



Université de Liège

Faculté des Sciences Appliquées  
Génie Civil et Géologie  
Département de Mécanique des matériaux et Structures  
Secteur Construction Métallique et Mixte



*Développement de modèles analytiques pour la prédiction  
du comportement élastique des assemblages mécaniques à  
broches dans la construction en bois*

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de  
Docteur en Sciences Appliquées  
par LY Dong Phuong Lam

Septembre 2006

---

Coordonnées de l'auteur :

Ir. LY Dong Phuong Lam

Université de Liège

Département M&S (Mécanique des matériaux et Structures), Bâtiment B52/3

Chemin des Chevreuils 1

4000 Liège

Belgique

Téléphone : +32 (0) 4 366 9523

Téléphone du secrétariat : +32 (0) 4 366 9260

Fax : +32 (0) 4 366 9192

E-mail : [dplam.ly@ulg.ac.be](mailto:dplam.ly@ulg.ac.be)

Coordinateur du promoteur :

Prof. Dr. JASPART Jean-Pierre

Université de Liège

Département M&S (Mécanique des matériaux et Structures), Bâtiment B52/3

Chemin des Chevreuils 1

4000 Liège

Belgique

Téléphone : +32 (0) 4 366 9247

Téléphone du secrétariat : +32 (0) 4 366 9260

Fax : +32 (0) 4 366 9192

E-mail : [Jean-Pierre.Jaspart@ulg.ac.be](mailto:Jean-Pierre.Jaspart@ulg.ac.be)

## Membres du Jury

---

Jean-Marc Franssen (Président du jury)

Directeur de recherches FNRS, Professeur adjoint, Département M&S, Université de Liège  
Chemin des Chevreuils 1, B-4000 Liège, Belgique

Jean-Pierre Jaspert (Promoteur)

Professeur, Département M&S, Université de Liège  
Chemin des Chevreuil 1, 4000 Liège, Belgique

René Maquoi

Professeur ordinaire, Département M&S, Université de Liège  
Chemin des Chevreuil 1, B-4000 Liège, Belgique

Yves Weinand

Prof. Dr, Directeur du Laboratoire de construction en bois - IBOIS - IS Faculté  
Environnement Naturel, Architectural et Construit - ENAC Ecole  
Polytechnique Fédérale de Lausanne - EPFL  
GC H2 711 (bâtiment GC H2)  
Station 18, CH-1015 Lausanne, Suisse

Peer Haller

Prof. Dr.-Ing, Institut für Stahl - und Holzbau  
Lehrgebiet Ingenieurholzbau und baukonstruktives Entwerfen Technische Universität  
Dresden  
Helmholtzstr. 10,  
D-01069 Dresden, Allemagne

Nathalie François

Ir., Centre Technique de l'Industrie du Bois (CTIB)  
Allée Hof Ter Vleest 3, B-1070 Bruxelles, Belgique



## Remerciements

---

Je voudrais tout d'abord remercier monsieur le professeur Jean-Pierre Jaspard, promoteur de cette thèse, pour son support et ses conseils scientifiques précieux.

Je remercie le CTIB (Centre Technique de l'Industrie du Bois), pour son support financier et sa contribution expérimentale au travers du projet  $K_{ser}$  [CTI-2004]; en particulier, j'exprime ma gratitude à madame Anne Mertens et mademoiselle Nathalie François, pour les multiples échanges professionnels pendant le projet.

Je tiens à souligner également la collaboration avec mes collègues, plein d'enthousiasme, du laboratoire M&S, en particulier Max Verstraete et Carl Vroomen, grâce à qui les travaux expérimentaux de la thèse ont pu être menés à bien.

Je n'oublierai pas les "débat scientifiques" avec mon collègue de bureau, Jean-François Demonceau. Cela m'a donné des idées intéressantes pour le développement de la thèse.

J'apprécie beaucoup le renfort de mes collègues Vincent Libertiaux, Carlo Pietrapertosa, Christophe Henrard, Frédéric Pascon, pour leur lecture attentive de la thèse.

Je remercie mes collègues Laurent Duchêne, Pierre de Montleau, pour leur aide dans les aspects numériques.

Et je tiens enfin à exprimer l'agrément que j'ai eu à travailler parmi tous les sympathiques membres du département M&S; en particulier Catherine Doneux, Anne-Françoise Gerday, Christian Perez et Paulo Flores, pour leur amitié.



L'approche générale pour la prédiction du comportement mécanique des assemblages, dite la "méthode des composantes", résulte de travaux de recherches effectués dans le cadre de projets scientifiques européens consacrés, au départ, aux assemblages de construction métallique. Cette approche permet de prédire analytiquement la rigidité, la résistance et la capacité de déformation des assemblages soumis à des efforts extérieurs (effort normal, effort tranchant, effort de moment, ...).

La méthode des composantes est actuellement reconnue comme procédure de référence pour le dimensionnement des assemblages dans deux codes européens, relatifs respectivement, aux structures en acier [EN1993] et aux structures mixtes acier-béton [EN1994]. Mais son application potentielle est beaucoup plus large: des recherches actuelles visent à l'étendre à l'étude du comportement des assemblages soumis à l'incendie, au séisme, aux chargements exceptionnels (robustesse), ....

Récemment, un projet de recherche [CTI-2004] visant à l'application de la méthode des composantes à l'étude du comportement élastique des assemblages mécaniques en bois a été mené à bien. Les partenaires de ce projet étaient: le Centre Technique de l'Industrie du Bois (CTIB) et le Département M&S de l'Université de Liège.

Les principes de la méthode des composantes sont les suivants:

- identification des composantes constitutives de l'assemblage soumises à la traction, compression ou cisaillement;
- détermination du comportement mécanique de chacune de ces composantes;
- "assemblage" de ces composantes afin d'établir le comportement (rigidité, résistance, capacité de déformation, ...) de l'assemblage tout entier sous les sollicitations étudiées.

Dans le cadre de cette thèse, les assemblages mécaniques à broches en bois sont retenus. Deux composantes importantes sont, alors identifiées:

- composante "broche" (la broche en flexion et cisaillement);
- composante d'"embedding" (le bois soumis à pression diamétrale à l'interface avec la broche).

La composante "broche" est considérée comme connue, en tant qu'élément métallique, tandis que peu d'information est disponible quant à la composante d'"embedding". L'EC5 propose une formulation pour la prédiction du comportement élastique des assemblages, mais celle-ci dé-

pend seulement de deux facteurs principaux: le diamètre de la broche et la masse volumique du bois. L'influence probablement significative de l'angle de sollicitation par rapport aux fibres du bois (matériau fort anisotrope), de l'épaisseur des membrures assemblées n'est pas par exemple prise en compte.

Récemment, des recherches expérimentales, numériques et analytiques ont été réalisées sur ce sujet par l'Université de Liège en collaboration avec le CTIB (Centre Technique de l'Industrie du Bois). Les essais expérimentaux du CTIB ont été utilisés comme référence pour le développement de modèles numériques et puis analytiques. En fait, l'application de la méthode des composantes à la prédiction du comportement élastique des assemblages mécaniques à broches comporte deux étapes:

- l'étude "locale" des composantes qui consiste principalement à développer des modèles analytiques pour la prédiction du comportement élastique de la composante d'"embedding";
- l'étude "globale" des assemblages qui couvre la mise au point de modèles analytiques pour la prédiction du comportement élastique de l'assemblage tout entier.

L'application de la méthode des composantes aux assemblages à broches est un premier pas vers l'utilisation future de ce concept au calcul d'autres types d'assemblage mécaniques (à pointes, à vis, à boulons, ...). Pour y arriver, des nouvelles composantes devront alors être étudiées afin de couvrir le champ d'application désiré.

**Mots clés:** *méthode des composantes, assemblage en bois, modélisation semi-rigide, modèle numérique, modèle analytique, élasto-plasticité, anisotropie (orthotropie), non-homogénéité, contact, analyse locale, analyse non linéaire, comportement "broche-bois", composante "broche", composante d'"embedding".*

A general procedure for the evaluation of the mechanical properties of structural joints, named “component method”, is now available from intensive research works at the European level. This procedure allows the analytical prediction of the resistance, but also of the stiffness and the deformation capacity, of structural joints under external forces (axial or shear forces, bending moments ...).

The component method is nowadays integrated as a reference procedure in two European design codes, respectively for steel structures (EC3 [EN1993]) and steel-concrete composite structures (EC4 [EN1994]). However, its potential scope is much larger and present studies are aimed to apply to situations as joints in fire, joints under seismic loading, joints under exceptional loads (Robustness Project) ....

More recently, a research project [CTI-2004] has succeeded in applying the component method to the investigation of the elastic behaviour of mechanical joints in timber construction. That is the result of the collaboration of CTIB-TCHN (Belgian Institute for Wood Technology) and University of Liège.

The main principle of the component method is the following:

- identification of constitutive components subjected to tension, compression or shear in the joint;
- determination of the mechanical behaviour of these individual components;
- "assembling" components so as to derive the mechanical properties of the whole joint.

In the present paper, timber joints with dowel fasteners are considered. Two components may be identified:

- "dowel" component (dowel fastener in bending and shear);
- embedding component (timber member in embedding).

