



# ANALYSE DU COMPORTEMENT DES LIAISONS BOIS-BOIS DANS LE DIAPHRAGME

### MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER D'INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT OPTION : Génie civil

\_\_\_\_\_

Présenté et soutenu publiquement le 24 Juin 2013 par

#### **Decroly DJOUBISSIE DENOUWE**

Matricule : 2010 0214

#### Travaux dirigés par :

#### Dr Adamah MESSAN

#### **Dr Eric FOURNELY**

Centre Commun de Recherche-Energie et Habitat Durables 2iE Plateforme Mécanique et Structures de Génie Civil (MSGC) Polytech' Clermont-Ferrand

Jury d'évaluation du stage : Président : Dr Adamah MESSAN Membres et correcteurs : K. KOKOLE S. BARRO

Promotion [2012/2013]

### CITATION

« Rien de grand et d'excellent ne peut être réalisé sans un minimum de rigueur et de passion »

### DEDICACES

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du plus profond du cœur à ceux qu'on aime jusqu'aux frontières de l'imagination. Ce travail est dédié :

- À l'Eternel Dieu Tout-Puissant, Seul Guide et Protecteur.
   Que Ton Kom Glorieux soit à jamais béni, Amen.
- à mon oncle *Norbert MBOUTHIEU*, qui est mon modèle d'homme de rigueur, d'Amour et de Foi. Pour le soutien et le sacrifice énorme consentis pour ma formation,
   *Que le Seigneur te comble de sa Grâce et de sa Sénédiction.*
- à ma mère Martine MBOUTHIEU et mon père Michel NOUWE, qui ont guidé mes premiers pas dans la recherche du savoir et de la réussite.
   Ruisse l'Eternel vous accorder longue vie pour jouir des fruits de l'arbre que vous avez planté!
- À mes Sœurs, Bertholle, Psyché et Claudine ; mes cousines et mes cousins
   Pour les encouragements perpétuels, le soutien moral, et la joie qu'ils m'apportent.
   Que le Seigneur nous unisse toujours et qu'il montre à chacun de nous le chemin de la Sérité et de l'Amour.
- à toute ma famille paternelle et maternelle
   Pour leur attention particulière affichée à mon égard
   Recevez à travers ce mémoire, le couronnement de la perspicacité.
- à tous mes amis et camarades pour le soutien et la générosité indéfectible
   Considérez ce travail comme un exemple de courage, de patience, de volonté, d'abnégation.
- À tous ceux qui de près ou de loin ont participé à l'édification de ma personne de quelque manière que ce soit, que cette œuvre soit pour vous le témoignage de ma reconnaissance intarissable.

Foi et Bérénité sont mes crédos, pour une vie faite de plénitude en Amour, de Réussite, agrémentée de Raix

### REMERCIEMENTS

C'est le lieu de manifester ma gratitude à:

- Monsieur le Directeur de la fondation 2iE ;
- > Tout le personnel de la Fondation 2iE ;
- Tout le personnel de Polytech' Clermont-Ferrand, pour son accueil chaleureux et qui nous a offert un cadre pour notre stage ;
- M. Adamah MESSAN, Maître de conférences d'Université et tuteur académique, qui a rendu possible ce stage et pour ses remarques, suggestions et orientations dans la rédaction de ce mémoire ;
- M. Abdelhamid BOUCHAÏR, Professeur de l'Université Blaise Pascal et Professeur associé à la Fondation 2iE, pour ses encouragements à aller plus loin dans la conquête du savoir et de la connaissance, et qui a su mettre sa disponibilité à profit afin que cette expérience soit la plus fructueuse possible ;
- M. Eric FOURNELY, Maître de conférences de l'Université Blaise Pascal, pour le temps qu'il nous a consacré tout au long de cette période, sachant répondre à toutes nos questions;
- M. Sebastian FUENTES, Doctorant à l'Institut Pascal, pour l'aide et les conseils avisés qu'il nous a apporté tout au long de ce stage ;
- L'ensemble des étudiants du 2iE et particulièrement ma promotion de Master, avec lesquels nous avons passé de belles années pleines d'harmonie, et de paix au sein de l'Institut;
- Tous mes amis pour le soutien mutuel et pour l'ambiance conviviale qui a prévalu durant cette formation à 2iE, en particulier *Edem BAITE, Bertrand DONFACK, Emmanuel NJAKOU, Edmond TALOM*, et *Cyrille YOUGANG*.

« *La fin d'une chose valant mieux que son commencement* », je tiens à exprimer ici mes sincères remerciements à tous ceux qui, de près comme de loin, de par leur soutien, ont contribué au bon déroulement de ma formation et à la l'aboutissement de ce mémoire de fin d'études.

### RESUME

L'utilisation du bois dans la construction connait un intérêt croissant à cause des qualités intrinsèques du matériau et de l'évolution des préoccupations environnementales. Le matériau bois a connu peu d'études au regard de la complexité de sa nature et de son comportement (matériau fortement anisotrope, non homogène, sensible à l'humidité, à résistance limitée, ...). Actuellement, les nouvelles technologies permettent de maîtriser et d'améliorer la qualité du bois et des produits dérivés manufacturés. Cependant, le développement de l'utilisation du matériau bois dans la construction est conditionné par la maîtrise du comportement des composants et de leurs assemblages. Les systèmes constitués de poteaux et de poutres peuvent être associés à des panneaux diaphragmes horizontaux ou verticaux. Ces panneaux remplissent des fonctions secondaires d'isolation et de séparation ou des fonctions mécaniques de reprise d'efforts verticaux ou horizontaux. Les résistances de ces diaphragmes dépendent de façon notable des caractéristiques de résistance et de déformation des liaisons entre leurs éléments constitutifs. Ainsi, le développement et l'optimisation des structures bois nécessitent la maîtrise du fonctionnement des assemblages et des liaisons. Les hypothèses simplificatrices relatives aux rigidités et aux résistances des assemblages adoptés dans les codes de dimensionnement des structures bois limitent les possibilités de ces structures.

La présente étude menée au sein de la plateforme Matériaux et Structures pour le Génie Civil (MSGC) de Polytech' Clermont Ferrand porte sur la caractérisation du comportement des liaisons dans les diaphragmes bois. Ainsi, un programme expérimental est réalisé sur des essais push-out d'assemblages cloués solives-panneaux avec différentes configurations. Des essais de caractérisation des matériaux sont aussi réalisés (solives, panneaux, clous). L'objectif est d'avoir des résultats expérimentaux qui permettent d'alimenter et de vérifier les modèles analytiques existants. Les modèles analytiques permettent de déterminer la raideur relative au glissement à l'interface entre panneau et solive en considérant les caractéristiques du clou et du bois. Cette étude permet de définir le comportement des liaisons en termes de rigidité et de résistance en comparant les résultats expérimentaux à la théorie de l'analyse limite de Johansen et les valeurs prescrites par l'Eurocode 5 (Norme européenne de conception et de calcul des structures en bois). Ces valeurs de rigidité sont définies pour être intégrées dans une analyse globale du comportement d'un panneau diaphragme en bois.

Mots Clés :

1 – Bois 2 – Liaison 3-Comportement 4 – Rigidité 5 - Diaphragme

Decroly DJOUBISSIE DENOUWE Mémoire de Master d'ingénierie Option Génie Civil - Juin 2013 Promotion [2012/2013]

v

### ABSTRACT

The use of wood in construction is experiencing a growing interest because of the intrinsic qualities of the material and changing environmental concerns. The wood material has been little research in terms of the complexity of its nature and behavior (highly anisotropic material, uneven, sensitive to moisture, limited strength ...). Currently, new technologies allow to control and improve the quality of timber and timber products manufactured. However, the development of the use of wood in construction is conditioned by controlling the behavior of components and their connections. The systems consist of columns and beams can be associated with vertical or horizontal diaphragms panels. The panels perform secondary functions of insulation and mechanical separation or recovery functions of vertical or horizontal forces. The resistances of these diaphragms depend significantly from characteristics of strength and deformation of the connections between their constituent elements. Thus, the development and optimization of wood structures require the control operation of the assemblies and connections. The simplifying assumptions about rigidity and resistance of assemblies adopted in design codes for timber structures limit the capabilities of these structures.

This study led within the platform and Materials for Civil Engineering Structures (MSGC) Polytech' Clermont-Ferrand focuses on the characterization of the behavior of fastener in wood diaphragms. Thus, an experimental program was performed on push-out tests of nailed joists-panels assemblies with different configurations. Characterization tests are also made of materials (joists, panels, nails). The aim is to have experimental results that provide power and check the existing analytical models. Analytical models to determine the relative stiffness slip at the interface between board and joist considering the characteristics of the nail and wood. This study helps to define the behavior of fasteners in terms of stiffness and strength by comparing the experimental results with the theory of limit analysis Johansen and values prescribed by the Eurocode 5 (European standard of design and calculation of timber structures). These stiffness values are set to be integrated into an overall analysis of the behavior of a wooden panel diaphragm.

#### Key words:

1 - Wood

2 – Fastener

3- Behaviour

4 – Stiffness

5- Diaphragm

### LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

#### > <u>SYMBOLES</u>

$a_{pan}$	:	Largeur de panneau
Α		Aire d'une section transversale
d	:	Diamètre des clous
$d_h$		Diamètre de tête de clou
Е	:	Module de Young
E <sub>b</sub>	:	Module de Young des barres semi-rigides
Ec	:	Module de Young des poutres de chaînage
$e_{connexion}$	:	Allongement de la diagonal du cadre (poutraison) due au glissement des connecteurs
$e_n$	:	Glissement de connecteur panneaux-poutraison, panneaux-cadre
Ep	:	Module de Young des panneaux
$f_{ax,k}$	:	Valeur caractéristique de la résistance à l'arrachement pour les clous
$F_{ax,Rk}$	:	Valeur caractéristique de la capacité d'arrachement axial d'un clou
$f_{h,bo,k}$	:	Valeur caractéristique de la portance locale pour l'élément bois
f <sub>h,pan,k</sub>	:	Valeur caractéristique de la portance locale pour l'élément panneau
f <sub>head,k</sub>	:	Valeur caractéristique de la résistance à l'enfoncement des clous
$F_{v,Rk}$	:	Valeur caractéristique de la capacité résistante par plan de cisaillement par clou
Fu	:	Force maximale des éprouvettes de cisaillement des connecteurs
Fy	:	Limite élastique analytique de plancher
Fl	:	Limite élastique expérimentale de plancher
G	:	Module de cisaillement
Gp	:	Module de cisaillement des panneaux (voiles travaillants)
hc	:	Hauteur des poutres de chaînage
$h_{pan}$	:	Longueur de panneau
hs	:	Hauteur d'une solive
Ι	:	Moment d'inertie en flexion
Ko	:	Rigidité axial d'un ressort
K <sub>ei</sub>	:	Rigidité en phase élastique de la connexion panneaux-poutraison au cycle i
$K_p$	:	Rigidité axial d'un ressort orienté en direction n.
K <sub>ser</sub>		Module de glissement
L	:	Longueur de plancher
M <sub>el</sub>	:	Moment élastique
$M_{pl}$	:	Moment plastique

:	Valeur caractéristique du moment d'écoulement plastique d'un clou
:	Charge repartie
:	Epaisseur du panneau
:	Hauteur de pénétration du clou
:	Epaisseur effective de cisaillement des panneaux
:	Effort tranchant maximal
:	Force moyenne sur chaque connecteur avec un espacement constant
:	Force de cisaillement maximal sur un connecteur
:	Largeur du plancher
:	Déflexion due au glissement des assemblages de continuité de chainage
:	Déflexion par l'effet de l'effort de cisaillement
:	Déflexion due à la semi-rigidité de la connexion panneaux-poutraison/ossature en bois
:	La déflexion par l'effet du moment fléchissant
:	Flèche maximale à mi- portée dans le plan de plancher
:	Facteur de dimensions des panneaux
:	Masse volumique du bois
:	Masse volumique moyenne
:	Masse volumique du panneau

#### > ABREVIATIONS

A.P.A.	:	American Plywood Association
EC5	:	Eurocode 5
N.E.H.R.P.	:	National Earthquake Hazards Reduction Program
S.D.P.W.S.	:	Special Design Provisions for Wind and Seismic

## SOMMAIRE

	11
	111
	1V
	V
ABSTRACT	vi
LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS	vii
SOMMAIRE	ix
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xii
INTRODUCTION	1
I- ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	4
1. BOIS ET LA CONSTRUCTION EN BOIS	4
1.1. Les craintes et les atouts du bois dans la construction	4
1.2. Caractéristique mécanique du bois	6
2. ASSEMBLAGES	8
3. PLANCHER DIAPHRAGME EN BOIS	11
II- OBJECTIF DE L'ETUDE	14
III- MATERIELS ET METHODES	17
1. MATERIELS DES ESSAIS	17
2. METHODES D'ETUDE EXPERIMENTALE	18
2.1. Etude expérimentale du bois	18
2.2. Etude du clou	20
2.3. Etude expérimentale de l'assemblage	21
3. METHODES ANALYTIQUES	25
3.1. Méthode analytique de prévision de la rupture des assemblages selon l'ec5	25
3.2. Méthode analytique proposée par l'APA	29
IV- RESULTATS ET ANALYSES	31
1. Résultats et analyses sur le bois	31
2. Résultats et analyses sur les clous	35
3. Résultats et analyses sur les éprouvettes	37
3.1. Résultats et analyses sur les éprouvettes de type cn	37
3.2. Résultats et analyses des éprouvettes de type cx	39
3.3. Résultats et analyses des éprouvettes de type cv	40
3.4. Comparaison des types d'éprouvettes	42
4. Résultat du calcul analytique de prévision de la rupture des assemblages selon l'EC5	43
5. Résultat de la méthode analytique proposée par l'APA	44
6. Analyse d'un plancher-diaphragme	45

V- CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	50
BIBLIOGRAPHIE	52
ANNEXES	55
Annexe 1 :	I

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques thermiques des matériaux (LY Dong, 2006)
Tableau 2 : Caractéristiques des éprouvettes issues du bois des poutres maitresses et des solives. 19
Tableau 3 : Caractéristiques des éprouvettes issues du bois des entretoises et des panneaux
Tableau 4. Equations simplifiées proposées par l'APA pour la détermination du glissement $e_n$ des
connecteurs dans les diaphragmes (APA, 2007)
Tableau 5 : Valeurs des contraintes maximales de traction sur les clous
Tableau 6 : valeurs des moments maximaux de flexion des clous
Tableau 7 : Valeurs des moments obtenus par des formules analytiques         36
Tableau 8 : Valeurs des paramètres des éprouvettes cn1 et cn2 pour un clou
Tableau 9 : Valeurs des paramètres des éprouvettes de type cx40
Tableau 10 : Valeurs des paramètres des éprouvettes de type cv       41
Tableau 11 : Récapitulatif des paramètres moyens des différents types d'éprouvettes
Tableau 12 : Caractéristiques géométriques et mécaniques des composantes du plancher

### LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Quantité d'énergie en Mégajoules(MJ) nécessaire pour produire une tonne
Figure 2 : coupes et axes dans un tronc
Figure 3 : Comportement du bois en traction / compression dans la direction longitudinale
Figure 4 : Différents types de clous
Figure 5 : Configuration typique d'un plancher-diaphragme en bois (FUENTES et al., 2011) 12
Figure 6: Pourcentage de participation de chaque terme sur la flèche totale du plancher
(FUENTES et al., 2011)
Figure 7 : Machine pour essais des matériaux18
Figure 8 : Clous utilisés pour l'étude
Figure 9 : Moment élastique et plastique de la section transversale du clou
Figure 10 : Configuration du plancher-diaphragme testé
Figure 11 : (a) photo montrant le mode de ruine observé sur le plancher, (b) Caractéristiques des
éprouvettes de type cn en centimètres22
Figure 12 : Montage expérimental de l'éprouvette cn1
Figure 13 : (a) photo montrant le mode de ruine observé sur le plancher, (b) Caractéristiques des
<i>éprouvettes de type cx en centimètres</i>
Figure 14 : Montage expérimental de l'éprouvette cx223
Figure 15 : (a) photo montrant le mode de ruine observée sur le plancher, (b) Caractéristiques des
éprouvettes de type cv en centimètres23
Figure 16 : Montage expérimental de l'éprouvette cv3
Figure 17 : Protocole de chargement pour les essais
Figure 18 : Paramètres considérés pour la caractérisation des essais
Figure 19 : comportement rigide-plastique idéalisé pour les matériaux de l'assemblage25
Figure 20 : les mécanismes de ruine proposés par l'EC5 pour les assemblages bois- bois et
panneaux - bois à un plan de cisaillement26
Figure 21 : Illustration du glissement de la connexion Panneaux-solives
Figure 22 : Courbes contraintes-déformations des éprouvettes de poutres
Figure 23 : Courbes contraintes-déformations des éprouvettes de solives
Figure 24 : Courbes contraintes-déformations des éprouvettes d'entretoises
Figure 25 : Corrélation entre la masse volumique et la contrainte maximale de compression des
<i>éprouvettes de poutres</i>
Figure 26 : Corrélation entre la masse volumique et la contrainte maximale de compression des
<i>éprouvettes de solives</i>

Figure 27 : Corrélation entre la masse volumique et la contrainte maximale de compression des
éprouvettes d'entretoises
Figure 28 : Eprouvette de bois en compression ;(a) Eprouvette Ent3 ; (b) Eprouvette Ent6
Figure 29 : Courbes contraintes-déformations des éprouvettes de panneaux
Figure 30 : Corrélation entre la masse volumique et la contrainte maximale de compression des
éprouvettes de panneaux
Figure 31 : Eprouvette de panneau en compression et après essai
Figure 32 : Courbes contraintes-déplacements des essais de traction sur les clous
Figure 33 : courbes moments-déplacements des essais de flexion des clous
Figure 34 : Comparaison des moments
Figure 35 : Courbes charge-glissement des capteurs de déplacement des éprouvettes cn1 et cn237
Figure 36 : courbes charge-glissement des éprouvettes cn1 et cn2 pour un clou, (a) glissement total
(b) 10 mm de glissement
Figure 37 : Eprouvettes cn après essai
Figure 38 : Courbes charges-glissements des éprouvettes de type cx pour un clou
Figure 39 : Eprouvette de type cx ; (a) décollement des fibres de bois massif pendant l'essai ; (b)
Configuration d'une éprouvette de type cx après essai40
Figure 40 : Courbes charges-glissements des éprouvettes de type cv
Figure 41 : Eprouvette de type cv après essai
Figure 42 : Courbes moyennes des trois types d'éprouvettes
Figure 43 : Rigidités moyennes des types d'éprouvettes
Figure 44 : Courbe charge-glissement obtenu par l'EC5
Figure 45 : Courbe charge-glissement proposée par APA
Figure 46 : Configuration du plancher
Figure 47 : Courbes Charge-glissement de l'assemblage bois-panneau pour un clou
Figure 48 : Courbes charges-glissements de l'APA et moyenne des éprouvettes cn

# INTRODUCTION

### **INTRODUCTION**

De nos jours, étant donné les problèmes d'environnement et d'économie d'énergie, l'usage du bois est en pleine croissance. En effet, le matériau répond favorablement à la norme Haute Qualité Environnementale lorsqu'il est adapté aux contextes économique et socio-culturel locaux. Le bois est le matériau du développement durable par l'excellence, tant par le caractère naturel et renouvelable de ses ressources que par ses qualités propres. La construction en bois est peu énergétivore, facile à entretenir, peu polluante, à de faibles nuisances, et est facilement recyclable(APA, 2007).

Contrairement à l'acier et au béton, le bois a été beaucoup moins développé pendant de longues années à cause de son origine naturelle (matériau fortement anisotrope<sup>1</sup>, non homogène, sensible à l'humidité, à résistance limitée, à courte portée, …). En conséquence, le nombre de construction en bois est resté assez limité. Aujourd'hui, à la suite de recherches plus approfondies, les nouvelles technologies permettent de maîtriser et d'améliorer la qualité du bois. Ajouté à son caractère écologique, son aspect esthétique et sa faible consommation d'énergie d'usinage, le matériau bois ne laisse pas les architectes et les concepteurs techniques indifférents. Ce qui lui a permis d'acquérir une certaine notoriété d'utilisation.

La croissance de construction en bois exige un haut niveau de compréhension et la maitrise du comportement de ses éléments constitutifs. Dans les structures, les assemblages constituent des zones singulières qui peuvent être caractérisés comme entités au même titre que les poteaux et les poutres. Cependant, l'analyse des poteaux et des poutres est relativement bien maîtrisée. Le problème demeure donc dans l'assemblage entre éléments où la grande diversité des configurations est un facteur qui rend complexe le développement d'une approche unique pour leur analyse. La connaissance du comportement des assemblages apparaît comme essentielle et est donc directement liée à la solidité, voire la pérennité de l'ouvrage.

Comme pour autre type de construction, le dimensionnement de la structure en bois doit être performant. Cela exige une estimation précise et fiable de la réponse des éléments structuraux susceptible de conduire une stabilité parfaite. Un élément parmi les plus importants dans une structure en bois est l'assemblage. L'assemblage est le résultat d'un changement de direction, d'une limite de longueur des éléments dans la structure ou d'une restriction de transport(LY Dong, 2006). C'est dans cette partie de la structure qu'une perturbation de transfert des efforts entre les éléments

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Dont les propriétés varient suivant les directions.

structuraux est rencontrée. L'assemblage est également associé à la présence de concentration de contraintes en raison des quelles la structure risque d'atteindre prématurément sa ruine.

La modélisation des liaisons bois – bois peut être classée selon quatre catégories : expérimentale, mécanique, numérique, ou analytique (XU Bohan, 2009). Les modèles basés sur les expériences s'appuient généralement sur l'interpolation et l'ajustement des courbes. Les essais utilisent généralement des efforts pondérés. Ce qui rend irréaliste la généralisation par extrapolation de leurs résultats. Les modèles purement empiriques, souvent difficiles à utiliser, contribuent peu à la compréhension globale des interactions complexes entre les différents paramètres influents sur le comportement des assemblages.

A la suite aux études entrepris au sein de la plate-forme Matériaux et Structures de Génie civil de Polytech' Clermont Ferrand de l'Université Blaise Pascal II, nous analysons dans ce projet, le comportement des liaisons dans le diaphragme. Ce genre de liaison fait intervenir 2 matériaux : l'acier et le bois. Ce dernier se présente sous 2 formes à savoir le bois massif et les panneaux de particules. La complexité de l'étude réside dans les nombreux paramètres à prendre en compte : la densité, le type de sollicitation. De plus, il est assez difficile de prévoir le comportement de ces assemblages.

Le premier point de ce mémoire comprend les généralités sur le bois, les assemblages et les planchers-diaphragmes. Nous présentons explicitement l'objectif de notre étude dans le deuxième point. Les deux autres points sont consacrés aux méthodes, aux résultats et aux analyses de l'étude expérimentale sur des assemblages par clous en simple cisaillement. Cet étude permettant de définir le comportement des liaisons en termes de rigidité et de résistance, ainsi que des essais complémentaires sur les matériaux bois et acier qui permettront par la suite de comparer les résultats expérimentaux à la théorie de l'analyse limite de Johansen et les valeurs prescrites par l'EC 5. Nous conclurons par des perspectives formulées à partir des connaissances acquises pendant le développement de cette étude.

# **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

### I- ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette partie propose une synthèse bibliographique sur les caractéristiques du bois, ses craintes et ses atouts dans la construction. Elle s'intéresse aussi à la description des assemblages dans les structures en bois et à la définition de la configuration d'un plancher-diaphragme en bois.

### 1. BOIS ET LA CONSTRUCTION EN BOIS

#### 1.1. Les craintes et les atouts du bois dans la construction

Le bois est un matériau naturel produit par les arbres à partir d'eau, de CO2 et de soleil [2]. En Amérique du nord, on dénombre 350 millions de maisons en bois et chaque année il s'en construit 2 millions de plus de la Floride au cercle polaire, en passant par les climats maritimes. Les pays de l'Europe de l'Est bénéficient aussi d'une longue tradition de maisons en bois ; plus 90% des maisons individuelles sont construites en bois du fait de la qualité d'isolation thermique. En Afrique, le bois est abondant dans certains pays, mais on peut affirmer que la construction en bois est quasi inexistante. Les raisons principales sont probablement culturelles d'une part, et liées à certaines craintes d'autre part. On peut citer :

• L'opposition présente dans notre inconscient culturel entre la pierre et le béton, utilisés pour la construction des demeures, et le bois, utilisé pour les baraquements, les constructions de type provisoire.

• La crainte du feu : le bois brûle, c'est évident. L'inflammabilité du bois est inférieure à celle de nombreux autres matériaux présents dans toutes les habitations. Le feu survenant dans l'installation électrique ou dans un appareil électroménager risque de trouver assez de combustible plastique à proximité immédiate sans avoir besoin de bois pour s'étendre. La résistance au feu des éléments en bois est prévisible (Franssen, 2007). La vitesse de propagation est constante, environ 0,8 mm par minute, ce qui confère aux poutres et colonnes de section suffisante une résistance au feu qui peut être supérieure à celle d'autres matériaux (Voir *Tableau 1*). Les éléments en bois de petite section, par contre, voient leur section assez rapidement consumé en totalité mais ils n'assurent généralement pas un rôle majeur dans la stabilité de la structure. Le bois absorbe beaucoup moins rapidement la chaleur que l'acier et le béton. L'analyse du *Tableau 1* montre que la conductivité du bois est 11 fois plus petite que celle du béton et 450 fois plus petite que celle de l'acier.

matériau	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	conductivité (W/mK)	chaleur spécifique (J/kg/K)	Inertie thermique <sup>2</sup> $(J/m^2.K^{-1}m^{1/2})$	
Acier	7850	45	600	211,95.10 <sup>6</sup>	
Béton normal	1800	1,15	1000	2,07.10 <sup>6</sup>	
bois	450	0,1	1118	$0,05.10^{6}$	

Tableau 1 : Caractéristiques thermiques des matériaux (LY Dong, 2006)

• Les craintes liées à la pérennité du matériau : le choix de l'essence est essentiel. Certaines essences possèdent une très bonne protection naturelle contre les attaques biologiques. Des traitements chimiques permettent de garantir la structure du bois contre toute agression de ses deux ennemis, les champignons et les insectes xylophages<sup>3</sup>. La conception et la mise en œuvre jouent aussi un rôle fondamental. La protection constructive du bois consiste à garantir la bonne ventilation des faces exposées à l'humidité. Tant que le bois n'atteint pas les 20% d'humidité permanente, il ne risque pas d'être attaqué par les champignons. Pour la réalisation des bâtiments courants en zone sismique, la construction bois présente de nombreux atouts. Sa capacité potentielle de dissipation dans les zones d'assemblage est un atout important.

La construction bois a aussi les avantages pour la société. Nous savons tous que la forêt joue un rôle irremplaçable pour la qualité de notre cadre de vie et de loisir et constitue un moyen efficace de limiter l'effet de serre lié à la surproduction du CO<sub>2</sub>. L'existence complète d'un arbre ne conduit à la disparition d'aucun atome de carbone de la terre. Le carbone pris à l'atmosphère par l'arbre lors de sa croissance est restitué à celle-ci après sa mort lorsqu'il pourrit ou qu'il soit détruit par le feu. Une forêt naturelle en équilibre rejette ainsi dans l'atmosphère, autant de carbone qu'elle n'en soustrait [1]. L'exploitation de la forêt responsable permet actuellement de retarder l'effet de serre par la prolongation de la période durant laquelle le carbone reste stocké dans le bois, durant toute la durée de vie du matériau. Le bois nécessaire à la fabrication d'une maison fixe ainsi le CO2 d'une file de 200 voitures « embouteillées » pendant une heure [1].

La construction en bois est le mode de construction le moins énergivore, tant pour la production de la matière première (voir *Figure 1*) [2], que pour le transport et sa mise en œuvre. Il s'agit d'une matière offerte par l'énergie solaire et renouvelable, à l'inverse des matériaux d'extraction et leurs dérivés. Si une scierie reste une usine, son impact sur l'environnement n'est pas ressenti de la manière que celui d'une aciérie ou d'une cimenterie.

 <sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Résistance au changement de température d'un matériau lorsque intervient une perturbation de son équilibre thermique
 3 Qui vivent dans le bois et s'en nourrissent



*Figure 1 : Quantité d'énergie en Mégajoules(MJ) nécessaire pour produire une tonne* 

#### 1.2. Caractéristique mécanique du bois

De par son origine naturelle, le bois est considéré comme un matériau vivant. Par conséquent, son organisation et sa structure conditionnent ses propriétés mécaniques. Ainsi, la coupe transversale du tronc d'un arbre montre une succession de couches concentriques d'accroissement annuel appelées cernes. Ce bois est formé de différents tissus ayant des fonctions différentes. Le tissu servant de soutien est appelé lignine. Elle est composée de cellules allongées parallèles groupées en faisceaux appelés fibres ou trachéides. Ces fibres sont orientées dans le sens du tronc de l'arbre en définissant le sens de fil.

De par la structure même du matériau, deux directions transversales peuvent être définies. La première appelée direction radiale coïncide avec la normale aux cernes. La deuxième appelée direction tangentielle correspond à une direction tangentielle aux cernes. À l'échelle macroscopique, le bois peut être considéré comme un milieu continu anisotrope ayant des hétérogénéités locales. Il est commun de considérer ces trois axes de symétrie géométrique comme des axes de symétrie matérielle en considérant une hypothèse de comportement orthotrope plan (voir *Figure 2*).



Figure 2 : coupes et axes dans un tronc

Les propriétés du bois présentent une grande variabilité selon ces 3 axes de symétrie. Une variabilité importante entre les différents arbres d'une même essence est également observée, ainsi qu'entre les différentes essences. L'*Annexe 1* présente les valeurs des caractéristiques de certaines

essences suivant les axes. De cette variabilité, s'en suit de grandes variations de qualité, la norme française EN 338 définit différentes classes (voir *Annexe 2*). Chaque classe étant définie par les valeurs minimums que doivent avoir les valeurs caractéristiques de diverses propriétés.

