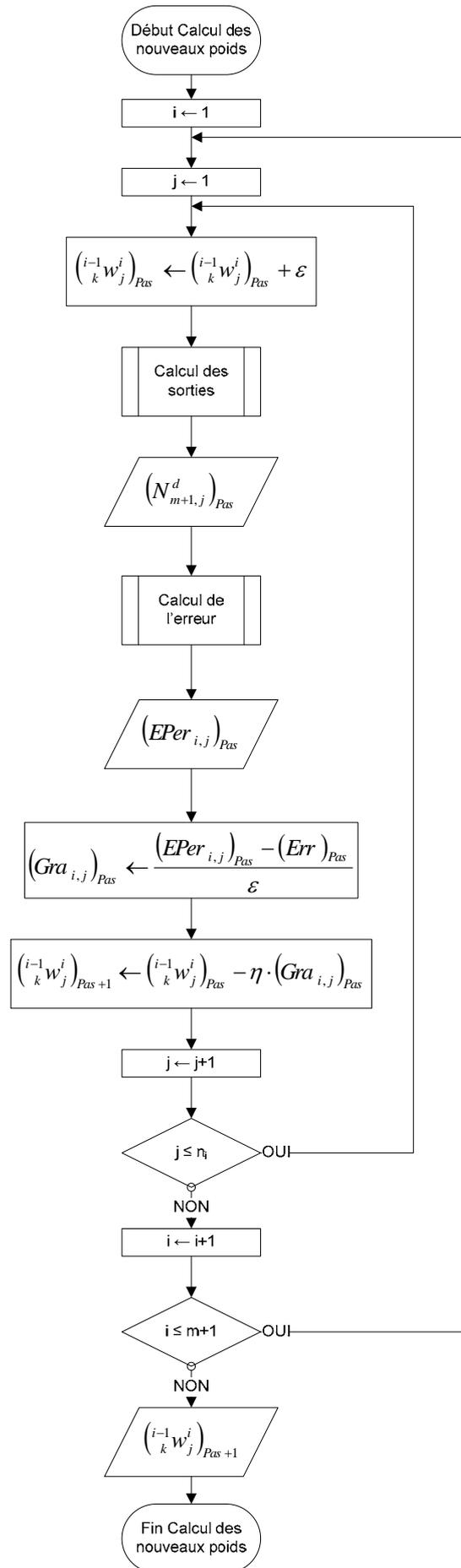


ANNEXE 3



f est une fonction de transfert qui prend la forme d'une tangente hyperbolique pour les couches cachées et d'une fonction linéaire pour la couche de sortie dans le cas d'un perceptron multicouche