The "dowel" component is known from past researches, whereas little information is available for the embedding component. EC5 [EN1995] proposes formulation to predict the behaviour for joints composed of these two components; but it only depends on two factors: the dowel diameter and the timber density. The influence probably significant of the grain direction (material strongly anisotropy) and the thickness of the connected members are for instance neglected.

Experimental, numerical and analytical investigations have recently been performed by University of Liège in collaboration with CTIB-TCHN so as to propose another formulation more precise for joints. Experimental results, performed by CTIB-TCHN, have been used as reference for the development of numerical model and, then, analytical model. The application of the component method to the prediction of the elastic behaviour of timber joints consist of two steps:

- "local" investigation on components that is to develop analytical models for the prediction of the elastic behaviour of components;
- "global" investigation on joints that is to develop analytical models for the prediction of the elastic behaviour of joints.

The application of the component method to timber joints with dowel fasteners is a first step towards the use of this concept in future to others mechanical joints (screw, punched metal plate, nail, bolt ...). In this case, others components may be derived to cover the field of application expected.

**Key words:** *component method, timber joints, semi-rigid modelling, numerical modelling, analytical modelling, elasto-plastic, anisotropy (orthotropy), heterogeneity, contact, local analysis, non linear analysis, "dowel-timber" behaviour, "dowel" component, embedding component.*

## Opérations mathématiques

$\otimes$	Produit de tenseur
$:$	Contraction double
$( )^T$	Vecteur transposé
$-$	Tenseur à deux dimensions
$=$	Tenseur à quatre dimensions
$\cdot$	Dérivée d'après le temps
$\sum_i$	Somme des composantes $i$ , $i=1, n$
$i=1, n$	Entiers $i$ de 1 jusqu'à $n$

## Indices

<i>Indice</i> <sub>1</sub>	Indice de direction parallèle aux fibres (ou bien à 0°)
<i>Indice</i> <sub>2</sub>	Indice de direction perpendiculaire aux fibres (ou bien à 90°)

## Symboles majuscules latins

$[S]$	Matrice de complaisance
$D$ ( $d$ )	Diamètre
$E$	Module élastique
$E_{0,g,moy}$	Module élastique en flexion du BLC
$E_{0,l,moy}$	Module élastique en flexion du BL
$E_1$ ( $E_0$ )	Module élastique du bois parallèle aux fibres
$E_2$ ( $E_{90}$ )	Module élastique du bois perpendiculaire aux fibres
$E_a$	Module élastique de l'acier
$E_a I_a$	Rigidité en flexion d'une poutre en acier
$E_c A_c$	Rigidité en traction (compression) de la membrure bois centrale
$E I$	Rigidité en flexion d'une section
$E_l A_l$	Rigidité en traction (compression) de la membrure bois latérale
$F$ ( $P$ )	Force

$F_j$	Force agissant sur l'assemblage
$F_{max,est}$	Force maximum estimée
$F_{ni}$ ( $i=1,2,\dots$ )	Effort agissant parallèlement aux fibres
$F_y$	Force plastique
$G_{12}$ ( $G$ )	Module de cisaillement du bois
$G_a$	Module de cisaillement de l'acier
$I$	Moment d'inertie
$I_a$	Moment d'inertie de la broche d'acier
$K_\alpha$ ( $K_{emb}$ )	La rigidité d'embedding à un angle $\alpha$ de compression des fibres
$K_{1c}$	Rigidité élastique d'un assemblage à une seule broche
$K_{ac}$	Rigidité élastique d'un assemblage en cisaillement
$K_{af}$	Rigidité élastique d'un assemblage en flexion
$K_e$	Rigidité élastique
$K_{mc}$	Rigidité élastique d'un assemblage à une rangée de plusieurs broches
$K_{ser}$	Module de glissement
$L$	Direction longitudinale
$M$	Effort de moment
$M_b$	Effort de moment agissant sur la poutre
$M_c$	Effort de moment agissant sur la colonne
$M_j$	Effort de moment appliqué sur un assemblage
$M_{j,Rd}$	Valeur de calcul de résistance plastique à la flexion d'un assemblage
$M_{pl,Rd}$	Valeur de calcul de résistance plastique à la flexion d'un élément structural
$M_y$	Moment plastique
$N_{ci}$	Effort normal agissant sur la membrure centrale entre deux rangée $i$ et $i+1$
$N_j$	Effort normal transmis de la poutre à l'assemblage
$N_{li}$	Effort normal agissant sur la membrure latérale entre deux rangée $i$ et $i+1$
$R$	Direction radiale
$S_{j,ini}$	Valeur de calcul de rigidité initiale à la flexion d'un assemblage
$T$	Direction tangentielle; Effort de tranchant
$T_j$	Effort tranchant transmis de la poutre à l'assemblage
$(X_n, Y_n)$	Composantes de la force distribuée sur le bord d'une plaque
$F$	Fonction d'Airy
$\underline{\underline{H}}$	Tenseur Hill de 4 <sup>me</sup> ordre
$\underline{\underline{x}}$	Tenseur "back stress" de 2 <sup>me</sup> ordre

$[H]$	Matrice Hill
$F$	Paramètre de matériau Hill 1948
$G$	Paramètre de matériau Hill 1948
$H$	Paramètre de matériau Hill 1948
$L$	Paramètre de matériau Hill 1948
$M$	Paramètre de matériau Hill 1948
$N$	Paramètre de matériau Hill 1948
$X$	Vecteur "back stress"

## Symboles minuscules latins

$(a_i, b_i)$	Coordonnées du connecteur $i$ par rapport au repère central de l'assemblage
$b$	Largeur
$d_i$	Déformation "broche-bois" à la broche $i$
$f_{c,0}$	Limite élastique en compression parallèle aux fibres
$f_{c,90}$	Limite élastique en compression perpendiculaire aux fibres
$f_{e,0}$	Limite élastique (traction/compression) parallèle aux fibres
$f_{e,90}$	Limite élastique (traction/compression) perpendiculaire aux fibres
$f_{h,\alpha}$	Portance locale à un angle $\alpha$ de compression aux fibres
$f_i$	Effort de tranchant agissant sur la broche $i$ aux plans de cisaillement entre les membrures
$f_{m,g,k}$	Résistance en flexion du BLC
$f_{m,l,k}$	Résistance en flexion du BL
$f_{t,0}$	Limite élastique en traction parallèle aux fibres
$f_{t,0,l,k}$	Résistance en traction du BL
$f_{t,90}$	Limite élastique en traction perpendiculaire aux fibres
$f_{u,0}$	Limite ultime (traction - $f_{ut,0}$ /compression - $f_{uc,0}$ ) parallèle aux fibres
$f_{u,90}$	Limite ultime (traction - $f_{ut,90}$ /compression - $f_{uc,90}$ ) perpendiculaire aux fibres
$f_{xy}$	Limite élastique en cisaillement
$h$	Hauteur
$k (k_i, k_{emb})$	Rigidité élastique de la composante d'embedding
$m_i$	Nombre de connecteurs dans une rangée $i$
$n$	Nombre de rangées
$p_i$	Distance entre deux rangées de connecteurs $i$ et $i+1$
$r_i$	Rayon polaire d'un connecteur
$t (e)$	Épaisseur

$t_i$ ( $i=1,2,\dots$ )	Épaisseur d'une membrane de l'assemblage
$u$ ( $v$ )	Glissement (enfoncement)
$u_{ci}$	Déformation de la membrure centrale entre deux rangées $i$ et $i+1$ due à l'effort normal
$u_{li}$	Déformation de la membrure latérale entre deux rangées $i$ et $i+1$ due à l'effort normal
$v$	Déplacement vertical
$a_{ij}$	Composantes de la matrice complaisance [S]
$(n_x, n_y)$	Vecteur normal d'un bord C

## Symboles grecs

$\underline{\sigma}'$	Déviateur de tenseur des contraintes de Cauchy
$\varepsilon$	Vecteur de déformations
$\gamma$	Angle formé entre les membrures moisées d'un assemblage
$\sigma$	Vecteur de contraintes
$\sigma'$	Vecteur du déviateur des contraintes de Cauchy
$\alpha, \gamma_i$	Angle de compression des fibres
$\theta_b$	Rotation d'une poutre
$\theta_c$	Rotation d'une colonne
$\varepsilon_{ci}$	Déformation relative de la membrane centrale entre deux rangées $i$ et $i+1$
$\sigma_F$	Sigma équivalent pour la définition de la taille de la surface de plasticité de Hill
$\beta_i$	Angle polaire d'un connecteur par rapport à l'axe des fibres
$\varepsilon_{ij}$	Composantes du tenseur de déformation
$\sigma_{ij}$	Composantes du tenseur de Cauchy
$\nu_{ij}$ ( $\nu$ )	Coefficient de Poisson
$\varphi_j$ ( $\varphi, \phi$ )	Déformation en rotation d'un assemblage
$\rho$	Masse volumique
$\rho_m$	Masse volumique moyenne
[ $\Delta$ ]	Paramètre de caractérisation de la souplesse d'un assemblage