Dans le sens du fil, il y a une égalité entre les modules d'élasticité en traction, en compression et en flexion. Des limites d'élasticité et de rupture sont plus élevées en traction qu'en compression. Le bois sollicité en traction se caractérise par un comportement élastique fragile (voir *Figure 3*). En effet, au niveau local, la rupture se propage au sein des trachéides<sup>4</sup> qui ont subi une élongation. Cependant, en compression, la rupture se fait par flambement des fibres, par cisaillement ou par effet de traction transversale, dite ductile. La *Figure 3* présente la courbe contrainte-déformation du bois en traction et en compression dans la direction longitudinale.



Figure 3 : Comportement du bois en traction / compression dans la direction longitudinale

Dans la construction, il est possible de trouver :

- Des bois ronds constitués directement à partir de troncs ou de branche rectiligne que l'on a façonnés pour obtenir une forme cylindrique.
- Le bois scié l'un des plus utilisés
- Le bois lamellé collé désigné par BLC, à base de planches de résineux présenté par cinq classes de résistance dans le projet prEN 1194, voir Annexe 3.
- Des familles de panneaux : les contre-plaqués, les panneaux de fibres et de particules, les panneaux OSB, et plusieurs autres types spéciaux.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Suites de cellules servant de capillaires de conduction de la sève.

### 2. ASSEMBLAGES

Dans la construction, les assemblages peuvent se définir comme tout dispositif permettant d'assurer la liaison entre les barres ou les composants d'une structure et le transfert d'efforts entre les éléments d'une même structure. Au sein du dispositif d'assemblage, chacun des moyens utilisés à sa propre fonction, et un même élément d'assemblage peut assurer des fonctions différentes selon l'assemblage considéré (Nollet, 2002). Les assemblages en structure bois transmettent les efforts entre éléments par contact et frottement directs, par tiges métalliques, par connecteurs ou par embrèvements ou adhésif, lesquels sont utilisés de façon isolée ou simultanée. Chacun des moyens utilisés a sa propre fonction :

- transmettre les efforts du bois, soit directement entre pièces, soit vers un organe de répartition ; répartir et transmettre les efforts entre organes ou matériaux d'assemblages ;
- maintenir le dispositif d'assemblage ;
- supprimer les déplacements entre les organes d'assemblages et le bois afin d'augmenter la rigidité globale de l'assemblage ;
- renforcer localement le bois dans la zone d'assemblage consistant à augmenter la résistance du bois à la traction transversale et dans une moindre mesure au cisaillement.

Selon le type de transmission des efforts entre les éléments assemblés, les assemblages sont classés en trois groupes : transmission directe (pas d'organes d'assemblages entre les pièces de bois qui transmettent uniquement des efforts de compression), transmission par juxtaposition (surface de recouvrement commune à toutes les pièces assemblés pouvant transmettre des efforts de traction et de compression, des efforts tranchants et des moments fléchissants), et transmission indirect (ne possède pas de surface de recouvrement des pièces assemblées et les efforts de traction, de compression, les efforts tranchants et moments sont transmis par des éléments métalliques ou des colles) (voir *Annexe 4*).

Bien que les rôles de l'assemblage soient divers, le critère retenu est que l'assemblage doit transmettre les efforts apportés par les pièces et être capable de supporter les efforts parasites qu'il engendre. Les moyens d'assemblages sont classés suivant leurs procédés qui se réfèrent à une technologie. Quatre modes d'assemblages sont ainsi identifiés : bois sur bois ou traditionnel, mécanique, par collage et métallo-collé. L'*Annexe 4* présente les différents moyens et systèmes d'assemblages en structure bois classés suivant leur principe de transmission et la classification des assemblages selon leur géométrie.

Une liaison est définie comme l'ensemble des composants assurant le transfert des effets des actions appliquées entre les éléments d'une structure. Dans de nombreux cas, ce transfert s'effectue à l'aide de différents modes de liaison tels que les assemblages traditionnels (par embrèvements, à mi-bois et à enfourchement, à tenons et mortaises) (voir *Annexe 5*), les assemblages collés ou les assemblages mécaniques. Ces différents modes peuvent être utilisés seuls ou en combinaison selon la compatibilité des déformations. Les liaisons courantes correspondent soit à des assemblages traditionnels, soit à des assemblages mécaniques pouvant être réalisés à l'aide de nombreux types d'organes. Nous mettons, dans ce qui suit, un accent sur les assemblages mécaniques et plus particulièrement celui de type tige par clous.

#### Assemblage mécanique

Les moyens utilisés pour les assemblages mécaniques sont des organes individualisés à base d'acier et éventuellement de bois (gousset plans). C'est la plus grande famille des moyens d'assemblage pour le bois. Les organes classiques pour le mode d'assemblage mécanique sont répartis en deux groupes selon le mode de diffusion des efforts au sein du matériau bois pour assurer la liaison des éléments assemblés :

• un groupe réunissant les organes qui se caractérisent par la localisation des concentrations de contraintes en surface des pièces assemblées où on distingue les organes dits surfaciques tels que les connecteurs métalliques à dents ou les plaques métalliques clouées et les organes dits volumiques qui se distinguent des précédents par leur grande rigidité tels que les anneaux et les crampons. (Voir *Annexe 6*).

• un groupe principal correspondant aux organes linéiques de type tige traversant ou ancré dans le bois. Ils ont un fonctionnement analogue à celui d'une poutre sur appuis élastiques continus. Pour ces organes, les caractéristiques du comportement du bois en portance locale et du comportement en flexion des organes conditionnent le transfert d'effort. Les assemblages de type tige présentent une continuité de comportement qui est liée à la plus ou moins grande ductilité des tiges métalliques. Cette catégorie comprend les agrafes, les pointes, les vis, les boulons et les broches. Le point commun à tous ces derniers est que la force est transférée du matériau bois à l'assembleur par l'interface entre le bois et le fût de l'assembleur.

### Assemblage par organe de type tige : assemblages par pointes (Berrada, 2011)

Les pointes constituent le mode d'assemblage mécanique le plus traditionnel. L'assemblage cloué est un assemblage ductile typique qui est la raison principale pour la bonne résistance des maisons à ossature bois. La capacité portante prévue dans les codes est souvent régie par la déformation plutôt que la résistance. Selon les fabricants, les clous ou pointes sont disponibles dans de nombreuses dimensions, formes et matériaux. Les pointes lisses constituent l'organe le plus courant pour les assemblages bois. Elles sont également disponibles avec une section carrée ou une forme déformée (pointes torsadées, crantées, ...).



Figure 4 : Différents types de clous

Dans les structures en bois, les pointes sont utilisées principalement en simple cisaillement pour assembler des pièces latérales de bois, des panneaux dérivés ou des tôles d'acier. Pour des sollicitations de cisaillement, l'utilisation de clous carrés améliore la résistance de liaison.

Le fonctionnement de ces organes intègre deux modes de sollicitations :

- Par cisaillement à l'interface des pièces assemblées,
- Par arrachement des pointes.

Le comportement des assemblages cloués en cisaillement et à l'arrachement est affecté par le bois, la pointe, et l'état d'utilisation. En général, n'importe quelle variation de ces facteurs a un effet plus prononcé sur la résistance d'arrachement que sur la résistance de cisaillement. L'état de fonctionnement des assemblages cloués chargés latéralement ne dépend pas considérablement de la résistance à d'arrachement à moins que la grande déformation de distorsion soit tolérable.

Ces dernières années, les activités de recherche dans le domaine des assemblages se sont principalement concentrées sur deux aspects (Ly Dong, 2006) :

- L'évaluation des propriétés mécaniques d'un assemblage afin de prédire son comportement en termes de rigidité, résistance et ductilité ;
- L'analyse et la procédure de dimensionnement de la structure incluant le comportement des assemblages.

Vu que ces assemblages mécaniques sont souvent utilisés dans les structures en bois, il était nécessaire de réaliser des études de leur comportement. Il s'agit de l'interaction mécanique entre les connecteurs métalliques et le bois dont le comportement est connu comme fortement anisotrope et hétérogène. Ce dernier point est d'ailleurs une source de difficultés pour le développement complet de modèles analytiques simples qui peuvent prévoir le comportement complet d'un assemblage mécanique sur la base des caractéristiques mécaniques de ces éléments constitutifs.

### 3. PLANCHER DIAPHRAGME EN BOIS

Les planchers-diaphragmes en bois sont des structures non-monolithiques<sup>5</sup> et multi composants associant plusieurs éléments en bois de différentes caractéristiques mécaniques et géométriques afin d'obtenir une structure résistante et légère. Leur structure, composée de poutres en bois revêtues de panneaux qui constituent la surface d'exploitation, doit assurer la reprise des charges verticales (poids propre et exploitation) et des charges horizontales engendrées par le vent ou les accélérations sismiques. Son dimensionnement est généralement piloté par le fonctionnement sous charges verticales malgré la diversité des charges qu'il doit reprendre. Chaque élément jouant un rôle spécifique au regard de ses performances mécaniques dans le plan et dans la direction perpendiculaire. Les planchers-diaphragmes sont composés :

• Des solives qui sont des éléments en bois mise en œuvre transversalement sur la longueur du plancher et dimensionnés principalement pour résister aux charges verticales. Souvent en bois massif, elles sont parfois en BLC pour les planchers de grande largeur ou des charges d'exploitation élevées. La section et la disposition des solives sont déterminées afin d'optimiser la résistance en flexion hors plan du plancher.

• L'ensemble des solives est souvent encadré par des poutres de chaînage en bois afin de faciliter l'union entre le plancher et les murs de contreventement inférieurs et supérieurs. Selon la longueur du plancher, cette structure de chaînage est composée par plusieurs poutres qui doivent être connectées entre elles afin d'obtenir un élément mécaniquement continu, ainsi des assemblages de continuité sont souvent envisagés.

• La surface utile du plancher est donnée par des panneaux de revêtement à base de bois, comme par exemple des panneaux OSB, de particules ou de contreplaqué. Le principal objectif des panneaux étant de recevoir les charges verticales et de les transmette vers les solives, leur épaisseur est essentiellement déterminée par les charges verticales et par l'entraxe entre les solives. La distribution des panneaux peut suivre différentes formes et la plus courante est celle qui dispose les panneaux en quinconce. La taille des panneaux est petite vis à vis de la dimension du plancher, ainsi on trouve plusieurs lignes de discontinuité entre les panneaux. Pour les panneaux, leur épaisseur est calculée afin de favoriser le transfert des efforts verticaux vers les solives.

• En outre, des entretoises en bois sont souvent utilisées afin d'assurer la stabilité au déversement des solives. Ces entretoises ont généralement une section transversale plus petite que les solives afin de minimiser le poids propre du plancher. La *Figure 5* illustre le cas d'une configuration courante de plancher.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Ne formant pas un seul bloc.



Figure 5 : Configuration typique d'un plancher-diaphragme en bois (FUENTES et al., 2011).

Après une définition des différents termes clés, le paragraphe qui suit, est destiné à la présentation de l'objectif de notre étude.

### **II- OBJECTIF DE L'ETUDE**

### **II-OBJECTIF DE L'ETUDE**

Bien qu'un plancher diaphragme soit une structure relativement simple, son comportement mécanique dans le plan est complexe. Des phénomènes non-linéaires, tels que le comportement mécanique des assemblages, ou la mise en contact de composants sont à prendre en compte pour bien estimer la raideur dans le plan. Différentes approches existent pour l'étude de ces structures, en particulier des essais de configurations usuelles et la recherche de formules analytiques associées à ces configurations.

Pour développer une méthode de calcul des déplacements et de la rigidité des diaphragmes, plusieurs recherches ont été réalisées. Ces travaux ont considéré des modèles analytiques, de larges campagnes expérimentales et des approches numériques. Les expériences réalisées avec l'objectif de caractériser le comportement dans le plan des plancher-diaphragmes (Wescott, 2005 ; APA, 2007) ont révélé que les planchers montraient un comportement similaire à celui d'une poutre en I de grande hauteur, où les panneaux réagissent comme l'âme mobilisant la plupart des efforts de cisaillement, et due à leur position en extrémité, les chaînages correspondent aux semelles fonctionnant essentiellement sous efforts de flexion.

Lorsqu'un plancher-diaphragme peut être considéré comme une poutre en I de grande hauteur, simplement appuyée et soumise à une charge uniformément répartie, la flèche maximale à miportée dans son plan  $\Delta_{plancher}$ , peut être calculée comme la somme de la contribution individuelle de chaque élément structurel qui participe dans la déformation de la structure(ATC -7, 1981). Ainsi, on peut distinguer principalement trois sources de déflexion ; la déflexion par l'effet du moment fléchissant  $\Delta_{flexion}$ , la déflexion par l'effet de l'effort de cisaillement  $\Delta_{cisaillement}$ , et la déflexion dû à la connexion entre les composants. Cette dernière source peut être décomposé en : la déflexion dû à la semi-rigidité de la connexion entre les panneaux et le solivage  $\Delta_{connexion}$ , et la déflexion du au glissement des assemblages de continuité dans les poutres en chaînages  $\Delta_{chaînage}$ . De cette manière, la flèche d'un plancher-diaphragme peut être exprimée comme le montre l'équation suivante(Fuentes et al., 2011)

$$\Delta_{plancher} = \Delta_{flexion} + \Delta_{cisaillement} + \Delta_{connexion} + \Delta_{chaînage}$$
 Équation 1

Chaque terme de cette équation a été décrit en détail suivant la méthode analytique par Fuentes (Fuentes, 2013). Il le traduit ainsi par *l*'Équation 2, en considérant un plancher avec entretoises et connexion panneaux-solives de distribution uniforme.

$$\Delta_{plancher} = \frac{10qL^4}{384EAW^2} + \frac{qL^2}{8GWt_f} + \left[\frac{\sqrt{2}\cos\left(45^\circ - \arctan\left(\frac{a_{pan}}{h_{pan}}\right)\right)}{\sqrt{a_{pan}^2 + h_{pan}^2}\cos\left(90^\circ - 2\arctan\left(\frac{a_{pan}}{h_{pan}}\right)\right)}\right]Le_n + \frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta_n x}{2W} \qquad \acute{Equation 2}$$

Certains auteurs (APA, SDPWS, NEHRP) proposant aussi les équations simplifiées pour l'estimation de la flèche du plancher-diaphragme ont montré que la résistance et la raideur du plancher étaient fortement influencées par la rigidité de la connexion panneaux-poutraison. La figure découlant d'un calcul présenté par Fuentes illustre le pourcentage de participation de chaque terme sur la flèche totale d'un plancher de dimensions 3,60 m x 7,20 m soumis à une charge uniforme sur sa longueur de 5,5 kN/m.