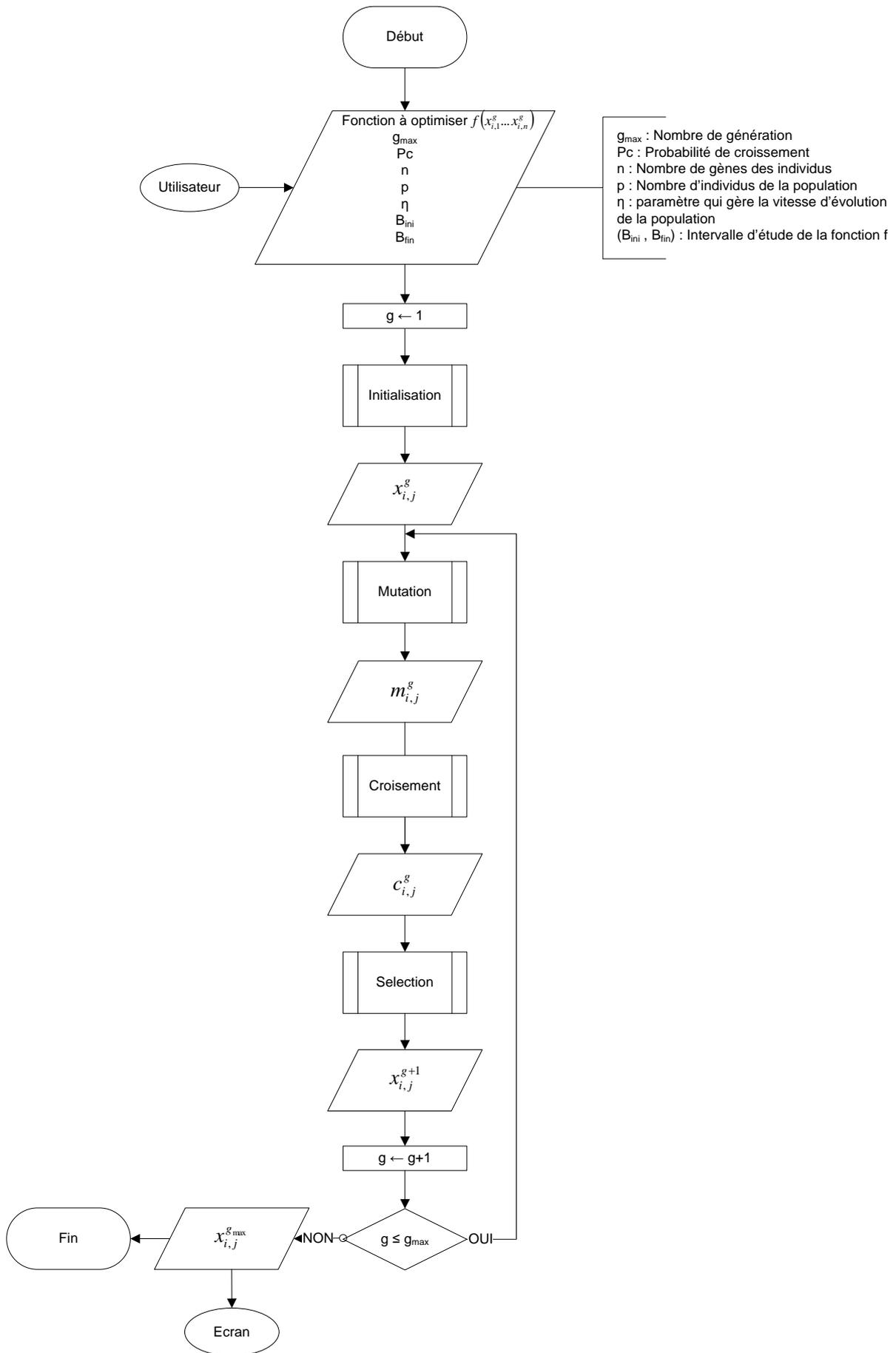


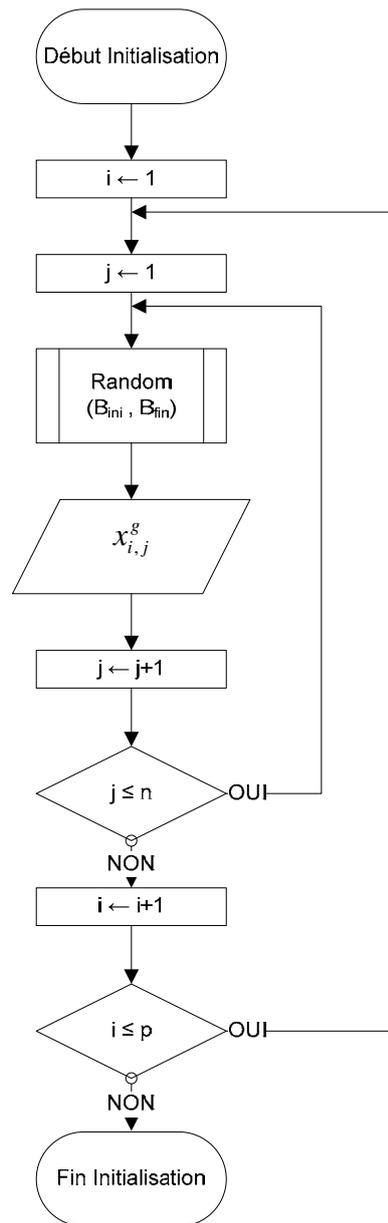


ANNEXE 4