2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
BL	Bois lamellé
BLC	Bois lamellé-collé
BLC0	Bois lamellé-collé en sollicitation parallèle aux fibres
BLC90	Bois lamellé-collé en sollicitation perpendiculaire aux fibres
"broche-bois"	Comportement locale "broche en interaction avec le bois"
Composante "broche"	Broche en acier en flexion et cisaillement
Composante d'"embedding"	Couche de bois d'épaisseur unitaire soumise à l'effet d'"embedding"
CTIB	Centre technique de l'industrie du bois, Bruxelles, Belgique <a href="http://www.ctib-tchn.be/">http://www.ctib-tchn.be/</a> Projet en collaboration: [CTI-2004]
EC3	[prEN1993]
EC4	[prEN1994]
EC5	[prEN1995]
ELS	Etat limite de service
ELU	Etat limite ultime
$K_{ser}$	"Kser-Modélisation de la déformation dans les modules de calcul des assemblages en bois", projet en coopération entre <b>M&amp;S</b> de l' <b>ULG</b> et <b>CTIB</b> , [CTI-2004]
LC0	Bois lamellé en sollicitation parallèle aux fibres
LC90	Bois lamellé en sollicitation perpendiculaire aux fibres
M&S	Département Mécanique des matériaux et Structures, Faculté des Sciences appliquées, l'Université de Liège <a href="http://www.ulg.ac.be/matstruc">http://www.ulg.ac.be/matstruc</a>
Module d'"embedding"	Rigidité élastique de composante d'"embedding"
ULG	Université de Liège, Belgique <a href="http://www.ulg.ac.be">http://www.ulg.ac.be</a>



## Partie 1 Introduction

### Chapitre 1 Introduction

1.1 Le bois dans la construction .....	1
1.2 Assemblages mécaniques dans la construction en bois .....	2
1.3 Recherches antérieures sur le comportement des assemblages mécaniques.....	3
1.3.1 Etude de la résistance .....	3
1.3.2 Etude de la rigidité .....	6
1.4 Contenu de la thèse .....	7

## Partie 2 Introduction aux assemblages

### Chapitre 2 Approches de la modélisation des assemblages

2.1 Approche traditionnelle de modélisation des assemblages pour l'analyse structurale....	11
2.2 Approche "semi-rigide" de modélisation des assemblages pour l'analyse structurale ....	12
2.3 Avantages de l'approche semi-rigide .....	15
2.4 Résumé .....	16

### Chapitre 3 Représentation du comportement des assemblages

3.1 Introduction.....	19
3.2 Caractérisation d'un assemblage.....	19
3.2.1 Méthode des composantes.....	20
3.2.2 Modèle mécanique à ressorts.....	21
3.2.3 Caractérisation des composantes.....	21
3.2.4 Assemblage des composantes .....	22
3.3 Classification d'un assemblage.....	22
3.3.1 Classification en rigidité.....	22
3.3.2 Classification en résistance .....	23
3.3.3 Classification en ductilité .....	24
3.4 Idéalisations d'un assemblage.....	24
3.5 Modélisation d'un assemblage.....	25
3.6 Perspectives d'application .....	27

## Partie 3 Matériau bois et assemblages en bois

### Chapitre 4 Matériau bois

4.1 Introduction .....	29
4.2 Anatomie du bois .....	29
4.3 Bois lamellé collé (BLC) .....	32
4.3.1 Généralités .....	32
4.3.2 Comportement mécanique .....	33
4.3.3 Propriétés élastiques de BLC .....	34
4.4 Bois lamellé collé utilisé dans la recherche .....	35
4.4.1 Projet $K_{ser}$ avec CTIB.....	35
4.4.2 Détermination des propriétés mécanique du BLC.....	36
4.4.3 Traitement des résultats d'essais de matériau.....	38
4.4.3.1 Comportement du BLC parallèlement aux fibres.....	38
4.4.3.2 Comportement du BLC perpendiculairement aux fibres.....	40
4.4.3.3 Comportement du BL parallèlement aux fibres .....	40
4.4.3.4 Comportement du BL perpendiculairement aux fibres .....	41
4.4.3.5 Conclusions .....	42
4.4.4 Modèle élastique-parfaitement plastique pour le comportement mécanique du bois ..	43
4.5 Résumé .....	47

### Chapitre 5 Assemblages en bois

5.1 Introduction .....	49
5.2 Divers types d'assemblages en bois .....	49
5.2.1 Assemblages traditionnels .....	50
5.2.2 Assemblages mécaniques. ....	51
5.2.2.1 Assemblages par pointes .....	51
5.2.2.2 Assemblages vissés .....	52
5.2.2.3 Assemblages par connecteurs métalliques à dents .....	52
5.2.2.4 Assemblages par anneaux .....	52
5.2.2.5 Assemblages par boulons et broches .....	53
5.3 Comportement semi-rigide des assemblages mécaniques .....	54
5.4 Résumé .....	55

## Partie 4 Objectifs et stratégie de développement

### Chapitre 6 Objectifs de la thèse

6.1 Introduction.....	57
6.2 Programme d'étude $K_{ser}$ du comportement semi-rigide des assemblages à broches .....	57
6.3 Objectifs de la thèse .....	58
6.4 Contenu et limitation .....	58
6.5 Perspectives d'application.....	59

### Chapitre 7 Stratégie de développement

7.1 Etape de la recherche.....	61
7.2 Méthode des composantes dans les assemblages mécaniques en bois.....	62
7.3 Etapes de l'étude .....	62
7.3.1 Etude locale des composantes.....	63
7.3.1.1 Stratégie.....	63
7.3.1.2 Analyse de composantes.....	63
7.3.1.2.1 Description du comportement "broche-bois" .....	63
7.3.1.2.1.1 Description des essais .....	63
7.3.1.2.1.2 Comportement élastique "broche-bois" parallèlement aux fibres .....	64
7.3.1.2.1.3 Comportement élastique "broche-bois" perpendiculairement aux fibres .....	66
7.3.1.2.2 Identification des composantes.....	68
7.3.1.2.3 Caractérisation de la composante d'"embedding" .....	70
7.3.1.3 Conclusions.....	71
7.3.2 Etude globale des assemblages.....	72
7.3.2.1 Stratégie.....	72
7.3.2.2 Analyse de l'étude globale des assemblages.....	73
7.3.2.2.1 Description du comportement d'un assemblage.....	73
7.3.2.2.2 Assemblage en cisaillement.....	74
7.3.2.2.3 Assemblage en flexion.....	75
7.3.2.2.4 Assemblage en flexion et en cisaillement.....	76
7.3.2.3 Conclusions.....	76

## Partie 5 Etude des composantes

### Chapitre 8 Etude de la composante d'"embedding"

8.1 Introduction.....	79
8.2 Définition du programme expérimental sur base de travaux à caractère numérique .....	79
8.2.1 Dimensions des éprouvettes.....	80
8.2.2 Evaluation de l'influence du frottement "acier-bois" .....	81
8.2.3 Evaluation de l'influence du module de cisaillement du bois .....	82
8.2.4 Evaluation de l'influence du coefficient de Poisson du bois.....	82
8.2.5 Relation entre rigidité d'"embedding" et angle d'application de la charge.....	83
8.2.6 Mesures à effectuer sur les éprouvettes au laboratoire.....	84
8.2.7 Conclusions .....	85
8.3 Travaux à caractère expérimental .....	85
8.3.1 Définition du programme expérimental .....	85
8.3.2 Application des forces et instrumentation.....	87
8.3.3 Traitement des résultats d'essais de compression réalisés au CTIB.....	88
8.3.4 Résultats des essais de portance locale du projet $K_{ser}$ réalisés au CTIB.....	89
8.4 Travaux à caractère numérique.....	90
8.4.1 Modèle 2D dans le plan perpendiculaire à l'axe de la broche.....	91
8.4.1.1 Modélisation .....	91
8.4.1.2 Loi de matériau.....	91
8.4.1.3 Critère de plasticité anisotrope de HILL.....	93
8.4.1.4 Allure bilinéaire du comportement 2D de la composante d'"embedding" dans le plan perpendiculaire à l'axe de la broche .....	95
8.4.2 Modèle 2D dans le plan parallèle à l'axe de la broche - comportement "broche-bois" .....	95
8.4.2.1 Modélisation .....	96
8.4.2.2 Intégration du comportement des composantes .....	96
8.4.2.3 Estimation de la déformation due aux efforts tranchants.....	97
8.4.3 Traitement des simulations numériques.....	98
8.5 Travaux à caractère analytique.....	98
8.5.1 Modèle 2D dans le plan perpendiculaire à l'axe de la broche.....	98
8.5.2 Sensibilité de la rigidité d'"embedding" à la variation des propriétés mécaniques du matériau .....	99
8.5.2.1 Influence du coefficient de Poisson ( $\nu_{12}$ ).....	99
8.5.2.2 Influence du module de cisaillement ( $G_{12}$ ) .....	100