Figure 6 : Pourcentage de participation de chaque terme sur la flèche totale du plancher (FUENTES et al., 2011)

Afin de bien d'estimer les propriétés mécaniques globales des diaphragmes, une analyse du comportement de cette connexion panneaux-poutraison est importante. L'objectif de notre étude est d'avoir des résultats expérimentaux qui permettent d'alimenter des modèles analytiques existants et numériques développés pour évaluer la réponse des planchers-diaphragmes en intégrant la semi-rigidité des liaisons panneaux-poutraisons et les natures de différents matériaux.

Le paragraphe suivant porte sur la présentation des matériels et des méthodes utilisés dans notre étude.

### **III- MATERIELS ET METHODES**

#### III- MATERIELS ET METHODES

Les recherches dans le domaine du comportement des assemblages en bois sont basées principalement sur l'exploitation des résultats expérimentaux. Ces résultats sont validés par des modèles théoriques tels que la théorie d'une poutre sur appuis continus, la théorie de l'analyse limite ou encore l'utilisation de la méthode des éléments finis. Il convient alors de dissocier l'étude de ces assemblages selon deux comportements : L'étude du comportement local permettant de quantifier l'état de contrainte ou de déformation au niveau des différents matériaux constituant l'assemblage, et l'étude du comportement global qui permet de connaître les caractéristiques de l'assemblage en termes de capacité résistante et de glissement, perspective de votre recherche.

Nous présentons dans cette partie de notre travail les différents matériels que nous avons utilisés pour les essais, ainsi que les méthodes utilisées pour l'interprétation des résultats. Il est aussi présenté la méthode analytique de prévision de résistance et de rigidité d'un assemblage cloué en cisaillement simple selon l'Eurocode 5, et la méthode analytique proposée par l'APA pour la détermination du glissement de la connexion panneaux-poutraisons.

#### 1. MATERIELS DES ESSAIS

Pour mener la partie expérimentale de notre étude, nous avons utilisé la machine pour essais de matériaux fabriquée par ZWICK/ROEL (voir *Figure 7 (a)*). Les systèmes d'essais ZWICK sont des systèmes universels. Ils sont conçus pour des demandes d'essais effectués d'après des normes nationales et internationales. Ses systèmes sont utilisés en contrôle qualité, mais aussi en recherche et développement où les spécifications des essais sont définis.

La machine pour essais de matériaux, communément appelé ZWICK, est composé d'un espace de travail et d'une unité de pilotage. L'espace de travail possède une traverse de socle et une traverse mobile pouvant effectuer une translation verticale par le biais d'un système électromécanique constitué d'une vis sans fin. L'unité de pilotage est constituée d'une électronique de mesure et de commande pouvant gérer et enregistrer jusqu'à dix capteurs de valeurs mesurées et les transmettre à un ordinateur, et d'une télécommande permettant de lancer et arrêter les essais, déplacer la traverse mobile.

Les essais de compression instantanée sur les assemblages sont réalisés au moyen du montage expérimental composé de :

✓ Quatre capteurs de déplacement : Les capteurs sont constitués d'un noyau palpeur et d'un tube. Le principe de mesure des capteurs est basé sur le principe de bobines différentielles. L'intérieur du tube contient deux enroulements de mesure disposés dans l'axe l'un après l'autre, formant ainsi demi pont inductif. Celui-ci est complété dans l'amplificateur à fréquence porteuse pour former un pont complet. La gamme de mesure de déplacement couvre les deux directions, à partir d'une position zéro jusqu'au déplacement nominal. En déplaçant le palpeur, les valeurs d'inductance des deux enroulements varient. La différence d'inductance correspond à la mesure du déplacement. La *Figure 7 (b)* illustre les capteurs de déplacement utilisés.

✓ Un capteur de force intégré à la ZWICK mesurant toutes les charges statiques et dynamiques en traction et en compression, et ceci quasiment sans déplacement.

Ces capteurs sont reliés à un ordinateur servant d'interface de communication et enregistrant les données pendant toute la durée de l'essai.





*(b)* 

*(a)* 

Figure 7 : Matériels d'essai (a)Machine pour essais des matériaux (b) Capteurs de déplacement

### 2. METHODES D'ETUDE EXPERIMENTALE

Les éprouvettes ont été testées pour caractériser le bois massif et les panneaux. Un échantillon de clous a été testé en vue de déterminer leurs caractéristiques réelles et ensuite comparer aux formules analytiques de calcul de structure. Et d'autre part, nous avons mis en place des éprouvettes de glissement suivant l'essai Push-out pour déterminer la résistance de la liaison en cisaillement des clous ainsi que le module de glissement.

### 2.1. Etude expérimentale du bois

Les propriétés mécaniques du bois sont des paramètres qui permettent la description du comportement de ce matériau, soit du point de vue élastique, soit du point de vue de sa résistance.

Plusieurs facteurs influent sur ces propriétés mécaniques : l'essence du bois, les conditions de croissance de l'arbre, la présence de singularités, l'orthotropie du bois, la masse volumique, l'humidité et la température. La norme EN 338 établit un système de classe de résistance d'utilisation générale pour les codes de calculs de structure. Elle donne, pour chaque classe, les valeurs caractéristiques des propriétés de résistance et de rigidité et les valeurs de masse volumique du bois massif (NF EN 338, 2008). En ce qui concerne les panneaux, leurs propriétés sont définies par la norme EN 312 (CTBA, 2007).

Afin de déterminer la classe du bois et des panneaux qui nous ont servi dans notre étude, nous avons prélevé des échantillons de bois. Nous avons ainsi constitué dix (10) éprouvettes de chaque constituant du diaphragme, que nous avons mesurées, pesées afin de connaître leur masse volumique et ensuite nous avons procédé à des essais de compression axiale. Les *Tableau 2* et *Tableau 3* présentent les caractéristiques géométriques des éprouvettes suivant les différents constituants du diaphragme.

Tableau 2 : Caractéristiques des éprouvettes issues du bois des poutres maitresses et des solives

Eprouvettes de poutres maitresses					Eprouvettes de solives					
Désignation	masse (g)	l1 (mm)	12 (mm)	l3 (mm)	Désignation	masse (g)	l1 (mm)	12 (mm)	13 (mm)	
<i>P1</i>	68,08	41,38	41,36	120	Sol1	73,57	40	41	120	11 12
P2	75,31	41,22	41,74	119,7	Sol2	89,32	40,16	41,24	119,74	
<i>P3</i>	77,3	41,18	40,86	120	Sol3	86,43	40,88	40,9	120	
P4	68,11	41,22	41,18	120,6	Sol4	79,08	40,4	41,1	120,12	13
P5	68,56	40,6	41	120,4	Sol5	86,98	40,9	39,88	119,82	
<i>P6</i>	71,46	41	41,68	120,46	Sol6	100,05	41	41,22	119,72	
<b>P</b> 7	68,31	40,88	40,92	120	Sol7	93,76	41,18	40,72	119,72	
<b>P8</b>	70,01	41,3	41,86	120,1	Sol8	80	40,68	41,08	120	
<b>P9</b>	66,13	40,5	41,54	120,5	Sol9	88,73	41,18	39,46	119,42	
P10	77,21	41,48	41,18	120,14	Sol10	86,75	40,7	40,92	119,82	

Tableau 3 : Caractéristiques des éprouvettes issues du bois des entretoises et des panneaux

Eprouvettes d'entretoises					Eprouvettes de panneaux					
Désignation	masse (g)	11 (mm)	l2 (mm)	l3 (mm)	Désignation	masse (g)	l1 (mm)	l2 (mm)	13 (mm)	
Ent1	66,77	39,54	39,58	120	Pan1	55,48	25	40,5	82,3	
Ent2	66,7	40,16	39,22	120	Pan2	51,6	25	40,6	81,58	12 11
Ent3	86,48	39,82	39,62	120	Pan3	51,47	25	40,4	82,56	
Ent4	62,47	39,62	39,52	120,48	Pan4	52,77	25	41,8	82,1	
Ent5	83,5	40	39,88	120	Pan5	49,92	25	39,42	81,5	13
Ent6	67,3	40,14	40,2	120	Pan6	50,87	25	40	81,8	and the second
Ent7	82,88	40	39,72	119,9	Pan7	49,85	25	39,4	82	
Ent8	81,55	40	39,46	119,9						-
Ent9	86,24	40	39,48	120,7						
Ent10	86,27	40	40	119,82						

#### 2.2. Etude du clou

Dans un assemblage par tiges, le bois exerce sur la tige des charges radiales. Les tiges mettent en évidence leur comportement en flexion, en particulier lorsque l'assemblage est chargé en cisaillement au-delà de sa limite de proportionnalité (XU Bohan, 2009). La résistance plastique de flexion de la tige est désignée comme sa résistance de limite plastique. La *Figure 9* montre la distribution des contraintes de flexion du clou. Le moment élastique et plastique sont calculés généralement par les Équation 3 et Équation 4. L'Équation 5 est celle proposé par l'EC5 pour le calcul du moment plastique caractéristique. Des essais de traction ont été réalisés sur quatre (4) clous en vue de déterminer la contrainte maximale en traction qui sera utilisé dans les équations 2 et 3. Aussi, des essais de flexions 3 points ont été réalisés sur quatre (4) clous donnant ainsi un moment de flexion qui sera comparé à ceux déterminés par les formules analytiques suivantes :

$$M_{el} = f_y \frac{\pi d^3}{32}$$

$$M_{pl} = f_y \frac{d^3}{6}$$
Équation 3
Équation 4

 $M_{v,Rk} = 0.3 f_u d^{2.6}$ 

Équation 5



Figure 8 : Clous utilisés pour l'étude



Figure 9 : Moment élastique et plastique de la section transversale du clou

#### 2.3. Etude expérimentale de l'assemblage

La zone d'assemblage est généralement considérée comme rigide ou rotulée sans tenir compte du comportement réel plutôt semi-rigide. Le comportement semi-rigide permet une répartition des sollicitations dans les éléments de structure. Il favorise également la dissipation d'énergie dans le cas des actions dynamiques alternées du genre sismique. L'étude du comportement global des liaisons bois-bois passe donc par la connaissance de leurs caractéristiques mécaniques. Pour cela, les courbes charges-glissements expérimentales (ou théoriques) permettent de déterminer plusieurs paramètres représentatifs de cet assemblage tels que la résistance, le glissement, la rigidité des différentes phases de comportement, ceci partant des éprouvettes de cisaillement confectionnées pour l'étude.

#### 2.3.1. Caractéristiques des éprouvettes de cisaillement

Après la réalisation de l'essai sur le plancher-diaphragme de dimensions 3,60 x 7,20 mètres présenté à la *Figure 10*, des observations ont été faites au niveau des assemblages les panneaux-solives, panneaux-entretoises, et panneaux-poutres maitresses concernant la manière à laquelle se produit la ruine à différentes sections du plancher. Ce qui nous a amené à confectionner des éprouvettes qui approcheraient au mieux ces modes de ruine afin de réaliser des essais élémentaires pour la caractérisation de ses liaisons. Les paragraphes suivants présentent les différents types d'éprouvettes confectionnées correspondant à la ruine des différentes sections du plancher.



### Figure 10 : Configuration du plancher-diaphragme testé

(*i*) Le premier type d'éprouvette cn de cisaillement longitudinal (voir *Figure 11*) correspond au mode de ruine caractérisé par le déplacement des clous parallèlement aux fibres du bois massif que nous avons observé plus régulier dans les liaisons panneaux-solives situées vers le centre du plancher et aussi au niveau des liaisons panneaux-entretoises se situant vers les extrémités du plancher. Ce type d'éprouvette est constitué des deux pièces latérales en panneaux de particules et d'une pièce centrale en bois massif avec une file de deux clous en simple cisaillement sur chaque face. L'éprouvette est réalisé de façon à avoir une poussée au vide du bois lors l'essai. Deux éprouvettes de ce type ont été confectionnées : cn1 et cn2.

Mémoire de Master d'ingénierie Option Génie Civil - Juin 2013



*(a)* 

<u>Figure 11 :</u> (a) photo montrant le mode de ruine observé sur le plancher, (b) Caractéristiques des éprouvettes de type cn en centimètres



Figure 12 : Montage expérimental de l'éprouvette cn1

(*ii*) Le second type d'éprouvette cx de cisaillement perpendiculaire correspond au mode de ruine caractérisé par le déplacement des clous perpendiculairement aux fibres de bois que nous avons observé au niveau des assemblages panneaux-solives se situant vers les extrémités du plancher. Comme le précédent, Ce type est constitué des deux pièces latérales en panneaux de particules et d'une pièce centrale en bois massif avec une file de deux clous en simple cisaillement sur chaque face. L'éprouvette est faite de sorte avoir une poussée au vide des panneaux lors de l'essai. Nous avons réalisé cinq (5) éprouvettes de ce type : cx1 - cx2 - cx3 - cx4 - cx5.



Figure 13 : (a) photo montrant le mode de ruine observé sur le plancher, (b) Caractéristiques des éprouvettes de type cx en centimètres


Figure 14 : Montage expérimental de l'éprouvette cx2.

(*iii*) Le troisième type cv de cisaillement perpendiculaire correspond au mode de ruine de liaison par rupture des panneaux et déplacement des clous perpendiculairement aux fibres du bois. Ce mode de ruine de liaison a été observé au niveau des extrémités des panneaux. Analogue aux deux précédents, Ce type d'éprouvette est constitué des deux pièces latérales en panneaux de particules et d'une pièce centrale en bois massif mais avec une file de trois clous en simple cisaillement sur chaque face. Six éprouvettes de ce type ont été confectionnées dont nous présentons les caractéristiques à la *Figure 15*.



Figure 15 : (a) photo montrant le mode de ruine observée sur le plancher, (b) Caractéristiques des éprouvettes de type cv en centimètres



Figure 16 : Montage expérimental de l'éprouvette cv3

### 2.3.2. Protocole d'essai

Le montage des essais consiste à appliquer un effort de compression sur les éprouvettes illustré par les *figures 12, 14 et 16* ci-dessus. Les essais d'assemblages sont réalisés en suivant le protocole défini par la norme EN 26 891 (NF EN 26891, 1991). Lors de ces essais, les glissements d'assemblage sont mesurés par quatre capteurs de déplacement à raison d'un capteur pour chaque extrémité de panneaux. Chaque capteur est disposé pour mesurer le glissement relatif entre le bois massif et les panneaux La loi de comportement charge-glissement permet à l'issu des essais de déterminer la rigidité et la résistance des assemblages. La *Figure 17* présente la procédure de chargement que nous avons mise en place.



Figure 17 : Protocole de chargement pour les essais

### 2.3.3. Méthode de détermination de paramètres de caractérisation des essais

Pour obtenir une base d'analyse et de comparaison avec le calcul analytique, la rigidité et la force sont considérées. Des valeurs de rigidité (module de glissement) sont définies : ( $K_o$ ), ( $K_e$ ) et ( $K_p$ ).