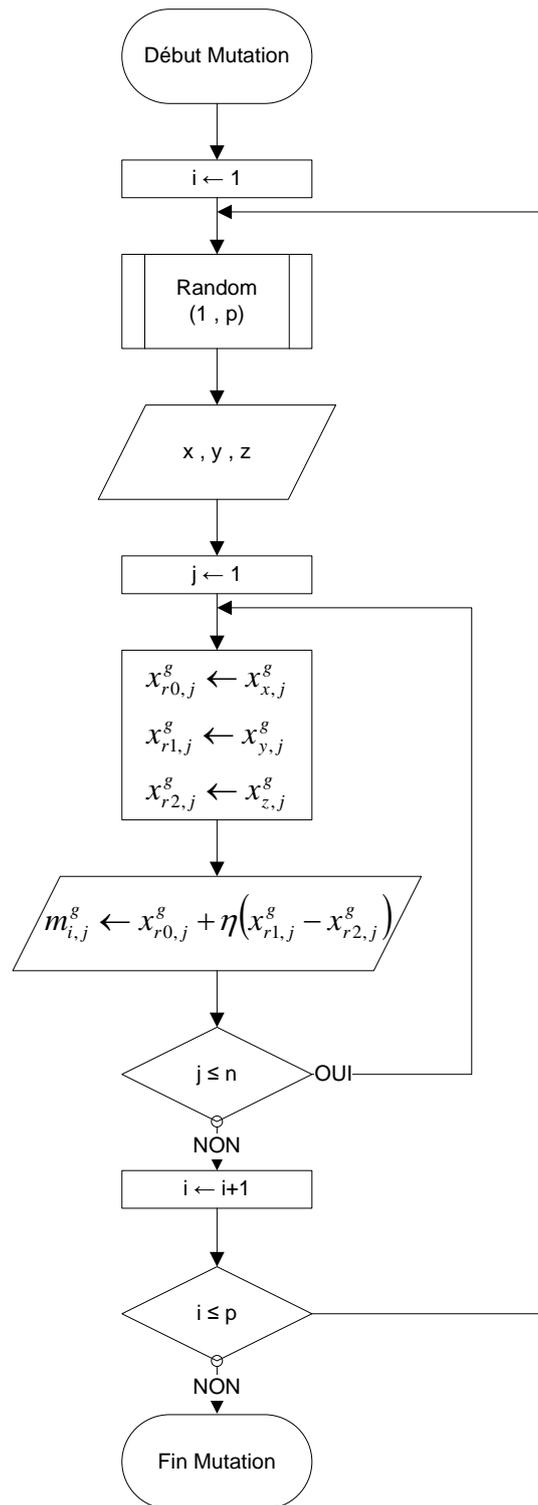
Organigramme de programmation d'une optimisation par
évolution différentielle