8.5.2.3 Conclusions .....	101
8.5.3 Modèle 2D dans le plan parallèle à l'axe de la broche - comportement "broche-bois" .....	101
8.5.3.1 Lois du comportement .....	101
8.5.3.2 Formule analytique pour une poutre en flexion .....	102
8.6 Validation des modèles numérique et analytique .....	104
8.6.1 Comparaison des résultats obtenus par les modèles numérique et analytique avec ceux obtenus expérimentalement au CITB .....	105
8.6.1.1 Eprouvettes de diamètre D10 .....	106
8.6.1.2 Eprouvettes de diamètre D16 .....	107
8.6.1.3 Eprouvettes de diamètre D20 .....	108
8.6.1.4 Discussion des résultats .....	109
8.6.2 Consultation des essais de portance locale dans la bibliographie .....	110
8.6.2.1 Essais de Bocquet et d'Iroko [BOC-1997] .....	110
8.6.2.1.1 Essais d'Iroko .....	111
8.6.2.1.2 Essais de Bocquet .....	112
8.6.2.2 Essais de portance locale de l'Université de Naples [CAL-2005] .....	113
8.6.2.3 Discussion des résultats .....	114
8.6.3 Nouveaux essais de portance locale réalisés à l'ULG .....	115
8.6.3.1 Eprouvettes de diamètre D10 .....	116
8.6.3.2 Eprouvettes de diamètre D16 .....	117
8.6.3.3 Eprouvettes de diamètre D20 .....	118
8.6.3.4 Discussion des résultats .....	119
8.7 Conclusions .....	121

## **Partie 6 Etude des assemblages**

### **Chapitre 9 Assemblages en cisaillement**

9.1 Introduction .....	123
9.1.1 Assemblages à une broche en cisaillement .....	123
9.1.2 Assemblages à plusieurs broches en cisaillement .....	123
9.2 Travaux à caractère expérimental .....	124
9.2.1 Définition du programme expérimental en collaboration avec le CTIB .....	124
9.2.1.1 Essais de compression d'un assemblage moisé constitué d'une broche (série d'essais C2 et C3) .....	125
9.2.1.2 Essais de compression d'un assemblage moisé constitué de deux broches (séries d'essais C4, C5 et C6) .....	126
9.2.2 Application des forces et instrumentation .....	127
9.2.3 Traitement des essais .....	128

9.3	Travaux à caractère numérique .....	129
9.3.1	Modèle numérique 2D .....	129
9.3.2	Intégration du comportement des composantes .....	130
9.3.2.1	Composante "broche" .....	130
9.3.2.2	Composante d'"embedding" .....	131
9.3.3	Traitement des résultats numériques .....	131
9.4	Travaux à caractère analytique.....	132
9.4.1	Assemblages à une broche en cisaillement .....	132
9.4.2	Assemblages à plusieurs broches en cisaillement, moisés à $0^{\circ}-0^{\circ}$ .....	133
9.4.2.1	Modèle à "poutres" .....	133
9.4.2.2	Quelques cas pratiques.....	137
9.4.3	Assemblages à plusieurs broches en cisaillement, moisés à $0^{\circ}-\alpha^{\circ}$ .....	137
9.4.3.1	Modèle à "poutres" .....	138
9.4.3.2	Quelques cas pratiques.....	139
9.5	Validation des modèles numérique et analytique .....	139
9.5.1	Assemblages à une seule broche en cisaillement .....	140
9.5.1.1	Assemblages à une broche, moisés à $0^{\circ}-0^{\circ}$ (C2) .....	141
9.5.1.1.1	Assemblages à une broche D10, moisés à $0^{\circ}-0^{\circ}$ .....	141
9.5.1.1.2	Assemblages à une broche D16, moisés $0^{\circ}-0^{\circ}$ .....	142
9.5.1.1.3	Assemblages à une broche D20, moisés $0^{\circ}-0^{\circ}$ .....	144
9.5.1.2	Assemblages à une broche, moisés $0^{\circ}-90^{\circ}$ (C3) .....	145
9.5.1.2.1	Assemblages à une broche D10, moisés $0^{\circ}-90^{\circ}$ .....	145
9.5.1.2.2	Assemblages à une broche D16, moisés $0^{\circ}-90^{\circ}$ .....	147
9.5.1.2.3	Assemblages à une broche D20, moisés $0^{\circ}-90^{\circ}$ .....	148
9.5.1.3	Discussion des résultats.....	150
9.5.2	Assemblages à plusieurs rangées de broches en cisaillement.....	150
9.5.2.1	Assemblages à plusieurs broches, moisés à $0^{\circ}-0^{\circ}$ , en cisaillement (C4) ....	150
9.5.2.2	Assemblages à plusieurs broches, moisés à $0^{\circ}-90^{\circ}$ , en cisaillement (C5) ..	152
9.5.2.3	Assemblages à plusieurs broches, moisés à $0^{\circ}-90^{\circ}$ , en cisaillement (C6) ..	153
9.5.2.4	Discussion des résultats.....	154
9.6	Conclusions .....	155

## Chapitre 10 Assemblages en flexion

10.1	Introduction .....	157
10.2	Travaux à caractère expérimental .....	158
10.2.1	Assemblages en flexion [CAL-2005] .....	158
10.2.2	Assemblages en flexion [MER-1995] .....	159

10.3 Travaux à caractère analytique.....	160
10.3.1 Modèle analytique général .....	160
10.3.2 Modèle analytique pour un cas simplifié .....	161
10.4 Validation du modèle analytique .....	162
10.4.1 Assemblages en flexion [CAL-2005] .....	163
10.4.1.1 Modélisation et solution du problème .....	163
10.4.1.2 Comparaison avec les résultats expérimentaux.....	164
10.4.2 Assemblages en flexion [MER-1995] .....	166
10.4.2.1 Cas 1, broches disposées avec un angle de $0^\circ$ .....	166
10.4.2.2 Cas 2, broches disposées à $45^\circ$ de compression aux fibres.....	167
10.5 Conclusions .....	167

## Partie 7 Conclusions

Conclusions .....	169
Perspectives .....	173

<b>Bibliographie</b> .....	175
----------------------------	-----

## Annexes

### Annexe A Rigidité de la composante d'embedding

A.1 Théorie de l'élasticité anisotrope de la plaque, état plan de contraintes .....	183
A.1.1 Génération de l'état plan de contraintes.....	183
A.1.2 Génération de la fonction d'Airy .....	185
A.1.3 Calcul des contraintes à partir de la fonction d'Airy.....	186
A.1.4 Plaque avec un trou au milieu sur lequel on impose des efforts .....	187
A.2 Application .....	189
A.2.1 Problème traité .....	189
A.2.2 Analyse du problème.....	189
A.2.3 Remarque.....	191
A.3 Conclusions .....	191

### Annexe B Rigidité d'un assemblage à une broche

B.1 Introduction .....	193
B.2 Modèle .....	193
B.3 Solution .....	194
B.4 Conclusions .....	197

## **Annexe C Essais expérimentaux**

C.1 Essais de portance locale .....	199
C.2 Essais sur les assemblages simples moisés, compression à 0° .....	219
C.3 Essais sur les assemblages simples moisés, compression à 0° et 90° .....	221
C.4 Essais sur les assemblages simples moisés, à deux broches, compression à 0° .....	223
C.5 Essais sur les assemblages simples moisés, à deux broches, compression à 0° et à 90° .. .....	225
C.6 Essais sur les assemblages simples moisés, à deux broches, compression à 0° et à 90° .. .....	227

## **Annexe D Méthode de prédiction analytique de la rigidité élastique des assemblages à broches**

D.1 Introduction .....	229
D.2 Assemblages en cisaillement, moisés à 0°-0° .....	230
D.3 Assemblages en cisaillement, moisé à 0°- $\alpha$ ° .....	231
D.4 Assemblages en flexion .....	234

## **Partie 1 Introduction**

---

## **Partie 1 Introduction**

### **Chapitre 1 Introduction**

1.1 Le bois dans la construction .....	1
1.2 Assemblages mécaniques dans la construction en bois .....	2
1.3 Recherches antérieures sur le comportement des assemblages mécaniques .....	3
1.3.1 Etude de la résistance .....	3
1.3.2 Etude de la rigidité .....	6
1.4 Contenu de la thèse .....	7

# Chapitre 1 Introduction

## 1.1 Le bois dans la construction

Selon [FRA-2002], les statistiques de la consommation de bois dans le monde sont les suivantes:

*En Amérique du Nord, on dénombre 350 millions de maisons en bois. Chaque année, il s'en construit 2 millions de plus sur tout le territoire, de la Floride au Cercle Polaire, en passant par des climats maritimes comme Vancouver Island où il pleut deux fois plus qu'en Ardennes.*

*Les pays scandinaves bénéficient aussi d'une longue tradition de maisons en bois. Comme en Amérique du Nord, plus de 90% des maisons individuelles sont construites en bois. La qualité d'isolation thermique de ces constructions est telle que, malgré les rigueurs du climat, la consommation de chauffage d'un ménage suédois est la moitié de celle d'un ménage français.*

*En Belgique, le bois est abondant; en Wallonie, la surface forestière n'a fait que croître depuis 1866 pour atteindre aujourd'hui 31% de la surface du territoire. Le rendement des forêts d'ici est le meilleur d'Europe: l'équivalent en bois nécessaire pour construire une maison en bois pousse toutes les 2 à 4 minutes. En France, certaines projections prédisent un doublement de la production de résineux d'ici les années 2010 à 2020. La qualité des bois en Belgique est excellente pour la construction avec, en particulier, le cœur des essences comme le pin de Douglas et le mélèze qui présentent une durabilité naturelle aux insectes.*

Certaines craintes qui s'expriment parfois quant à l'utilisation du bois dans la construction par rapport aux autres matériaux (acier et béton) peuvent être citées: le bois est inflammable (parce qu'on s'en sert souvent comme combustible) et non durable (parce qu'il périt rapidement).