- ✓ une rigidité initiale Ko: déterminée à partir d'une régression linéaire sur les courbes chargeglissement entre 0,1 Fu et 0,4 Fu.
- ✓ une rigidité élastique Ke : déterminée à partir d'une régression linéaire sur l'étape de déchargement / rechargement.
- $\checkmark$  une rigidité en post-plastique ou en service Ky: étant le sixième de la rigidité initiale.
- ✓ une rigidité plastique *Kp* : déterminée à partir d'une régression linéaire au niveau de la partie du comportement plastique

Deux valeurs caractérisant la charge sont définies :

- ✓ la charge ultime (Fu) qui représente la charge maximale atteinte durant l'essai.
- ✓ La charge limite conventionnelle (*Fy*) définie par l'intersection entre la rigidité initiale et la rigidité tangente au niveau de la partie post-plastique *Ky*.
- ✓ La charge limite ( $F_l$ ) définie par l'intersection entre la rigidité initiale et la rigidité tangente au niveau de la partie plastique Kp.

La Figure 18 présente les différents paramètres de caractérisation des essais.



Figure 18 : Paramètres considérés pour la caractérisation des essais

## 3. METHODES ANALYTIQUES

Afin de déterminer la résistance et la rigidité de l'assemblage bois, les approches réglementaires et analytiques sont disponibles. Elles s'appuient principalement sur les démarches et principes de l'EC5, ainsi que sur des équations simplifiées pour la détermination du glissement des clous et des agrafes sous une sollicitation donnée que propose l'APA *The Engineered Wood Association*.

### 3.1. Méthode analytique de prévision de la rupture des assemblages selon l'ec5

L'EC5 adopte la théorie de l'analyse limite pour la résistance d'assemblages par tiges initialement réalisée par Johansen (1949) et étendue plus tard par Larsen (1973). L'objectif de cette théorie est de déterminer l'effort qui permet d'atteindre la fin du domaine de fonctionnement élastique de l'assemblage. Son principe général consiste en la détermination du mode de déformations cinématiques engendrant un effort minimal sur les pièces de l'assemblage. Cet effort définit une capacité limite de l'assemblage avec l'hypothèse d'un comportement rigide-plastique parfait de matériaux (STEP 1, 1996) illustré par la *Figure 19*.



Figure 19 : comportement rigide-plastique idéalisé pour les matériaux de l'assemblage

La résistance de l'assemblage est associée au développement d'un mécanisme de ruine et, plus exactement, du mécanisme le plus défavorable, d'un point de vue « résistance ». Le modèle utilise la géométrie de l'assemblage, la limite élastique de la tige et la résistance à l'enfoncement du bois pour prévoir la charge de rupture de l'assemblage. La limite de cette théorie est qu'elle prévoit seulement la charge de rupture et ne fait pas description de la rigidité de l'assemblage ou du déplacement pendant la rupture. L'EC5 (EN 1995-1-1, 2004) utilise ainsi ces équations pour déterminer les charges de rupture et indique les mécanismes de ruine à considérer dans les assemblages à un plan de cisaillement ou simple cisaillement, dont il est question dans notre étude.



Figure 20 : les mécanismes de ruine proposés par l'EC5 pour les assemblages bois- bois et panneaux - bois à un plan de cisaillement

D'après cette théorie, la rupture des assemblages en cisaillement est classée selon trois modes: mode I, mode II et mode III. Pour les assemblages bois sur bois en cisaillement simple, ces trois modes sont répartis selon six possibilités d'effondrement identifiées dans la *Figure 20*. Dans le mode I, le diamètre de la tige est assez rigide pour qu'elle reste droite pendant la rupture de l'assemblage. Si une pièce est plus mince que l'autre, la rotation de la tige (*Figure 20c*) sera évitée et la rupture sera selon les *Figures 20a* et *b*, où la tige est soumise à un déplacement parallèle dans la pièce la plus faible. Les ruptures du mode II et III interviennent si la charge sur la tige devient plus grande que celle de la rupture du mode I. Le mode II de rupture entraîne la plastification de la tige en seulement un point (*Figures 20 d* et *e*) tandis que le mode III de rupture provoque la plastification de tige dans chaque pièce (*Figure 20f*). Les modes de rupture des assemblages boisbois en double cisaillement et bois-métal en simple et double cisaillement y sont aussi définis mais nous ne les présenterons pas dans cette étude. Dans la suite, nous définissons les différents paramètres liées aux mécanismes de ruine.

### Valeur caractéristique du moment d'écoulement plastique du clou

En supposant que les pointes utilisées sont fabriquées à partir d'un acier dont la résistance en traction est supérieure à 600 N/mm<sup>2</sup>, l'*Équation 6*, d'après la formule 8.14 de l'EC5, donne la valeur caractéristique du moment d'écoulement plastique du clou à section circulaire.

$$M_{v,Rk} = 0.3 f_u d^{2,6}$$
 Équation 6

Decroly DJOUBISSIE DENOUWE

### Valeurs caractéristiques de la portance locale des éléments bois

La portance locale est obtenue à partir de la compression d'une tige métallique sur une éprouvette parallélépipédique en bois suivant un cycle de chargement prédéfini. L'EC5 (EN 1995-1-1, 2004) propose des formules approchant les valeurs de portance locale des éléments en bois en fonction du diamètre de la tige, l'épaisseur ou la masse volumique du bois.

### ✓ Panneaux

D'après la formule 8.21 de l'EC 5 relatif à la détermination de la valeur caractéristique de la portance locale pour les pointes dont les têtes ont un diamètre au minimum égale à 2d, on a

$$f_{h,pan,k} = 65 \ d^{-0.7} \ t^{0.1}$$
 Équation 7

### ✓ Bois massif

Le diamètre des pointes étant inférieur à 8 mm, il convient, d'après la formule 8.15 de l'EC5, que la valeur caractéristique de la portance locale du bois utilisé sans pré-perçage est la suivante :

$$f_{h,bo,k} = 0,082 \ \rho_{bo} \ d^{-0,3}$$
 Équation 8

✓ Calcul du rapport entre les portances locales des éléments d'assemblages

$$\boldsymbol{\beta} = \frac{f_{h,bo,k}}{f_{h,pan,k}}$$
 Équation 9

### Valeur caractéristique de la capacité à l'arrachement du clou

Le clouage étant perpendiculaire au fil, les pointes étant autres que lisses, tel que défini dans EN 14592 (EN 14592), d'après la formule 8.23 de l'EC5, la valeur caractéristique de la capacité à l'arrachement est donné par l'équation 9.

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} \ d \ t_{pen} \\ f_{head,k} \ d_h^2 \end{cases}$$
 Équation 10

Les résistances caractéristiques  $f_{ax,k}$ et  $f_{head,k}$  sont déterminées par essais conformément à EN 1382, EN 1383 et EN 14358 pour les pointes autres que lisses. Mais, nous avons utilisé les formules 8.25 et 8.26 de l'EC5 relatif au pointes lisses pour estimer ces résistances présenté par les équations 10 et 11.

$$f_{ax,k} = 20.10^{-6} * \rho_{bo}^2 \qquad \qquad \acute{Equation 11}$$

$$f_{head,k} = 70.10^{-6} * \rho_{pan}^2 \qquad \qquad \acute{Equation 12}$$

Ayant ainsi calculé les différentes valeurs ci-dessous, il convient de déterminer la valeur de la capacité résistance des pointes et de déduire le mode de rupture à partir de l'Équation 13 de la formule 8.6 de l'EC5 relatif aux organes en simple cisaillement

$$F_{v,Rk} = min \begin{cases} f_{h,pan,k} t_{pan}d \\ f_{h,bo,k} t_{pen}d \\ \frac{f_{h,pan,k} t_{pan}d}{1+\beta} \left[ \sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[ 1 + \frac{t_{pen}}{t_{pan}} + \left(\frac{t_{pen}}{t_{pan}}\right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_{pen}}{t_{pan}}\right)^2} - \beta \left( 1 + \frac{t_{pen}}{t_{pan}} \right) \right] \\ 1,05 \frac{f_{h,pan,k} t_{pan}d}{2+\beta} \left[ \sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,pan,k} d t_{pan}^2}} - \beta \right] + min \left( 15\% F_{v,Rk,d} ; \frac{F_{ax,Rk}}{4} \right) \\ 1,05 \frac{f_{h,pan,k} t_{pen}d}{1+2\beta} \left[ \sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,pan,k} d t_{pen}^2}} - \beta \right] + min \left( 15\% F_{v,Rk,e} ; \frac{F_{ax,Rk}}{4} \right) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,pan,k} d} + min \left( 15\% F_{v,Rk,f} ; \frac{F_{ax,Rk}}{4} \right) \\ \acute{Equation} 13 \end{cases}$$

Où  $F_{v,Rk,d}$ ,  $F_{v,Rk,e}$  et  $F_{v,Rk,f}$  sont respectivement les premiers membres de chacune des expressions.

### Glissement des assemblages

Pour les assemblages réalisés avec des pointes sans avant trous, il convient de prendre le module de glissement  $K_{ser}$  par plan de cisaillement et par organe pour une charge de service avec  $\rho_m$  en kg/m<sup>3</sup> et *d* en mm, tel que

$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} \frac{d^{0,8}}{30}$$
 [Équation 14]

Avec  $\rho_m = \sqrt{\rho_{bo} \cdot \rho_{pan}}$ 

### 3.2. Méthode analytique proposée par l'APA

En référence au glissement du connecteur  $e_n$ , l'APA propose des équations simplifiées pour déterminer le glissement des clous et des agrafes sous une sollicitation donnée. Ces équations ont été développées à partir des essais de cisaillement réalisés en 1952 (APA, 2007) et sont exprimées en fonction de la charge sur chaque connecteur, de la taille du connecteur, de la pénétration dans les solives et de la teneur en eau du bois. Le Tableau 4 synthétise les équations proposées par l'APA. La *Figure 21* illustre le glissement de la connexion entre le panneau et la poutraison dans le diaphragme.

Tableau 4 : Equations simplifiées proposées par l'APA pour la détermination du glissement en de	?S
connecteurs dans les diaphragmes (APA, 2007).	

	Pénétration	Charge maximale	Glissement approximé <i>e<sub>n</sub></i> [pouce]				
Connecteur	minimale (pouce)	$V_n$ (Livre/connecteur)	Bois vert h> 19%	Bois sec h< 19%			
Clou 6d	1-1/4	180	$\left(\frac{V_n}{434}\right)^{2.314}$	$\left(\frac{V_n}{456}\right)^{3.144}$			
Clou 8d	1-7/16	220	$\left(\frac{V_n}{857}\right)^{1.869}$	$\left(\frac{V_n}{616}\right)^{3.018}$			
Clou 10d	1-5/8	260	$\left(\frac{V_n}{977}\right)^{1.894}$	$\left(\frac{V_n}{769}\right)^{3.276}$			
Agrafe 14-ga	1 à 2	140	$\left(\frac{V_n}{902}\right)^{1.464}$	$\left(\frac{V_n}{596}\right)^{1.999}$			
Agrafe 14-ga	2	170	$\left(\frac{V_n}{674}\right)^{1.873}$	$\left(\frac{V_n}{461}\right)^{2.776}$			

 $V_n$  = Charge sur un connecteur.

Valeurs basées sur un panneau du type structural contreplaqué ou OSB, et des solives à densité supérieure ou égale à 0,5. Pour d'autres types de panneaux, il faut augmenter le glissement de 20%.



Figure 21 : Illustration du glissement de la connexion Panneaux-solives

Analyse du comportement des liaisons bois-bois dans le diaphragme

# **IV- RESULTATS ET ANALYSES**

### IV- RESULTATS ET ANALYSES

Nous présentons dans cette section les résultats des essais de compression du bois et des panneaux, les résultats des essais de traction et de flexions des clous, les résultats des essais de cisaillement réalisées sur les différentes configurations d'éprouvettes, et les résultats des méthodes analytiques. Nous faisons aussi une analyse par une description qualitative et quantitative des résultats et par comparaison des résultats des éprouves de cisaillement et des méthodes analytiques.

### 1. Résultats et analyses sur le bois

Les *Figure 22* à *Figure 24* montrent les courbes contraintes-déformations des éprouvettes issues des poutres (*Figure 22*), des solives (*Figure 23*), et des entretoises (*Figure 24*). Ces courbes ne nous permettent pas d'obtenir le module d'élasticité des différents éléments. En effet, les déformations obtenues ici peuvent être définies comme des déformations apparentes. Le dispositif mise en place lors de la réalisation des essais n'a pas permis l'élimination de l'effet de frettage et d'écrasement des bords des éprouvettes qui est un obstacle à notre analyse au sens du module d'élasticité à la compression du bois.



Figure 22 : Courbes contraintes-déformations des éprouvettes de poutres

Decroly DJOUBISSIE DENOUWE

Analyse du comportement des liaisons bois-bois dans le diaphragme



Figure 23 : Courbes contraintes-déformations des éprouvettes de solives



Figure 24 : Courbes contraintes-déformations des éprouvettes d'entretoises

Decroly DJOUBISSIE DENOUWE

Des *Figure 25* à *Figure 27*, nous pouvons observer la grande variabilité du bois massif. Il n'en ressort pas une assez bonne corrélation entre la masse volumique des éprouvettes et leur contrainte maximale de compression axiale. Ceci peut être dû à la présence des nœuds dans certaines éprouvettes. En effet, les nœuds, formés de fibres assez densifiés, augmentent la masse de l'éprouvette, mais constituent une section fragile du point de vu résistance. La *Figure 28* montre l'éprouvette Ent3 et l'éprouvette Ent6 sur la machine d'essai. On peut y observer une rupture au niveau de la partie haut de l'éprouvette Ent3 (*Figure 28 (a)*) due à la présence d'un nœud. Ent3, avec une masse volumique de 457 kg/m<sup>3</sup> (la plus grande de toutes les éprouvettes issues d'entretoises) n'enregistre qu'une contrainte maximale de 31,94 N/mm<sup>2</sup> (la plus petite).



Figure 25 : Corrélation entre la masse volumique et la contrainte maximale de compression des éprouvettes de poutres



Figure 26 : Corrélation entre la masse volumique et la contrainte maximale de compression des éprouvettes de solives



Figure 27 : Corrélation entre la masse volumique et la contrainte maximale de compression des éprouvettes d'entretoises



Figure 28 : Eprouvette de bois en compression ;(a) Eprouvette Ent3 ; (b) Eprouvette Ent6

Avec une masse volumique comprise entre  $250 kg/m^3$  et  $450 kg/m^3$ , donnant une moyenne 396 kg/m3 et un écart-type de 5,17 autour de moyenne, d'après le tableau de l'*Annexe 2* extrait de la norme EN 338, nous sommes en présence d'un bois massif de classe C20. Ce qui nous permet de pouvoir estimer les valeurs caractéristiques des propriétés du bois utilisé. En effet, la classe de résistance C20 regroupe les bois massif de masse volumique moyenne  $\rho_{mean} = 390 kg/m^3$ . Les éprouvettes mises en étuve pendant plus de 48 heures, nous ont permis de déterminer une humidité de 8,10 % en moyenne des éprouvettes.

Les panneaux de particules sont des éléments en bois artificiels. Ayant été soumis à des contrôles lors de leur fabrication, ces panneaux présentent une variabilité plus faible que celle du bois massif grâce à une dispersion et une homogénéisation des défauts locaux. On peut observer cette faible variabilité à travers la *Figure 29* qui présente les courbes contraintes-déformations des éprouvettes de panneaux. Nous pouvons noter une contrainte maximale moyenne de 8,40 N/mm<sup>2</sup> avec une dispersion de 0,28 des valeurs pour les 10 éprouvettes correspondant à 3% d'écart sur la moyenne (Figure 30).