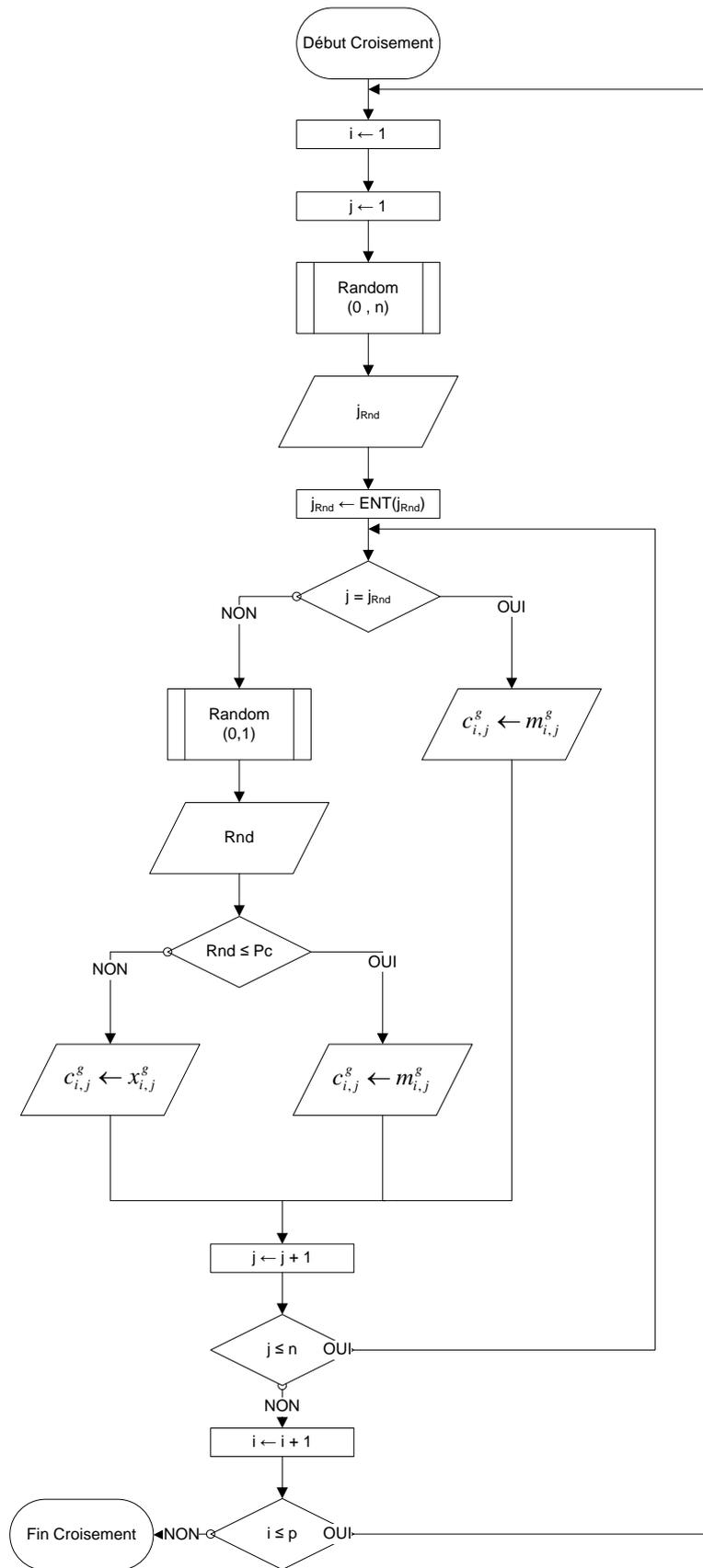
ANNEXE 4

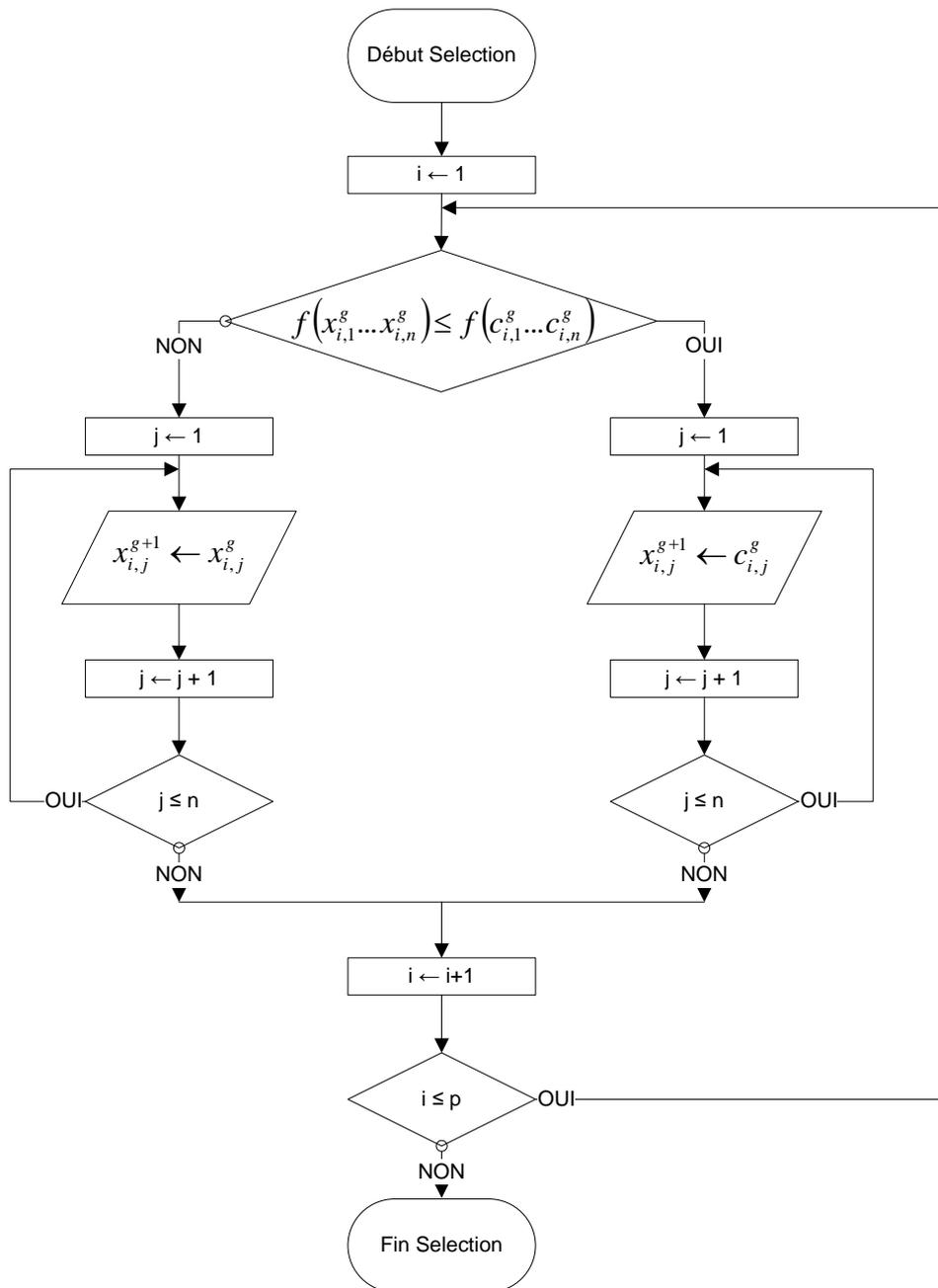




ANNEXE 4







ANNEXE 5

Etude complémentaire de la thèse de P. Toussaint sur le comportement en compression transversale du bambou

Ce travail a été réalisé à partir des travaux de thèse de P. Toussaint par J.F. Bocquet.

Lors du chapitre 1 de la thèse de P. Toussaint, le comportement des assemblages précontraints appliqués à différents chaumes de bambou est déterminé expérimentalement. Pour modéliser la phase de précontrainte des assemblages, le comportement en compression transversale de chaque chaume de bambou est déterminé à partir du protocole expérimental décrit sur la figure 88 (p.108) de la thèse.

A partir de cette loi de comportement et du modèle structural mésoscopique décrit au chapitre 4 de la thèse (p. 193 à 207), la réponse globale du modèle est comparée à celle trouvée expérimentalement. Il s'avère alors que le modèle ne permet pas de simuler de manière satisfaisante le comportement trouvé expérimentalement (Figure 167 p. 200).