Matériau	Poids propre (KG/m <sup>3</sup> )	Conductivité (W/mK)	Chaleur spécifique (J/KgK)	Inertie thermique (J/m <sup>2</sup> K <sup>1</sup> s <sup>1/2</sup> )
Acier [EN1994]	7850	45	600	211.95x10 <sup>6</sup>
Béton normal [EN12524]	1800	1.15	1000	2.07x10 <sup>6</sup>
Bois	450	0.1	1113	0.05x10 <sup>6</sup>

Tableau 1-1 Caractéristiques thermiques des matériaux.

En fait, ce sont de faux arguments. Le bois présente un bon comportement au feu. L'inflammabilité du bois est inférieure à celle de nombreux autres matériaux rencontrés dans les habitations. En cas d'incendie, la chaleur dégagée par ces derniers matériaux (revêtements synthétiques, tapis pleins ou couvre-sol) peut éventuellement influencer le comportement de la structure portante si celle-ci est en acier ou en béton, mais pas si elle est en bois, car le bois absorbe beaucoup moins rapidement la chaleur que l'acier et le béton. Ceci est démontré par les paramètres de conductivité et d'inertie thermique repris au Tableau 1-1: la conductivité du bois est 11 fois plus petite que celle du béton et 450 fois plus petite que celle de l'acier; quant à l'inertie thermique (le paramètre le plus important dans la représentation de la capacité d'absorption de chaleur) elle est beaucoup plus petite pour le bois que pour le béton et l'acier.

Par ailleurs, le bois peut durer, mais pas dans n'importe quelles conditions: le bois, après l'abattage, doit être séché pour avoir une humidité en équilibre avec l'air ambiant; certaines essences locales possèdent une très bonne protection naturelle contre les attaques biologiques; des traitements chimiques permettent de garantir la structure en bois contre toute agression de ses deux principaux ennemis (les champignons et les insectes) et une humidité permanente inférieure à 20% évite au bois les attaques des champignons.

Face à ces "faux arguments", il convient de noter les avantages que peut procurer la construction en bois, d'après [BEH-1997]: la rapidité d'exécution, la construction à sec, le respect des délais, l'architecture sur mesure, la faculté d'adaptation, la légèreté, le confort et le bien-être,....

## **1.2 Assemblages mécaniques dans la construction en bois**

Comme pour tout 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 à un dimensionnement optimum.

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. C'est là où une perturbation de transfert des efforts entre les éléments structuraux est rencontrée.

On peut dire que la performance d'une structure est fonction de la performance des assemblages, car ils sont les points faibles de la structure. L'assemblage est également associé à la présence de concentrations de contraintes en raison desquelles la structure risque d'atteindre prématurément sa ruine.

Dans les structures récentes en bois, les connecteurs métalliques s'imposent souvent en raison de leur usage simple, facile et efficace. On peut citer: les vis, les plaques métalliques à dents, les anneaux, les boulons, les broches, .... Les broches, surtout, permettent de réaliser des assemblages de structures à grande portée. Les assemblages avec connecteurs métalliques sont classés dans le groupe des "assemblages mécaniques".

Vu que ces assemblages mécaniques sont souvent utilisés dans les structures en bois modernes, il était nécessaire de réaliser des études de leur comportement mécanique. 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 de modèles analytiques simples qui peuvent prédire le comportement complet d'un assemblage mécanique sur base des caractéristiques mécaniques de ces éléments constitutifs.

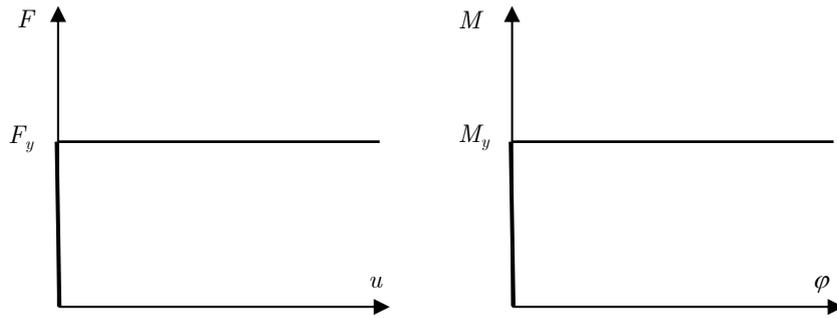
Notre étude débutera par un assemblage avec un seul connecteur, puisque c'est le cas de condition de chargement et de configuration d'assemblage le plus simple. Puis, une fois le comportement de l'assemblage avec un seul connecteur connu, le comportement d'un assemblage à plusieurs connecteurs sera envisagé.

## **1.3 Recherches antérieures sur le comportement des assemblages mécaniques**

### **1.3.1 Etude de la résistance**

Habituellement, les assemblages dans une structure en bois sont considérés comme "rigides" ou "rotules". Un assemblage considéré "rigide" assure, par définition, une continuité de déformation en rotation entre les éléments structuraux assemblés, tandis qu'un assemblage "rotule" ne reprend aucun effort de flexion; il y a donc, théoriquement, une liberté totale de rotation entre les éléments structuraux assemblés.

Aux ELU, les assemblages doivent avoir une résistance suffisamment grande pour qu'ils puissent supporter avec sécurité les efforts transmis par les éléments structuraux. Il faut, pour ce faire, disposer de méthodes d'évaluation de la résistance de l'assemblage. La résistance d'un assemblage mécanique est souvent estimée par la théorie de Johansen [STE-1995] qui est basée sur l'hypothèse que les deux "composantes" de l'assemblage (le connecteur et le bois) ont des comportements de type "rigide-plastique". Ceci est illustré à la Figure 1-1:



(a) Réponse rigide-plastique du bois (b) Réponse rigidité-plastique du connecteur

Figure 1-1 Comportement rigide-plastique idéalisé pour les "composantes" 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". L'Eurocode cinq (EC5) indique les mécanismes de ruine à considérer dans les assemblages à un plan de cisaillement et dans les assemblages à deux plans de cisaillement, comme illustré à la Figure 1-2.

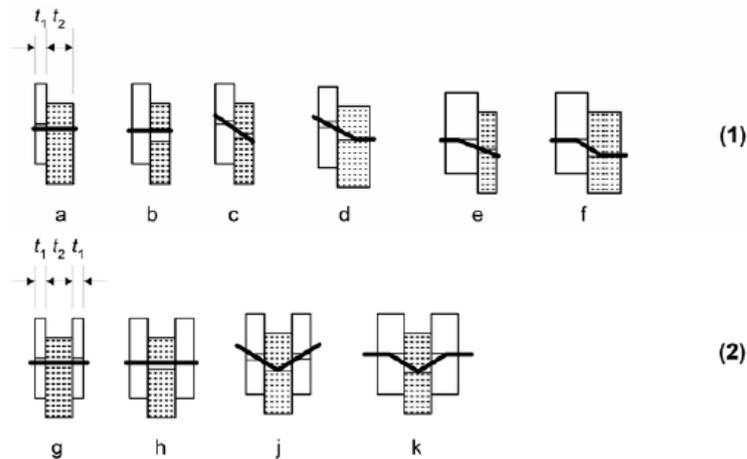


Figure 1-2 Les mécanismes de ruine proposés par [EN1995] pour les assemblages mécaniques: (1) à un plan de cisaillement, (2) à deux plans de cisaillement.

L'approche "rigide-plastique" semble un outil efficace pour prédire la résistance d'un assemblage. Mais elle exige un contrôle strict de ductilité pour les composantes constitutives de l'assemblage.

Les connecteurs métalliques sont souvent du matériau acier doux (classe 1), il n'y a donc pas de problème de ductilité à craindre pour la composante "connecteur". Mais qu'en est-il du bois ? Lorsque celui-ci est soumis à la pression diamétrale, via le connecteur, un comportement bilinéaire est souvent observé (Figure 1-3).

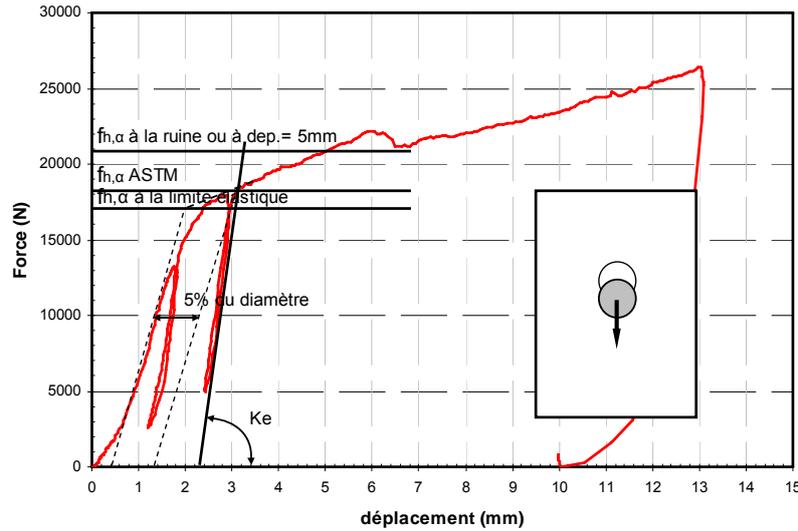


Figure 1-3 Courbe "force-enfoncement" obtenu via un test de portance locale.