Figure 29 : Courbes contraintes-déformations des éprouvettes de panneaux



Figure 30 : Corrélation entre la masse volumique et la contrainte maximale de compression des éprouvettes de panneaux

Pour les panneaux, la rupture survient lorsque les particules le constituant perdent leur cohésion illustrée par la *Figure 31* montrant une éprouvette de panneau sur la machine d'essai et après essai. Partant de la masse volumique moyenne, nous obtenons les caractéristiques de ces panneaux définies par la norme européenne (CTBA, 2007).



Figure 31 : Eprouvette de panneau en compression et après essai

# 2. Résultats et analyses sur les clous

A l'issu de l'essai de traction sur les clous, la force de traction et le déplacement de la traverse sont obtenus. La mesure du diamètre du clou donne 2,74 mm permettant d'avoir l'évolution des contraintes de traction. La *Figure 32* présente les courbes des contraintes en fonction du déplacement de la traverse de la machine d'essai. Les valeurs des contraintes maximales de traction sont regroupées dans le *Tableau 5*. On peut noter une valeur moyenne de **847,41 MPa** avec une dispersion de 3% des valeurs autour de celle-ci.



Figure 32 : Courbes contraintes-déplacements des essais de traction sur les clous

Tableau 5 : Valeurs des contraintes maximales de traction sur les clous

Traction											
Clou	Clou   1   2   3   4   Moyenne   Ecart-type   Cov %										
fu (MPa)	840,90	816,16	849,21	883,35	847,41	27,77	3,28				

D'autre part, les essais de flexion, nous ont conduit à obtenir les courbes des moments en fonction du déplacement de la traverse que présente la *Figure 33*. En effet, les essais allant jusqu'à la création d'une rotule plastique au mi-porté du clou, les moments sont obtenus à partir des calcul plastique de poutre sur deux appuis chargé à mi-porté. Le *Tableau 6* contient les valeurs des moments maximales de flexion obtenus pour les 4 clous testés avec une moyenne de 3129,84 N.mm



Figure 33 : courbes moments-déplacements des essais de flexion des clous

Tableau 6 : valeurs des moments maximaux de flexion des clous

Flexion										
Clou	1	2	3	4	Moyenne	Ecart-type	Cov %			
M_max (N.mm)	3148,49	2985,30	3093,73	3291,86	3129,84	127,53	4,07			

En considérant de la contrainte moyenne obtenu pour l'essai de traction, nous avons le *Tableau* 7 où figurent les moments obtenus à partir des *Équation 3, Équation 4* et *Équation 5*. La *Figure 34* montre ici que la formule proposé par l'EC5 pour la détermination du moment plastique des clous, le suréstime de 11%. Par contre, le moment plastique déterminé par calcul analytique voit diminuer le moment réel de 7%.

Tableau 7 : Valeurs des moments obtenus par des formules analytiques

$M_{el}$ (N.mm)	$M_{pl}$ (N.mm)	$M_{y,Rk}$ (N.mm)
1711,37	2905,31	3494,34



Figure 34 : Comparaison des moments

### 3. Résultats et analyses sur les éprouvettes

### 3.1. Résultats et analyses sur les éprouvettes de type cn

La *Figure 35* présente les courbes charge-glissement pour des éprouvettes *cn1* et *cn2* décrites par les capteurs. Nous pouvons voir une bonne cohérence entre ces courbes, ce qui montre le bon fonctionnement du dispositif de mesure mise en place lors de l'essai. La valeur de charge correspond à celle supportée par l'ensemble des quatre clous constituants chaque éprouvette. Ce type d'éprouvette présente une capacité ductile assez grande montré par la large amplitude de glissement de plus de 20 mm dans la partie plastique sans une réduction substantielle de la charge jusqu'à la rupture.



Figure 35 : Courbes charge-glissement des capteurs de déplacement des éprouvettes cn1 et cn2

On peut noter de la *Figure 36* montrant les courbes charges-glissements pour un clou des deux éprouvettes de type *cn* que leur rigidité initiale Ko est en moyenne de 1,32 kN/mm. Du *Tableau 8*, On peut aussi remarquer une diminution de la rigidité élastique Ke de 48% entre le premier cycle déchargement-chargement et le second cycle. Cette rigidité élastique se verra augmenter de 25% entre le second cycle déchargement-chargement et le troisième. Cette variation de rigidité, pas aisément observable sur les courbes, peut être due à la réduction de la surface de contact entre le panneau et le bois massif observé après le premier cycle et qui se verra augmenter après le second.

En effet, au cours de la réalisation des essais, nous avons observé une séparation entre le panneau et le bois massif pendant de la deuxième phase de chargement, pouvant générer une perte de frottement entre ces deux et par conséquent une perte de rigidité élastique au second cycle décharge-charge. Cette perte de frottement sera rattrapée lors de troisième phase de chargement, ce qui expliquerait l'augmentation de la rigidité.



Figure 36 : courbes charge-glissement des éprouvettes cn1 et cn2 pour un clou, (a) glissement total (b) 10 mm de glissement

Eprouvottos	Ko		Ke (kN/mm)		Ko	Кр	Fy	gy	Fl	gl	Fu	gu
Eprouvenes	(kN/mm)	Ke1	Ke2	Ke3	(kN/mm)	(kN/mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)
cn1	1,59	11,75	4,86	6,8	0,27	0,0019	0,74	0,36	2,02	1,17	2,1	32,43
cn2	1,04	5,9	4,19	4,58	0,17	0,0088	0,9	0,72	1,73	1,5	1,99	30,22
Moyenne	1,32	8,83	4,53	5,69	0,22	0,0054	0,82	0,54	1,88	1,34	2,05	31,33

Le *Tableau* 8 présente les différentes valeurs de rigidités, de charges et de glissements pour un clou des éprouvettes *cn1* et *cn2*. Nous pouvons noter une charge limite Fl de valeur 1,88 kN représentant 91% de la force ultime Fu égale à 2,05 kN et une charge conventionnelle Fy valant 0,82 kN prescrite par la norme EN 12512, de 40% de la charge ultime. Le glissement moyen obtenu pour ce type d'éprouvette est de 0,54 mm pour la charge conventionnelle et de 1,34 mm pour la charge limite. La *Figure 37* montre les éprouvettes de type *cn* après réalisation de l'essai.



Figure 37 : Eprouvettes cn après essai

### 3.2. Résultats et analyses des éprouvettes de type cx

La *Figure 38* montre les courbes charges-glissements des éprouvettes *cx* ainsi que les droites correspondant aux différentes rigidités Ko, Ky et Kp considérées pour notre analyse. Nous avons limité l'axe du glissement à une distance permettant de mieux observer le comportement des éprouvettes au niveau de la phase de début d'essai jusqu'à l'observation de la phase plastique.



Figure 38 : Courbes charges-glissements des éprouvettes de type cx pour un clou

Decroly DJOUBISSIE DENOUWE

Analyse du comportement des liaisons bois-bois dans le diaphragme

Les courbes complètes sont présentées en *Annexe 8*. La phase plastique est assez difficile à observer pour ce type d'éprouvettes. On observe sur ses courbes des zones de sinuosité ou des points de baisse brusque de charge. En effet, Ce type d'éprouvette étant fait de sorte à charger le bois massif dans le sens perpendiculaire aux fibres, ces points de baisse sont dus à la rupture perpendiculaire du bois au niveau de l'interface avec le clou. La *Figure 39* illustre le décollement de fibres du bois d'une éprouvette de type *cx* pendant l'essai et sa configuration après essai.

Eprouvettes	Ko	K	e ( <i>kN/m</i>	m)	Ку	Кр	Fy	gy	Fl	gl	Fu	gu
Lprouvenes	(kN/mm)	Ke1	Ke2	Ke3	(kN/mm)	(kN/mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)
cx1	0,64	3,36	2,75	-	0,11	0,042	0,75	1,02	0,97	1,37	1,41	12,15
cx2	0,91	5,88	1,93	-	0,15	0,064	0,69	0,64	0,76	0,72	1,43	11,47
cx3	0,87	4,87	3,25	1,26	0,14	0,056	1,00	0,99	1,25	1,28	1,76	12,21
cx4	0,86	2,94	2,13	-	0,14	0,095	0,69	0,67	0,84	0,85	1,58	9,28
cx5	0,81	3,34	1,8	-	0,13	0,036	0,75	0,79	1,14	1,27	1,46	10,1
Moyenne	0,82	4,08	2,37	1,26	0,13	0,059	0,78	0,82	0,99	1,10	1,53	11,04
Ecart-type	0,11	1,25	0,61	-	0,02	0,023	0,13	0,18	0,20	0,29	0,15	1,30

Tableau 9 : Valeurs des paramètres des éprouvettes de type cx



Figure 39 : Eprouvette de type cx ; (a) décollement des fibres de bois massif pendant l'essai ; (b) Configuration d'une éprouvette de type cx après essai

### 3.3. Résultats et analyses des éprouvettes de type cv

La *Figure 40* montre les courbes charge-glissement pour un clou des éprouvettes de type *cv* pour un seuil de glissement. Ces courbes sont présentées entièrement en *Annexe 9*. Contrairement au type *cv*, ces courbes ont un aspect assez lisse.



Decroly DJOUBISSIE DENOUWE



### Analyse du comportement des liaisons bois-bois dans le diaphragme

Figure 40 : Courbes charges-glissements des éprouvettes de type cv

Le *Tableau 10* présente les valeurs des paramètres des éprouvettes de type cv. On peut y noter une valeur moyenne de la charge limite Fl de 1,08 kN engendrant un glissement gl de 0,55 mm. La charge ultime Fu moyenne vaut 1,63 mm avec un glissement de 8,13 mm. La rigidité élastique décroît entre chaque cycle de charge-décharge passant en moyenne de 4,67 kN/mm au premier cycle à 3,26 kN/mm au troisième cycle.

Eprouvettes	Ko ( <i>kN/mm</i> )	Ke1	e ( <i>kN/n</i> Ke2	ım) Ke3	Ky (kN/mm)	Kp (kN/mm)	Fy (kN)	gy (mm)	Fl (kN)	gl (mm)	Fu (kN)	gu (mm)
cv1	1,47	8,18	4,93	3,911	0,25	0,074	0,84	0,49	1,1	0,68	1,66	8,99
cv2	1,73	4,05	3,1	3,4	0,29	0,072	0,87	0,45	1,29	0,69	1,73	8,39
cv3	1,64	4,37	3,49	2,75	0,27	0,092	0,71	0,39	0,94	0,53	1,66	9,59
cv4	2,52	4,95	4,54	3,56	0,42	0,104	0,70	0,26	0,99	0,37	1,76	9,6
cv5	1,52	3,01	2,58	2,63	0,25	0,077	0,82	0,46	1,15	0,68	1,48	5,6
cv6	2,52	3,47	3,44	3,32	0,42	0,101	0,70	0,25	0,99	0,37	1,51	6,59
Moyenne	1,90	4,67	3,68	3,26	0,32	0,087	0,77	0,38	1,08	0,55	1,63	8,13
Ecart-type	0,49	1,85	0,89	0,49	0,08	0,014	0,08	0,1	0,13	0,15	0,11	1,67

Tableau 10 : Valeurs des paramètres des éprouvettes de type cv

Pour ce type d'éprouvette, la rupture s'observe au niveau des panneaux. En effet, la tête de clou étant sollicitée vers l'intérieur des panneaux, le corps pousse le bord des panneaux au vide. En conséquence, une rupture par traction locale se produit aux bords des panneaux. La *Figure 41* montre une éprouvette de type cv après essai laissant observer cette rupture.



Figure 41 : Eprouvette de type cv après essai

### 3.4. Comparaison des types d'éprouvettes

Comme le montre la *Figure 42*, le type *cn* d'éprouvettes présente une capacité ductile considérable, ce qui n'est pas le cas pour les types *cx* et *cv*. Cette ductilité est importante pour le comportement global du plancher dans la mesure où les liaisons possédant ce comportement ductile vont se déformer sans atteindre leur rupture, permettant ainsi une distribution de charge aux liaisons n'ayant pas encore atteint leur charge maximale de résistance.



Figure 42 : Courbes moyennes des trois types d'éprouvettes

Tableau 11 : Récapitulatif des paramètres moyens des différents types d'éprouvettes

Туре	Ko Ke (kl		e (kN/mr	n)	Ky	Кр	Fy	gy	Fl	gl	Fu	gu
d'Eprouvettes	(kN/mm)	Kel	Ke2	Ke3	(kN/mm)	(kN/mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)
cn	1,32	8,83	4,53	5,69	0,22	0,0054	0,82	0,54	1,88	1,34	2,05	31,33
сх	0,82	4,08	2,37	1,26	0,13	0,059	0,78	0,82	0,99	1,10	1,53	11,04
cv	1,90	4,67	3,68	3,26	0,32	0,087	0,77	0,38	1,08	0,55	1,63	8,13

La *Figure 42* montre les courbes moyennes des trois types d'éprouvettes testés. Nous notons que le type *cx* est le moins résistant. Les liaisons de comportement type *cx* sont susceptibles de réduire considérablement la capacité résistante de la structure globale du plancher. Le *Tableau 11* récapitule les valeurs moyennes des caractéristiques des trois types d'éprouvettes. Sur *Figure 43*,

nous pouvons observer que les éprouvettes de types cx sont en moyenne les moins rigides que ce soit en rigidité initiale Ko qu'en rigidité élastique Ke.