Or le modèle éléments finis proposé permet de simuler de manière très satisfaisante le comportement expérimental trouvé pour l'assemblage bois. Le protocole expérimental permettant de déterminer le comportement du bambou en compression transversale est alors remis en cause (Figure 168 p. 201). La matière n'est, en effet, pas suffisamment confinée lors de l'essai ce qui a pour conséquence l'apparition d'effets parasites. Pour contourner ce problème, une nouvelle loi de comportement permettant de prendre en compte ces effets parasites mis en évidence est proposée (Figure 169 p. 201).

Un nouveau protocole expérimental est alors imaginé. Ce dernier est décrit sur la figure 171 de la thèse et est rappelé ci-dessous.

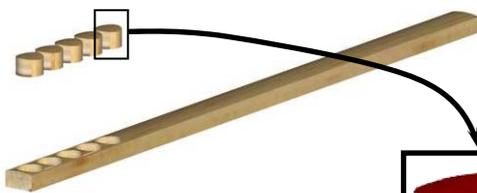
① Découpage d'une bande de bambou



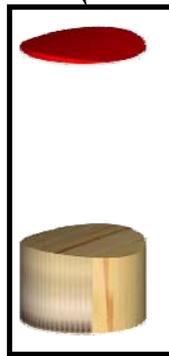
② Rabotage de la bande de bambou



③ Usinage de cylindres dans la bande de bambou



④ Usinage de la surface non plane du cylindre de bambou pour arriver à un cylindre le plus parfait possible