D'après l'EC5, la portance locale  $f_{h,\alpha}$  d'un essai de portance locale (essai d'"embedding") est la valeur obtenue au moment où le bois atteint la ruine, ou après que le connecteur ait atteint 5 mm d'enfoncement. Cela veut dire qu'on arrête un essai soit à la ruine, soit à 5 mm d'enfoncement et que, par conséquent, on ne connaît pas vraiment la réponse du bois au-delà de 5 mm d'enfoncement (ce qui serait utile pour juger du caractère ductile).

Dans un assemblage à plusieurs connecteurs soumis à une sollicitation complexe ( $M_j$ ,  $N_j$  et  $T_j$ ), les binômes "connecteur-bois" n'atteignent pas leur résistance plastique en même temps, mais de façon successive, depuis le plus sollicité jusqu'au moins sollicité. Dans la réalité, lorsque le binôme "connecteur-bois" le plus sollicité atteint sa résistance plastique (avec la portance locale  $f_{h,\alpha}$  définie par l'EC5), soit parce qu'il a déjà atteint la ruine ou parce que le connecteur s'est enfoncé de 5 mm, nous ne savons plus s'il lui reste encore assez de ductilité pour que les autres "connecteur-bois" puissent successivement développer leur résistance plastique. Ceci est ennuyeux dans la mesure où la résistance de l'assemblage ne peut être définie comme l'intégrale de la résistance plastique de toutes les paires "connecteur-bois" que lorsque la condition de ductilité est satisfaite. L'utilisation de la portance locale définie par l'EC5 pour la détermination de la résistance d'un assemblage sur base de l'approche "rigide-plastique" de Johansen n'est pas nécessairement très sécuritaire.

La norme ASTM définit  $f_{h,\alpha}$  comme la portance locale lorsque le connecteur réalise un parcours d'enfoncement égal à 5% de son diamètre. Elle est normalement plus petite que celle définie par l'EC5 et assez proche de la portance locale définie au seuil plastique (Figure 1-3) [BLE-2000]. Ces valeurs de portance locale définies d'après ASTM ou au seuil plastique assurent une réserve de ductilité au bois lors de l'utilisation de l'approche "rigide-plastique". Il convient, en fait, de s'assurer de la ductilité suffisante des "connecteur-bois" les plus sollicités.

### 1.3.2 Etude de la rigidité

Le comportement des assemblages est en réalité intermédiaire entre deux comportements extrêmes supposés: rigide et rotulé. Ce caractère intermédiaire du comportement des assemblages est appelé "semi-rigide".

Dans l'approche traditionnelle, une analyse structurale formulée sur un comportement rigide ou rotulé des assemblages en bois est menée à bien même si on sait que ces derniers possèdent un comportement semi-rigide

Au cours des dernières années, les outils informatiques, de plus en plus performants, ont énormément facilité les mises en œuvres de l'analyse. La modélisation d'assemblages semi-rigides est aujourd'hui aisée et permet d'obtenir une représentation plus réaliste de la distribution des efforts entre les éléments structuraux. L'apport économique de la prise en compte de la semi-rigidité des assemblages est démontré par plusieurs articles [LAR-1998], [JEN-1998], [HAK], ...ainsi que par les résultats obtenus via les essais de validation effectués au cours du programme de recherche au CTIB [CTI-2004].

L'importance de la prise en compte de la semi-rigidité des assemblages dans le dimensionnement d'une structure en bois est bien connue, mais peu de recherches ont été menées avec pour objectif la détermination des caractéristiques de rigidité des assemblages; certains éléments de réponses existent, mais ils sont de nature très empiriques. L'EC5 propose des formules qui permettent de prédire la rigidité des assemblages mécaniques (à pointes, à vis, à broches, ...): pour les assemblage à broches soumis à des charges de service, la rigidité  $K_{ser}$  (N/mm) pour un plan de cisaillement et pour une broche peut être calculée d'après la formule (1.1); avec  $\rho_m$  (kg/m<sup>3</sup>), le poids propre du bois de l'assemblage et  $D$  (mm), le diamètre de la broche:

$$K_{ser} = \rho_m^{1.5} D / 25 \quad (1.1)$$

D'après cette formule, la rigidité élastique du comportement "broche-bois" ne dépend manifestement que de deux paramètres: le diamètre de la broche et le poids propre du bois. L'influence probablement significative de l'angle de la sollicitation par rapport aux fibres du bois (matériau fort anisotrope), de l'épaisseur des membrures assemblées, de la déformation en flexion et en cisaillement de la broche et peut-être de plusieurs autres paramètres n'est pas prise en compte dans la formule. Ceci est illustré à la Figure 1-4.

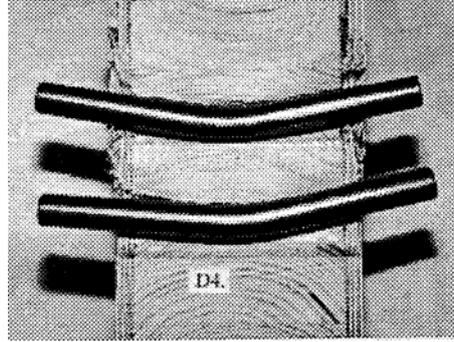


Figure 1-4 Illustration de la participation des éléments dans le comportement broche-bois, image extraite de [COST-C1].

Manifestement, il ne s'agit donc que d'une expression très simpliste qui permet de prédire de façon "moyenne" la rigidité élastique du comportement "connecteur-bois", quelle que soit la grandeur de tous les paramètres mentionnés ci-dessus.

## 1.4 Contenu de la thèse

Plusieurs publications, dont l'EC5, traitent essentiellement de la détermination de la résistance d'un assemblage mécanique, mais ne couvrent que très peu des problèmes de rigidité. Pourtant l'influence de la semi-rigidité des assemblages dans la structure est particulièrement importante.

La formule empirique de rigidité (1.1) proposée par l'EC5 apparaît comme très rudimentaire dans le calcul d'une analyse de structure performante et, par ailleurs, le succès de la **méthode des composantes** pour les constructions en acier et en mixtes ([EN1993] et [EN1994]) démontre son efficacité et sa capacité d'application à n'importe quel matériau. Ceci nous a conduit à nous lancer dans le développement de formules possédant un fondement physique et permettant une précision accrue pour la détermination, selon la méthode des composantes, du comportement semi-rigide des assemblages en bois.

La présente thèse, intitulée:

**"Développement de modèles analytiques pour la prédiction du comportement élastique des assemblages mécaniques à broches dans la construction en bois"**

est ainsi composée de 8 parties, de 10 chapitres et de 4 annexes principaux:

- La partie 1, constituée du présent chapitre 1 **"Introduction"** introduit le sujet de la thèse.
- La partie 2 **"Introduction aux assemblages"** se compose de deux chapitres (2 et 3):

- Le chapitre 2 "**Approche de la modélisation des assemblages**" présente les approches usuelles (traditionnelle et nouvelle) de la modélisation du comportement des assemblages. Nous y décrivons surtout l'approche nouvelle de comportement, dite "semi-rigide" des assemblages et montrons ses avantages par rapport à l'approche traditionnelle. Cette approche nécessite un outil adapté d'analyse structurale.
- Le chapitre 3 "**Représentation du comportement des assemblages**" présente la **méthode des composantes** et son application aux assemblages semi-rigides.
- La partie 3 "**Matériau bois et assemblages en bois**" se compose de deux chapitres (4 et 5):
  - Le chapitre 4 "**Matériau bois**" présente le bois et ses caractéristiques mécaniques. Une attention particulière est réservée au bois lamellé collé (BLC) qui est étudié dans le cadre de cette thèse.
  - Le chapitre 5 "**Assemblages en bois**" présente les deux familles principales d'assemblages dans les structures en bois: les assemblages traditionnels et les assemblages mécaniques. Il s'attache ensuite sur le caractère semi-rigide des assemblages mécaniques qui sont l'objet d'étude de la thèse.
- La partie 4 "**Objectifs et stratégie de développement**" se compose de deux chapitres (6 et 7):
  - Le chapitre 6 "**Objectifs de la thèse**" présente, comme son nom l'indique, les objectifs de la thèse. Il s'agit principalement du développement de formules analytiques de prédiction du comportement élastique d'assemblages mécaniques à broches.
  - Le chapitre 7 "**Stratégie de développement**" présente la stratégie de travail mise en oeuvre afin de réaliser les objectifs fixés. Il y a deux niveaux d'études: **l'étude locale des composantes** et **l'étude globale des assemblages**.
- La partie 5 "**Etude des composantes**" se compose d'un seul chapitre 8 "Etude de la composante d'embedding". Ce chapitre décrit tous les travaux portant sur la détermination du comportement élastique de la composante d'embedding".
- La partie 6 "**Etude des assemblages**" se compose de deux chapitres (9 et 10):
  - Le chapitre 9 "**Assemblage en cisaillement**" présente les résultats de tous les travaux relatifs à la détermination du comportement élastique des assemblages en cisaillement.
  - Le chapitre 10 "**Assemblage en flexion**" est l'équivalent du chapitre 9, mais pour les assemblages en flexion.
- La partie 7 "**Conclusions**" résume les apports de la thèse et présente des perspectives futures de développement.
- La partie 8 "**Annexes**" se compose de quatre annexes A, B, C et D:

- L'annexe A "**Rigidité de la composante d'"embedding"**" couvre l'établissement de la formule théorique de prédiction analytique du comportement élastique de la composante d'"embedding".
- L'annexe B "**Rigidité d'un assemblage à une broche**" présente le modèle et l'établissement de la formule analytique pour la détermination de la rigidité élastique d'un assemblage à une seule broche.
- L'annexe C "**Essais expérimentaux**" présente les essais expérimentaux du projet  $K_{ser}$  [CTI-2004] destinés à étudier le comportement élastique des assemblages à broches.
- L'annexe D "**Méthode de prédiction analytique du comportement élastique des assemblages à broches**" présente "pas à pas" le travail de développement relatif à la prédiction du comportement élastique d'un assemblage mécanique à broches grâce aux modèles analytiques proposés dans les derniers chapitres.