Figure 43 : Rigidités moyennes des types d'éprouvettes

# 4. Résultat du calcul analytique de prévision de la rupture des assemblages selon l'EC5

### Calcul de la valeur caractéristique du moment d'écoulement plastique du clou

 $f_u = 847,41 N/mm^2$  Obtenue par essai traction sur les pointes, de l'Équation 6, on obtient

$$M_{y,Rk} = 0.3 f_u d^{2,6} = 0.3 * 841.41 * (2.74)^{2,6} = 3494.35 N.mm$$

Calcul des valeurs caractéristiques de la portance locales des éléments

✓ Panneaux

Avec d = 2,74 mm diamètre mesuré des clous,  $t_{pan} = 25 mm$  l'épaisseur des panneaux, l'*Équation* 7 donne

$$f_{h,pan,k} = 65 \ d^{-0.7} \ t_{pan}^{0.1} = 65 \ * (2,74)^{-0.7} \ * \ 25^{0.1} = 44,28 \ N/mm^2$$

✓ Bois massif

Des essais sur le bois, nous avons obtenus  $\rho_{bo} = 434,8 kg/m^3$  valeur moyenne des masses volumiques des éprouvettes du type solive. Ainsi, de l'Équation 8

$$f_{h,bo,k} = 0,082 \ \rho_{bo} \ d^{-0,3} = 0,082 * 434,8 * \ (2,74)^{-0,3} = 26,35 \ N/mm^2$$

✓ le rapport entre les portances locales des éléments d'assemblages est obtenu de l'Équation 9

$$\boldsymbol{\beta} = \frac{f_{h,bo,k}}{f_{h,pan,k}} = \frac{26,35}{44,28} = \mathbf{0}, \mathbf{59}$$

### Calcul de la valeur caractéristique de la capacité à l'arrachement du clou

Les résistances caractéristiques  $f_{ax,k}$  et  $f_{head,k}$  sont déterminées par les équations 11 et 12

$$f_{ax,k} = 20.10^{-6} * \rho_{bo}^2 = 20.10^{-6} * 434,8^2 = 3,76 N/mm^2$$
  
$$f_{head,k} = 70.10^{-6} * \rho_{pan}^2 = 70.10^{-6} * 625,9^2 = 27,42 N/mm^2$$

Avec  $d_h = 6,5mm$  obtenue par mesure de la tête des pointes, et  $t_{pen} = 80 - 25 = 55 mm$  on a alors :

$$F_{ax,Rk} = \begin{cases} f_{ax,k} \ d \ t_{pen} \\ f_{head,k} \ d_h^2 \end{cases} = \begin{cases} 3,76 * 2,74 * 55 = 566,6 \\ 27,42 * 6,5^2 = 1158,5 \end{cases}$$

Decroly DJOUBISSIE DENOUWE

Analyse du comportement des liaisons bois-bois dans le diaphragme

### D'où $F_{ax,Rk} = 566, 6 N$

Ayant ainsi calculé les différentes valeurs ci-dessus, il nous convient de déterminer la valeur de la capacité de résistance des pointes et de déduire le mode de rupture. On a donc :

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} 3 \ 033,6\\ 3 \ 970,9\\ 1 \ 520,0\\ 1 \ 225,5\\ 820,9\\ 1 \ 051,9 \end{cases}$$
$$F_{v,Rk} = 820,9 \ N$$

Nous pouvons ainsi prévoir une rupture de mode II entrainant une plastification en un point du clou au niveau la section située dans le panneau.

#### Module de glissement des assemblages

On a  $\rho_m = \sqrt{\rho_{bo} \cdot \rho_{pan}} = \sqrt{434,8 * 625,9} = 521,7 \ kg/m^3$  où  $\rho_{pan} = 625,9 \ kg/m^3$  est la valeur moyenne de la masse volumique des panneaux obtenue lors des essais de caractérisation. Il nous revient alors

$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} \frac{d^{0,8}}{30} = 521,7^{1,5} \frac{2,74^{0,8}}{30} = 889,6 \frac{N}{mm} = 0,889 \ kN/mm$$

Des valeurs de la capacité de résistance des pointes et du module de glissement, nous avons la Figure 44 présentant la courbe de charge en fonction du glissement de l'assemblage.



Figure 44 : Courbe charge-glissement obtenu par l'EC5

### 5. Résultat de la méthode analytique proposée par l'APA

Le Tableau 4 étant conçu à partir des unités du système anglophone, les dimensions des clous utilisés dans notre étude s'identifient beaucoup plus au connecteur clou 8d de ce tableau. Nous avons alors la formule du glissement en fonction de la charge donnée par :

$$e_n = \left(\frac{V_n}{616}\right)^{3.018}$$

Avec la charge maximale  $V_n = 220 \ lbf = 0.978 \ kN$ , nous obtenons ainsi la courbe de la *Figure 45*.



Figure 45 : Courbe charge-glissement proposée par APA

### 6. Analyse d'un plancher-diaphragme

Nous nous sommes donnés ici d'effectuer le calcul de la flèche à mi- portée dans le plan d'un plancher de 4,80m de long et de 3 m de large par la méthode analytique présentée par l'Équation 2 dans la partie objectif en tenant compte de la liaison semi-rigide panneaux-poutraison. Ce plancher est appuyé sur sa largeur à 2 murs rigides. Nous considérons une charge de 7,5 kN/m repartie sur toute la longueur du plancher. La *Figure 46* illustre la configuration géométrique du plancher. Le *Tableau 12* récapitule les principales caractéristiques géométriques et mécaniques de ces composantes résultant des essais de caractérisation. Le clouage des panneaux sur le cadre est considéré tous les 10 cm.



Figure 46 : Configuration du plancher

	Solives, Chaînages	Entretoises	Panneaux
a (Largeur)	7,5 [cm]	7,5 [cm]	0,6 [m]
h (Hauteur)	22,5 [cm]	15 [cm]	2,4 [m]
t <sub>f</sub> (épaisseur)	-	-	2,5 [cm]
E (module d'Young)	$9,5.10^{6} [kN/m^{2}]$	$9,5.10^{6} [kN/m^{2}]$	$2,7.10^{6}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
G (module de cisaillement)	-	-	770 000 [kN/m <sup>2</sup> ]

Le calcul sera fait suivant différents étapes en fonction de la contribution individuelle de chaque élément structurel participant la déformation de la structure.

### • Déflexion due au moment fléchissant

Pour ce terme, il est supposé que la contribution des entretoises et des panneaux sur l'inertie flexionnelle du plancher est négligeable dans l'hypothèse que le plancher réagit comme une poutre en I de grande hauteur où le moment fléchissant est repris principalement par les semelles.

$$\Delta_{flexion} = \frac{10qL^4}{384E_{ch}A_{ch}W^2} = \frac{10*7,5\left[\frac{kN}{m}\right]*4,8^4[m]^4}{384\left(9,5*10^6\left[\frac{kN}{m^2}\right](0,225*0,075)[m]^2*3,0^2[m]^2\right)}$$
$$= 7,18.10^{-5}[m]$$

### • Déflexion due à l'effort tranchant

L'hypothèse simplificatrice pour ce terme est que l'effort tranchant est uniquement repris par les panneaux et qu'il n'existe pas des discontinuités. Ainsi, on a

$$\Delta_{cisaillement} = \frac{qL^2}{8G_{pan}Wt_f} = \frac{7.5\left[\frac{kN}{m}\right] * 4.8^2[m^2]}{8 * 770\ 000\ \left[\frac{kN}{m^2}\right] * 3.0[m] * 0.025[m]} = 3.74.10^{-4}[m]$$

### • Déflexion due au glissement de la connexion panneau-poutraison

Ce point fait l'objet principal de notre analyse. Nous utiliserons ici les résultats obtenus des essais de cisaillement présentés plus haut. La *Figure 47* présente les différentes courbes chargeglissement de l'assemblage bois-panneau que nous avons obtenu par les essais expérimentaux et par les formules analytique existantes. Les courbes *cn*, *cx* et *cv* sont les courbes moyennes des éprouvettes des configurations respectives.



Figure 47 : Courbes Charge-glissement de l'assemblage bois-panneau pour un clou ;(a)courbes entières ; (b) Détail A

Pour notre analyse, les courbes *cx, cv* et Analytique EC5 ne sont pas utilisées. En effet, l'hypothèse d'établissement de la contribution du glissement du clou dans la flèche du plancher est définie par une distribution des efforts sur les connecteurs dans le sens longitudinal parallèle aux fibres du bois

et aux bords des panneaux. Néanmoins, les courbes cx et cv sont utilisées pour un modèle numérique. Ainsi, notre analyse s'articulera sur la courbe proposée par l'APA et la courbe moyenne des éprouvettes de type cn illustrées par la *Figure 48*.



Figure 48 : Courbes charges-glissements de l'APA et moyenne des éprouvettes cn

De la *Figure 48*, nous pouvons voir que la courbe de l'APA se situe au-dessus de la courbe moyenne obtenu expérimentalement. Ceci laisse dire que pour une charge donnée inférieure ou égale à la charge max de l'APA moins d'un kilo Newton, le glissement proposé par l'APA est inférieure au glissement donné par les essais.

Afin de déterminer la flèche due au glissement des clous, tout d'abord on doit calculer la force maximale qui sollicite les clous. Une méthode approchée proposée par l'APA [APA, 2007] pour calculer cette force consiste à diviser l'effort de cisaillement maximal v par le nombre de clous contenus dans une unité de longueur. On calcule l'effort de cisaillement maximal  $V_{max}$  (réactions d'appuis) selon l'*[Équation* 15, et on détermine l'effort de cisaillement maximal pour unité de longueur de mur d'appui v selon l'*[Équation* 16.

$$V_{max} = \frac{qL}{2}$$

$$v = \frac{V_{max}}{W}$$
[Équation 15]  
[Équation 16]

De cette manière, *v* est égale à :

$$v = \frac{7.5 \left[\frac{kN}{m}\right] 4.8[m]}{2 * 3[m])} = 6 \left[\frac{kN}{m}\right]$$

Ainsi, la force sur un clou est égale à :

$$V_n = \frac{v}{N^{\circ} \ clous} = \frac{6\left[\frac{kN}{m}\right]}{10\left[\frac{clou}{m}\right]} = 0.6\left[\frac{kN}{clou}\right]$$

Decroly DJOUBISSIE DENOUWE

Pour déterminer le glissement d'un clou, nous nous proposons d'utiliser les équations de régression des courbes charges-glissement de la *Figure 48*. Il vient alors,

Par la courbe *cn*  

$$e_n = \left(\frac{0.6 \left[\frac{kN}{clou}\right]}{0.7997}\right)^{\frac{1}{0.357}} = 0.44[mm]$$
Par l'APA  

$$e_n = \left(\frac{0.6 \left[\frac{kN}{clou}\right]}{0.9783}\right)^{\frac{1}{0.3181}} = 0.21[mm]$$

Calcul du facteur  $\beta$ 

$$\beta = \left[\frac{\sqrt{2}\cos\left(45^{\circ} - \arctan\left(\frac{0,6[m]}{2,4[m]}\right)\right)}{\sqrt{0,6^{2}[m]^{2} + 2,4^{2}[m]^{2}}\cos\left(90^{\circ} - 2\arctan\left(\frac{0,6[m]}{2,4[m]}\right)\right)}\right] = 1,042\left[\frac{1}{m}\right]$$

Ainsi, la déflexion due au glissement de la connexion est :

### Par la courbe cn,

$$\Delta_{connexion} = \beta Le_n = 1,042 \left[\frac{1}{m}\right] * 4,8[m] * 0,44[mm] = 2,20[mm]$$
Par l'APA,  

$$\Delta_{connexion} = \beta Le_n = 1,042 \left[\frac{1}{m}\right] * 4,8[m] * 0,21[mm] = 1,05[mm]$$

Selon l'*Équation 1*, la flèche totale du plancher est égale à la somme des contributions du moment fléchissant, de l'effort de cisaillement, du glissement des clous et du glissement d'assemblage des chaînages. Nous n'avons pas considéré l'existence d'assemblage au niveau des chaînages. Ainsi, la flèche totale du plancher est :

# Par la courbe cn, $\Delta_{plancher} = 7,18.10^{-2}[mm] + 3,74.10^{-1}[mm] + 2,20[mm] = 2,64[mm]$ Par l'APA,

$$\Delta_{plancher} = 7,18.10^{-2}[mm] + 3,74.10^{-1}[mm] + 1,05[mm] = 1,49[mm]$$

Le calcul de la déflexion totale du plancher, ainsi fait, nous pouvons remarquer que le modèle proposé par l'APA pour le calcul du glissement panneau-poutraison tend à surestimer la raideur de ce dernier. Pour notre cas d'application, nous constatons que la valeur de la déflexion obtenue par les résultats d'essais se voit réduit de 43% pour la valeur de l'APA.

# **V- CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

# **V- CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

La déflexion d'un plancher-diaphragme en bois considéré travaillant comme une poutre en I de grande hauteur, est fortement influencée par la connexion entre les panneaux et les poutres constituant le plancher. Notre analyse portant sur le comportement des liaisons bois-bois dans le diaphragme a consisté à la caractérisation du comportement réel semi-rigide de cette connexion panneaux-poutraison. L'analyse du comportement des liaisons bois nécessitant la prise en compte des caractéristiques mécaniques des matériaux assemblés, les essais de caractérisation ont été effectués sur le bois, les panneaux et les clous utilisés.

Les résultats des essais effectués sur différentes configurations d'éprouvettes de cisaillement ont permis d'alimenter un modèle numérique sur l'étude du comportement mécanique des planchers diaphragmes en bois du point de vue semi-rigidité et résistance pour une situation sismique. Une analyse visant à définir les propriétés mécaniques en termes de rigidité et de résistance, représentant au mieux la connexion panneaux-poutraison dans le diaphragme a été réalisée. Cette analyse nous emmène à dire que les règles normatives données par les codes représenteraient mieux le comportement des assemblages, néanmoins, une étude plus poussée permettrait de mieux définir ce comportement permettant ainsi un dimensionnement de manière optimal de la structure.

L'approche expérimentale est fondamentale dans l'analyse du comportement d'un assemblage. Elle nécessite une mobilisation d'assez de ressource contrairement aux approches numériques et analytiques. On peut projeter ainsi de développer un modèle analytique pour les différents types d'éprouvettes testés dans ce mémoire, représentant le comportement réel de la connexion panneaux-poutraison à chaque zone du plancher-diaphragme en bois que l'on pourrait intégrer dans un programme d'éléments finis pour l'analyse du comportement globale d'un diaphragme en bois.

Sur la base de l'analyse comparative entre les résultats des essais expérimentaux et les formules analytiques existantes, il peut être envisagé d'effectuer les études visant à définir un modèle analytique de calcul de déflexion du plancher-diaphragme en bois prenant en compte les différentes directions du glissement des liaisons entre les panneaux et le cadre en bois et leur comportement semi-rigide. En plus, en s'orientant vers une démarche de développement durable, l'on pourrait également faire une évaluation de la faisabilité technico-économique d'une solution en panneaux bois utilisant des matériaux locaux.

Analyse du comportement des liaisons bois-bois dans le diaphragme

# BIBLIOGRAPHIE

## **BIBLIOGRAPHIE**

APA, 2007. *Diaphragms and shear walls - Design and construction guide*. The Engineered Wood Association.

ATC -7, 1981. Guidelines for the design of horizontal wood diaphragms. Applied technology council.

BERRADA, Youssef, 2011. *Etude du Lignapli : Mur en bois massif cloué*. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur. Polytech 'Clermont-Ferrand : France.

CTBA, 2007. Application Bois Construction (ABC) - Assemblages Bois et dérivés Conception système - Panneaux de particules. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement : France.

EN 14592, [sans date]. *Structure en bois - Organes d'assemblages - Exigences*. Comité européen de normalisation.

EN 1995-1-1, 2004. Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1: Généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments. Comité européen de normalisation.

FRANSSEN, Jean-Marc, 2007. Construction en bois. Université de Liège : Belgique.

FUENTES, Sebastien, FOURNELY, Eric et BOUCHAIR, Abdelhamid, 2011. *Etude de rigidité de diaphragmes en bois*. LaMI - Polytech 'Clermont-Ferrand : France.

FUENTES, Sebastien, 2013. *Comportement mécanique du plancher diaphragme en bois - Semirigidité et résistance pour une situation sismique -*. Projet de thèse de doctorat. Université Blaise Pascal-Clermont II : France.