⑤ Test du cylindre avec un protocole proche de celui utilisé pour le bois

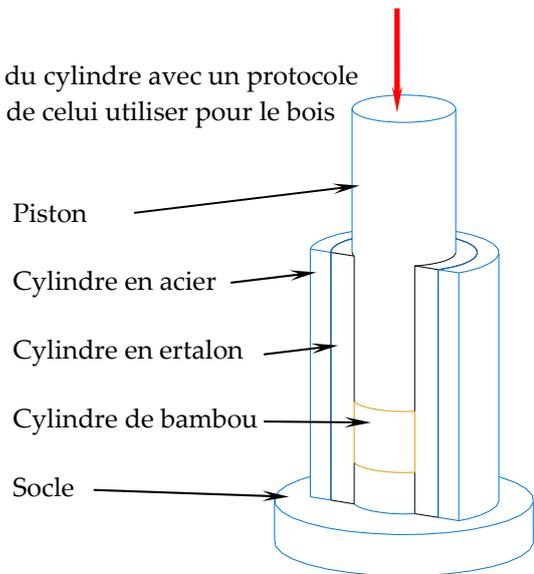


Figure 220 : Nouveau protocole expérimental pour caractériser le bambou en compression transversale

Lors du travail de thèse, le bambou n'a pas pu être testé en compression transversale en respectant ce protocole car le matériel nécessaire pour usiner les éprouvettes n'étaient pas disponible au moment où les essais ont été réalisés. En effet, la réalisation des éprouvettes cylindriques nécessite l'utilisation d'une machine à commande numérique suffisamment précise. Les éprouvettes usinées ont un diamètre de 10 mm et une hauteur de 5 mm (Figure 221). Le mode de mesure permettant de relever le déplacement du bambou lors de sa compression est l'analyse d'images

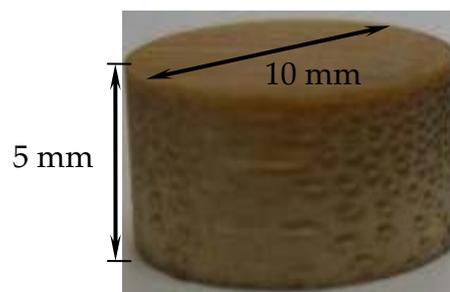


Figure 221 : Géométrie d'une éprouvette testée en compression transversale

Etant donné la faible dispersion des comportements en compression transversale trouvée lors de la première campagne de caractérisation, la nouvelle campagne de caractérisation a été réalisée sur un seul chaume de bambou : le chaume B60. Les résultats observés sont comparés à la courbe moyenne trouvée lors du premier protocole (Figure 222).

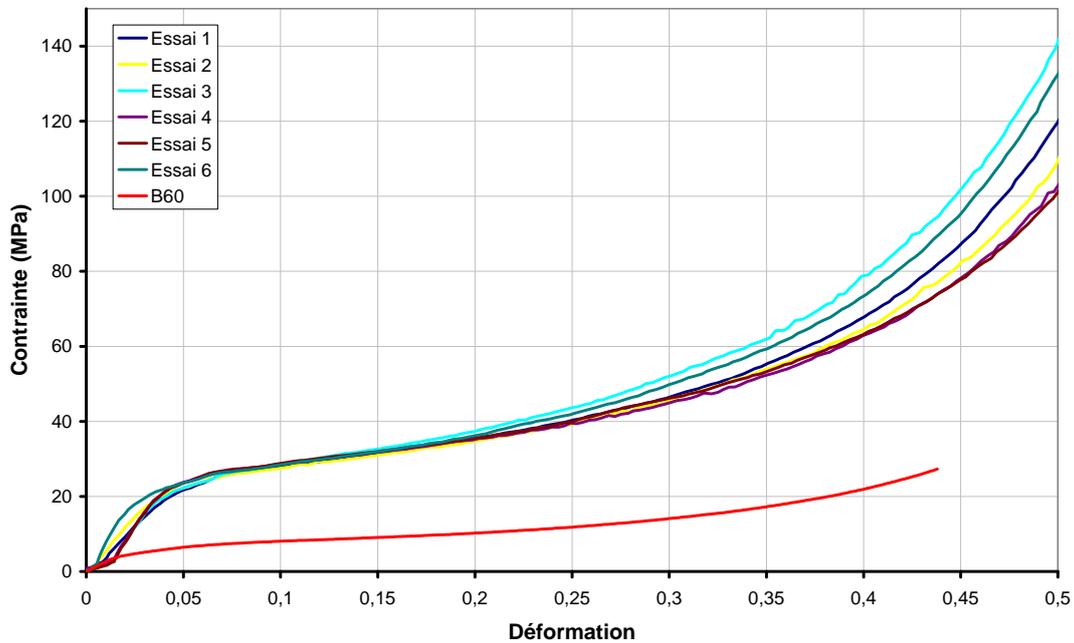


Figure 222 : Comparaison entre les comportements en compression transversale du bambou trouvés pour les deux protocoles expérimentaux

En comparant les résultats des deux protocoles expérimentaux, il est clair que le premier protocole proposé ne permet pas de déterminer la loi de comportement exacte du bambou en compression transversale. La loi de comportement trouvée lors du deuxième protocole se rapproche de la loi modifiée entrée dans le modèle éléments finis.