## **Partie 2 Introduction aux assemblages**

---

## **Partie 2 Introduction aux assemblages**

### **Chapitre 2 Approches de la modélisation des assemblages**

2.1 Approche traditionnelle de modélisation des assemblages pour l'analyse structurale ....	11
2.2 Approche "semi-rigide" de modélisation des assemblages pour l'analyse structurale ....	12
2.3 Avantages de l'approche semi-rigide.....	15
2.4 Résumé .....	16

### **Chapitre 3 Représentation du comportement des assemblages**

3.1 Introduction .....	19
3.2 Caractérisation d'un assemblage.....	19
3.2.1 Méthode des composantes .....	20
3.2.2 Modèle mécanique à ressorts .....	21
3.2.3 Caractérisation des composantes .....	21
3.2.4 Assemblage des composantes .....	22
3.3 Classification d'un assemblage .....	22
3.3.1 Classification en rigidité.....	22
3.3.2 Classification en résistance.....	23
3.3.3 Classification en ductilité .....	24
3.4 Idéalisation d'un assemblage .....	24
3.5 Modélisation d'un assemblage .....	25
3.6 Perspectives d'application .....	27

# Chapitre 2 Approches de la modélisation des assemblages

## 2.1 Approche traditionnelle de modélisation des assemblages pour l'analyse structurale

Lors de l'analyse structurale, les assemblages entre les éléments structuraux sont traditionnellement modélisés comme rigides ou rotulés. La procédure classique de dimensionnement des éléments et des assemblages est alors souvent réalisée comme le schéma ci-dessous, Figure 2-1:

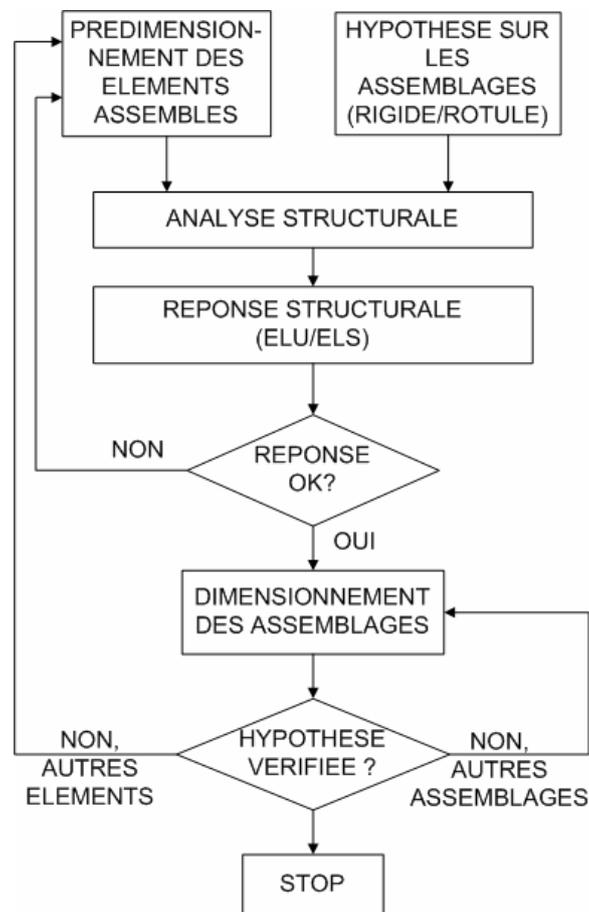


Figure 2-1 Procédure classique de dimensionnement des éléments et des assemblages dans une structure.

- Etape 1, **dimensionnement préliminaire**: Les éléments structuraux, poutres et colonnes, de la structure sont prédimensionnés, dans le cadre de l'hypothèse d'assemblages rigides ou rotulés.

- Etape 2, **analyse de structure**: l'analyse fournit des informations quant à la réponse de la structure (stabilité, efforts internes, déformation), sous l'application des charges extérieures.
- Etape 3, **vérification de structure**: la réponse de la structure doit strictement respecter les critères de sécurité à l'état limite ultime (ELU) et à l'état limite de service (ELS).
- Etape 4, **redimensionnement**: les éléments structuraux sont éventuellement redimensionnés itérativement afin de satisfaire des critères de l'étape 3.
- Etape 5, **dimensionnement des assemblages**: les assemblages sont dimensionnés de manière à ce qu'ils satisfassent les hypothèses formulées au départ sur leur comportement (rigide ou rotulé) et qu'ils résistent avec sécurité aux efforts transmis par les éléments structuraux (obtenus à l'étape 2).

L'approche traditionnelle permet de séparer le dimensionnement des éléments structuraux et des assemblages. Les éléments structuraux et les assemblages sont conçus par l'ingénieur, éventuellement en collaboration avec le constructeur pour ces derniers.

## 2.2 Approche "semi-rigide" de modélisation des assemblages pour l'analyse structurale

Le comportement des assemblages est, en réalité, intermédiaire entre les deux comportements extrêmes généralement supposés: rigide et rotulé. [EN1993] offre une possibilité de prendre en compte ce comportement réel par une approche dite "**approche semi-rigide des assemblages**".

Considérons la relation "moment-rotation" d'un assemblage, Figure 2-2:

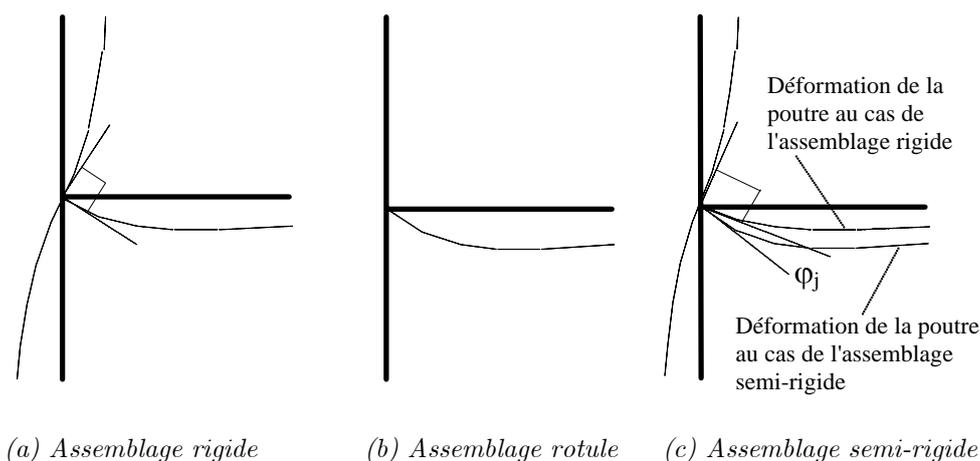


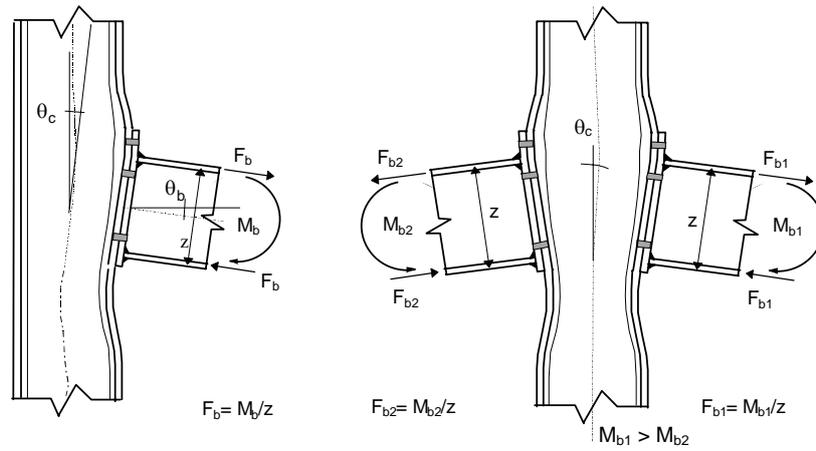
Figure 2-2 Classification d'assemblage selon la rigidité.

Si tous les éléments constitutifs (les composantes) de l'assemblage sont rigides (cas a), on a un assemblage rigide. Lors de l'application d'un moment, il n'y a presque pas de rotation re-

lative entre la poutre et la colonne, dans l'assemblage. Autrement dit, la poutre et la colonne tournent ensemble d'un même angle de rotation.