LY DONG, Phuong Lam, 2006. Développement de modèles analytiques pour la prédiction du comportement élastique des assemblages mécaniques à broches dans la construction en bois. Thèse de Doctorat. Université de Liège : Belgique.

NF EN 26891, 1991. Structures en bois - Assemblages réalisés avec des éléments mécaniques de fixation - Principes généraux pour la détermination des caractéristiques de résistance et de déformation. AFNOR (Association Française de Normalisation) : France.

NF EN 338, 2008. Bois de structure - Classes de résistance du bois massif. Comité européen de normalisation.

NOLLET, Guillaume, 2002. *Faisabilité des assemblages de structures bois*. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur. Centre universitaire des sciences et technologies (CUST) : France.

STEP 1, 1996. Structures en bois aux états limites-Introduction à l'Eurocode 5-Matériaux et base de calculs. France: Eyrolles.

WESCOTT, Bott James, 2005. *Horizontal stiffness of wood diaphragms*. Virginia Polytechnic Institute and State University : Etats-Unis.

XU BOHAN, 2009. *Modélisation du comportement mécanique d'assemblages bois avec prise en compte de critères de rupture*. Thèse de Doctorat. Université Blaise Pascal-Clermont II : France.

[1] <u>http://www.woodforum.be/</u> forum belge de promotion du bois.

- [2] <u>http://www.houtinfobois.be/</u> fiches techniques, bibliothèque virtuelle.
- [3] <u>http://www.unc.edu/~rowlett/units/</u> les unités de mesures anglo-saxonnes

Analyse du comportement des liaisons bois-bois dans le diaphragme

# ANNEXES

# ANNEXES

Annexe 1 : Caractéristiques élastiques de quelques variétés de bois (XU Bohan, 2009)I
Annexe 2 : classes de résistance du bois massif selon l'EN 338 II
Annexe 3 : classes de résistance des bois lamellés collésIII
Annexe 4 : procédés d'assemblages en structure bois suivant leur principes de transmission (XU
Bohan, 2009)
Annexe 5 : assemblages traditionnels V
Annexe 6 : quelques exemples d'assemblages mécaniquesVI
Annexe 7 : courbes charges-glissement des essais sur les éprouvettes cn
Annexe 8 : Courbes Charge-glissement des essais sur les éprouvettes cx pour un clou VIII
Annexe 9 : Courbes charge-glissement des essais sur les éprouvettes cv
Annexe 10 : Courbes charges-glissements des éprouvettes de type cxXI
Annexe 11 : Courbes charges-glissements des éprouvettes de type cvXII
Annexe 12 : Courbes contraintes-déformations des éprouvettes de panneaux humides XIII

		Dougla	s	Epi	Epicéa Pin Chê				Movingui
$\rho_m (kg/m^3)$	470	440	480	360	390	490	560	590	760
H (%)	12	12	12	12,8	12	12	12	12	12
E <sub>L</sub> (MPa)	168 72	16858	16000	0 10775 118		16015	6015 15248 148		16000
E <sub>R</sub> (MPa)	949	848	1010	650	920	1182	1182	1505	2490
E <sub>T</sub> (MPa)	934	842	800	349	510	616	616	830	1730
G <sub>LR</sub> (MPa)	749	713	900	534	760	828	828	970	1410
G <sub>LT</sub> (MPa)	802	856	900	440	730	688	688	697	1230
G <sub>RT</sub> (MPa)	114	109	90	41	40	320	320	399	550

<u>Annexe 1</u> : Caractéristiques élastiques de quelques variétés de bois (XU Bohan, 2009)

Valeurs de coefficients de poisson pour le bois

	Dou	glas	Epicéa	Pin	Chêne			
ULR	0,17	0,41	0,34	0,39	0,39	0,22		
$v_{LT}$	0,47	0,54	0,40	0,44	0,57	0,46		
$v_{RT}$	0,52	0,54	0,42	0,45	0,6	0,51		
UTR	0,21	0,51	0,38	0,39	0,18	0,31		
$\mathcal{U}_{RL}$	0,05	0,04			0,04	0,03		
$v_{TL}$	0,02	0,05			0,02	0,05		

		Résin	Résineux									Feuillus									
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriétés de résistance (en N/	/mm2)																				
Flexion	fm,k	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70
Traction axiale	<i>f</i> t,0,k	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	11	14	18	21	24	30	36	42
Traction transversale	<i>f</i> i.90,1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compression axiale	fc,0,k	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34
Compression transversale	∫c,90,k	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	10,5	13,5
Cisaillement	fv,k	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
Propriétés de rigidité (en kN/mm <sup>2</sup> )																					
Module moyen	E <sub>0,mean</sub>	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16	10	11	12	12	13	14	17	20
d'élasticité axiale																					
Module d'élasticité axiale	E0,05	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7	8,4	9,2	10,1	10,1	10,9	11,8	14,3	16,8
(au 5è percentile)																					
Module moyen d'élasticité	E <sub>90,mean</sub>	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,67	0,73	0,80	0,80	0,86	0,93	1,13	1,33
transversale																					
Module moyen de	Gmean	0.44	0.5	0,56	0.59	0.63	0,69	0,72	0.75	0.81	0.88	0.94	1.00	0.63	0,69	0,75	0,75	0.81	0.88	1,06	1,25
cisaillement	- mean			-,	-,	-,	-,	-,	-	.,	-,	-	.,		-,	-	-	-,	-,		.,
Masse volumique (en kg/m°)		<del></del>																			
Masse volumique	A	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	500	520	530	540	550	620	700	900
Masse volumique moyenne	<i>P</i> mean	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	610	630	640	650	660	750	840	1080
NOTES :																					
1. Les valeurs données ci-dessus pour la résistance à la traction, la résistance à la compression, la résistance au cisaillement, le module d'élasticité au 5e percentile, le																					
module moyen d'elasticite transversale et le module moyen de cisalliement ont été calculées en utilisant les équations données à l'Annexe A.																					
2. Les proprietes disposées dans le tableau sont compatibles avec des bois presentant une teneur en numidite resultant d'une temperature de 20 °C et une numidite relative de 65 %.																					

<u>Annexe 2</u> : classes de résistance du bois massif selon l'EN 338

3. Il est possible que le bois se conformant aux classes C45 et C50 ne soit pas disponible facilement.

4. Les valeurs caractéristiques pour la résistance au cisaillement supposent une profondeur de fissure maximale autorisée de 50 %.

	GL20	GL24	GL28	GL32	GL36	
$f_{m,g,k}$	20	24	28	32	36	N/mm <sup>2</sup>
$f_{t,0,g,k}$	15	18	21	24	27	N/mm <sup>2</sup>
f <sub>t,90,g,k</sub>	0.35	0.35	0.45	0.45	0.45	N/mm <sup>2</sup>
$f_{c,0,g,k}$	21	24	27	29	31	N/mm <sup>2</sup>
f <sub>c.90,g,k</sub>	5.0	5.5	6.0	6.0	6.3	N/mm <sup>2</sup>
f <sub>v,g,k</sub>	2.8	2.8	3.0	3.5	3.5	N/mm <sup>2</sup>
E <sub>0,moven,g</sub>	10 000	11 000	12 000	13 500	14 500	N/mm <sup>2</sup>
E <sub>0,05,g</sub>	8 000	8 800	9 600	10 800	11 600	N/mm <sup>2</sup>
$\rho_{g,k}$	360	380	410	440	480	kg/m³

<u>Annexe 3</u> : classes de résistance des bois lamellés collés
<u>Annexe 4 : procédés d'assemblages en structure bois suivant leur principes de transmission (XU</u> Bohan, 2009)

	Famille de matériau				
Type de transmission	Simple contact	Matériau rigide (bois, acier)	Adhésif		
Transmission directe	Assemblages traditionnels à entailles (embrèvement, mi- bois, à tenon et mortaise)	Transmission par élément en bois dur (pour la compression)	Aboutages (larges entures)		
Transmission par juxtaposition	Assemblage à queue d'aronde	<ul> <li>Aiguilles (système Menig)</li> <li>Broche</li> <li>Boulons</li> <li>Tire-fond</li> <li>Pointes</li> <li>Crampons</li> <li>Anneaux</li> </ul>	<ul> <li>Fibres de verre collées en renfort</li> <li>Assemblage de reins de portiques</li> </ul>		
Transmission indirecte		<ul> <li>Assemblage sur gousset par tiges</li> <li>Connecteurs métalliques</li> <li>Système centor</li> <li>Système BSB et Moelven</li> <li>Système Bertsche</li> <li>Système Janebo</li> <li>Système CTBA- Hilti</li> <li>Système Greim</li> </ul>	<ul> <li>Assemblages métallo - collés</li> <li>Assemblages collés à contact</li> <li>Goussets collés</li> </ul>		

Le mode de fonctionnement des assemblages est directement lié au type d'efforts auxquels ils résistent. Le blocage des déplacements génère des efforts internes au sein de l'assemblage, lesquels sont transmis aux éléments adjacents

Les procédés d'assemblage en structure bois suivant leur principe de transmission

	Effort normal		Effort tranchant	Moment fléchissant
Géométrie	<b></b> ,	<b></b>	<b>ĵ</b> •[	$\langle\!\!\langle\cdot\rangle\!\!\rangle$
- <u>cer</u> aceee				
	A	T		$\square$
	T			f]]

<u>Annexe 5</u> : assemblages traditionnels



Embrèvement simple





Embrèvement double

Embrèvement arrière

# Principaux types d'embrèvements







Mi-bois pour joints de sablières, traverses, poutres appuyées

Mi-bois pour joints de sablières

Enfourchement

# Assemblage à mi-bois et à enfourchement



Assemblage à tenon et mortaise





Exemple d'assemblages boulonnés



Nœud de treillis réalisé par goussets brochés BSB





### Assembleurs courants de structures bois



<u>Annexe 7</u> : courbes charges-glissement des essais sur les éprouvettes cn



#### <u>Annexe 8</u> : Courbes Charge-glissement des essais sur les éprouvettes cx pour un clou

Decroly DJOUBISSIE DENOUWE Mémoire de Master d'ingénierie Option Génie Civil - Juin 2013 *Promotion* [2012/2013]



### Annexe 9 : Courbes charge-glissement des essais sur les éprouvettes cv

Decroly DJOUBISSIE DENOUWE Mémoire de Master d'ingénierie Option Génie Civil - Juin 2013 *Promotion* [2012/2013]





Annexe 10 : Courbes charges-glissements des éprouvettes de type cx

La figure ci-dessous présente les courbes moyennes des capteurs des éprouvettes de type *cx* ainsi que leur moyenne.





# Annexe 11 : Courbes charges-glissements des éprouvettes de type cv

La figure ci-dessus présente les courbes moyennes des capteurs des éprouvettes de type *cx* ainsi que leur moyenne.



Decroly DJOUBISSIE DENOUWE Mémoire de Master d'ingénierie Option Génie Civil - Juin 2013 Promotion [2012/2013]



## Annexe 12 : Courbes contraintes-déformations des éprouvettes de panneaux humides

### Analyse du comportement des liaisons bois-bois dans le diaphragme

#### Résumé

L'utilisation du bois dans la construction connait un intérêt croissant à cause des qualités intrinsèques du matériau et de l'évolution des préoccupations environnementales. Le matériau bois a connu peu d'études au regard de la complexité de sa nature et de son comportement (matériau fortement anisotrope, non homogène, sensible à l'humidité, à résistance limitée, ...). Actuellement, les nouvelles technologies permettent de maîtriser et d'améliorer la qualité du bois et des produits dérivés manufacturés. Cependant, le développement de l'utilisation du matériau bois dans la construction est conditionné par la maîtrise du comportement des composants et de leurs assemblages. Les systèmes constitués de poteaux et de poutres peuvent être associés à des panneaux diaphragmes horizontaux ou verticaux. Ces panneaux remplissent des fonctions secondaires d'isolation et de séparation ou des fonctions mécaniques de reprise d'efforts verticaux ou horizontaux. Les résistances de ces diaphragmes dépendent de façon notable des caractéristiques de résistance et de déformation des liaisons entre leurs éléments constitutifs. Ainsi, le développement et l'optimisation des structures bois nécessitent la maîtrise du fonctionnement des assemblages et des liaisons. Les hypothèses simplificatrices relatives aux rigidités et aux résistances de ces structures.

La présente étude menée au sein de la plateforme Matériaux et Structures pour le Génie Civil (MSGC) de Polytech' Clermont Ferrand porte sur la caractérisation du comportement des liaisons dans les diaphragmes bois. Ainsi, un programme expérimental est réalisé sur des essais push-out d'assemblages cloués solives-panneaux avec différentes configurations. Des essais de caractérisation des matériaux sont aussi réalisés (solives, panneaux, clous). L'objectif est d'avoir des résultats expérimentaux qui permettent d'alimenter et de vérifier les modèles analytiques existants. Les modèles analytiques permettent de déterminer la raideur relative au glissement à l'interface entre panneau et solive en considérant les caractéristiques du clou et du bois. Cette étude permet de définir le comportement des liaisons en termes de rigidité et de résistance en comparant les résultats expérimentaux à la théorie de l'analyse limite de Johansen et les valeurs prescrites par l'Eurocode 5 (Norme européenne de conception et de calcul des structures en bois). Ces valeurs de rigidité sont définies pour être intégrées dans une analyse globale du comportement d'un panneau diaphragme en bois.

#### Mots Clés : Bois, liaison, comportement, rigidité, diaphragme

### Analysis of the behavior of wood connections in the diaphragm

#### Abstract

The use of wood in construction is experiencing a growing interest because of the intrinsic qualities of the material and changing environmental concerns. The wood material has been little research in terms of the complexity of its nature and behavior (highly anisotropic material, uneven, sensitive to moisture, limited strength ...). Currently, new technologies allow to control and improve the quality of timber and timber products manufactured. However, the development of the use of wood in construction is conditioned by controlling the behavior of components and their connections. The systems consist of columns and beams can be associated with vertical or horizontal diaphragms panels. The panels perform secondary functions of insulation and mechanical separation or recovery functions of vertical or horizontal forces. The resistances of these diaphragms depend significantly from characteristics of strength and deformation of the connections between their constituent elements. Thus, the development and optimization of wood structures require the control operation of the assemblies and connections. The simplifying assumptions about rigidity and resistance of assemblies adopted in design codes for timber structures limit the capabilities of these structures.

This study led within the platform and Materials for Civil Engineering Structures (MSGC) Polytech' Clermont-Ferrand focuses on the characterization of the behavior of fastener in wood diaphragms. Thus, an experimental program was performed on push-out tests of nailed joists-panels assemblies with different configurations. Characterization tests are also made of materials (joists, panels, nails). The aim is to have experimental results that provide power and check the existing analytical models. Analytical models to determine the relative stiffness slip at the interface between board and joist considering the characteristics of the nail and wood. This study helps to define the behavior of fasteners in terms of stiffness and strength by comparing the experimental results with the theory of limit analysis Johansen and values prescribed by the Eurocode 5 (European standard of design and calculation of timber structures). These stiffness values are set to be integrated into an overall analysis of the behavior of a wooden panel diaphragm.

#### Key words: Wood, fastener, behavior, stiffness, diaphragm