Ce travail complémentaire confirme le fait que le premier protocole expérimental proposé pour caractériser le bambou en compression transversale n'est pas correct. Il permet de montrer également que la loi proposée par analyse inverse se rapproche du comportement réel du bambou en compression transversale. De plus, même s'il existe un écart entre la loi modifiée proposée lors des travaux de thèse et celle déterminée expérimentalement, l'allure générale des deux comportements restent similaires ce qui ne remet pas en cause l'analyse sur le passage des efforts dans l'assemblage réalisée.

A partir de cette loi de comportement sans effets parasites, un travail supplémentaire sur le modèle par éléments finis reste à faire sur la détermination du coefficient de frottement par analyse inverse. Cette étape permettra de simuler de façon plus satisfaisante le comportement global de l'assemblage précontraint pour le bambou.

RESUME

Dans un assemblage précontraint, des efforts sont transmis entre les pièces par mobilisation du frottement suite à l'application d'une contrainte de compression normale. L'objectif de ce travail était de transposer ce principe de transmission des efforts au matériau bois. A partir de résultats existants, une étude expérimentale préliminaire a été menée sur des chaumes de bambou. L'intérêt de cette « graminée » par rapport au bois est sa résistance importante en compression transversale. Pour appliquer ce principe à des avivés de bois, il a été nécessaire de les densifier par compression localisée à froid au-delà de leur limite élastique.

Une caractérisation de *Picea abies* en compression transversale au-delà de sa limite élastique a été réalisée. Cette analyse a abouti à une loi de comportement fonction de la densité de l'éprouvette. De plus, l'influence de la densification du bois sur sa résistance en traction longitudinale a été mesurée. Il s'avère que cette résistance est constante puis chute à partir d'un taux de densification critique fonction de la masse volumique du bois.

La phase de mise en place de la précontrainte dans les assemblages bois et bambou testés a été modélisée par éléments finis. L'orthotropie des matériaux a été pris en compte par la superposition d'un modèle mousse (comportement non-linéaire transversal) et d'un modèle poutre (direction longitudinale) créant une structure dont la taille des éléments ne descend pas en dessous de celle des cernes. Ce modèle structural mésoscopique a permis de simuler les phases de densification, charge, décharge de l'assemblage et d'atteindre la limite à rupture, permettant d'aller jusqu'à une démarche d'optimisation.

Mots clefs : bois, assemblage, précontrainte, caractérisation, compression transversale, traction longitudinale, modèle éléments finis, optimisation

ABSTRACT

In a pre-stressed fastener, forces are transmitted between two elements by friction which is made possible by the application of transversal compression forces. The aim of this work was to apply this principle to timber fasteners. Thanks to former results, a preliminary experimental study was done on stubbles of bamboo. This "grass" has a higher transversal compression resistance than wood. In order to transpose the principle of pre-stress from bamboo to timber, it was necessary to increase the compression resistance of timber. The idea proposed here is the densification of wood by localised cold compression beyond its elastic limit.

Picea abies was characterized in transversal compression beyond its elastic limit. This analysis gave stress-strain curves which depend on the density of the wood. The influence of the densification on the resistance in longitudinal tension was also measured. This resistance is constant and then it decreases rapidly from a critical densification rate function of the density of the wood.

The pre-stress of the tested timber and bamboo fasteners was modelled by a finite elements model. The anisotropy of the materials was taken into account by the superposition of a crushable foam model (non linear behaviour in transversal direction) and beams (longitudinal direction). This structural mesoscopic model allowed simulating the densification, the loading and unloading of the fasteners until their failure which lead to an optimization of the connectors.

Key words: timber, fastener, pre-stress, characterisation, transverse compression, longitudinal tension, finite element model, optimisation