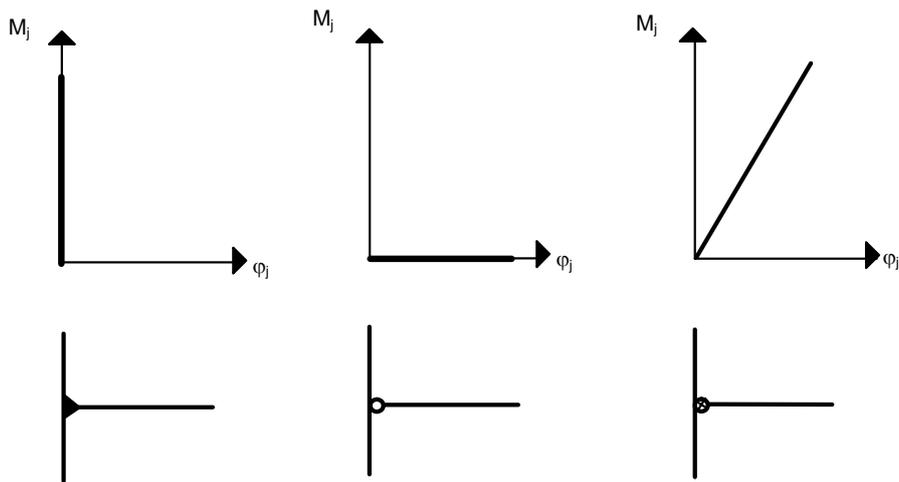
Si les composantes de l'assemblage n'ont presque pas de rigidité (cas b), on parle alors d'un assemblage rotulé. Ce type d'assemblage ne transmet aucune flexion de la poutre à la colonne. La poutre tourne donc librement par rapport à la colonne.

Dans le cas intermédiaire (c), les composantes de l'assemblage possèdent une certaine rigidité. Lors de l'application d'un moment, l'assemblage se déforme localement, ce qui entraîne une différence de rotation  $\varphi_j$  entre l'élément poutre et l'élément colonne, Figure 2-3.



(a) Configuration d'assemblage externe. (b) Configuration d'assemblage interne.

Figure 2-3 Déformation de l'assemblage sous application d'un moment dans une structure d'acier.



(a) Assemblage rigide (b) Assemblage rotule (c) Assemblage semi-rigide

Figure 2-4 Modélisation d'un assemblage en vue d'une analyse élastique globale de la structure.

Lors de la modélisation de la structure, un assemblage semi-rigide est représenté par un ressort de rotation, Figure 2-4. La rigidité  $S_j$  de ce ressort caractérise la rigidité en rotation de l'assemblage sous l'application d'un moment fléchissant ( $\varphi_j = M_j/S_j$ ). Une rigidité  $S_j$  nulle (ou

très petite) correspond à un assemblage simple (rotulé) qui ne transmet pas de moment fléchissant de la poutre à la colonne. Au contraire, une rigidité  $S_j$  infiniment grande (très grande) correspond à un assemblage continu (rigide).

La prise en compte de la semi rigidité des assemblages influe non seulement sur la déformabilité, mais modifie aussi l'ampleur et la distribution des efforts internes dans les éléments de la structure, Figure 2-5:

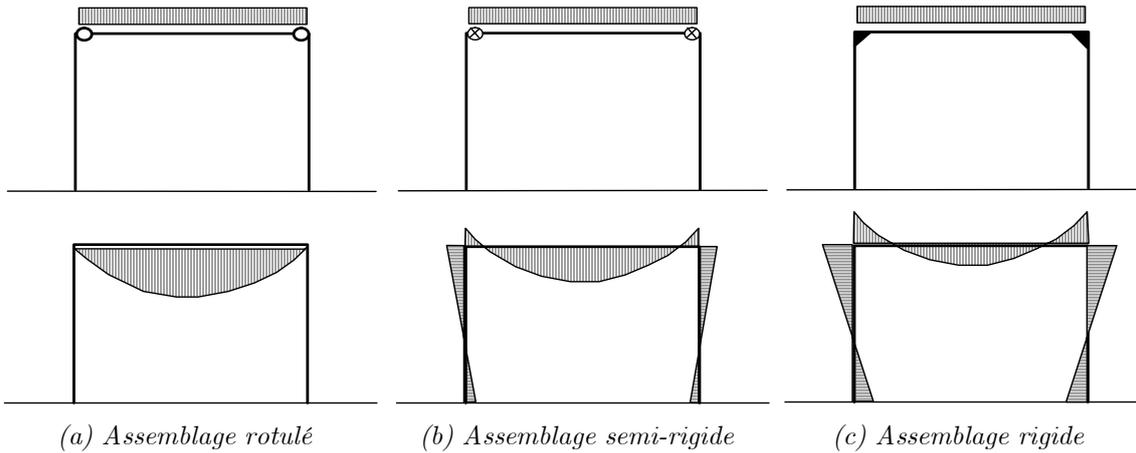


Figure 2-5 Influence du comportement semi-rigide de l'assemblage sur la réponse de la structure.

Une procédure nouvelle de dimensionnement des éléments structuraux et des assemblages dans une structure est alors permise; elle est illustrée à la Figure 2-6:

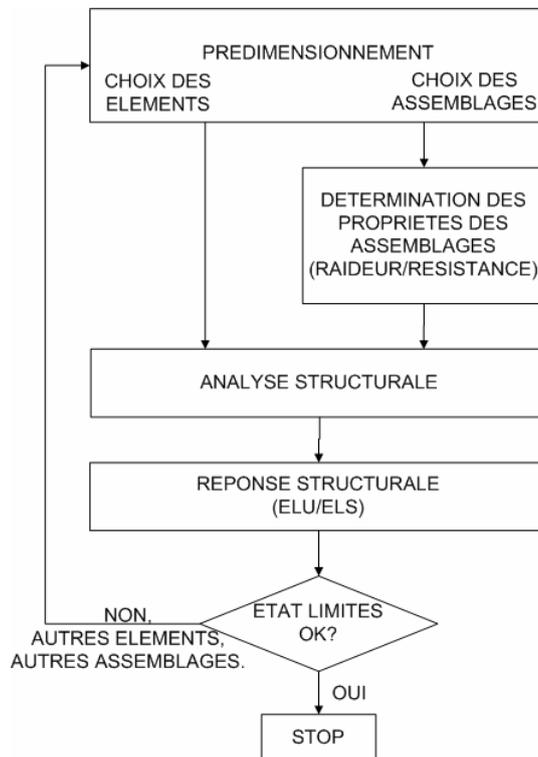


Figure 2-6 Procédure nouvelle de dimensionnement de structure.

- Etape 1, **dimensionnement préliminaire**: les éléments structuraux (poutres, colonnes et assemblages) sont tous prédimensionnés selon l'expérience de l'ingénieur. Pour les assemblages, il existe des approches permettant de prédire leurs propriétés mécaniques (rigidité, résistance), [JAS-1999].
- Etape 2, **analyse de structure**: la réponse de la structure (stabilité, efforts internes, déformation) sous l'application des charges extérieures est ici définie.
- Etape 3, **vérification de structure**: la réponse de la structure doit impérativement vérifier les critères de sécurité à l'état limite ultime (ELU) et à l'état limite de service (ELS).
- Etape 4, **redimensionnement**: tous les éléments structuraux (poutres, colonnes et assemblages) sont éventuellement redimensionnés, de manière itérative, afin de satisfaire les critères de l'étape 3.

La prise en compte de la semi-rigidité des assemblages dans l'analyse structurale procure une série d'avantages précisés ci-après.

### 2.3 Avantages de l'approche semi-rigide

Les assemblages habituels possèdent quasi tous, en réalité, un comportement semi-rigide. Les assemblages "rotulés" ou "rigides" ne correspondent en fait qu'à deux situations extrêmes que l'on a pris l'habitude de considérer dans le cadre de l'analyse traditionnelle, faute d'outils d'estimation du comportement réel. Récemment, des études portant sur la prédiction du comportement semi-rigide des assemblages pour les structures en acier [EN1993] et en mixtes [EN1994], se sont multipliées. Celles-ci ont montré que rien n'empêchait de considérer le comportement réel des assemblages et d'aussi les traiter comme de vrais éléments structuraux (au même titre que les poutres et colonnes).

Il faut immédiatement préciser que l'approche semi-rigide ne remet pas en cause l'utilisation de l'approche traditionnelle. Suivant les résistances et rigidités de l'assemblage vis-à-vis de celles de la poutre, les approximations d'assemblages "rigides" ou "rotulés" peuvent encore être formulées. Pour distinguer l'option à choisir, on a recouru à un système de classification présenté plus loin.

Outre son caractère plus réaliste, l'approche semi-rigide revêt aussi un intérêt économique. Pour s'en convaincre, envisageons les cas suivants:

- L'ingénieur décide d'appliquer, au départ, l'approche traditionnelle.
  - **L'assemblage est supposé rigide**. Dans la pratique, l'ingénieur (ou le constructeur) va renforcer autant que possible la configuration de l'assemblage, par l'addition de raidisseurs d'âme, par exemple, dans les structures en acier. Souvent,

ces renforcements engendrent des coûts de fabrication élevés. L'approche nouvelle, quant à elle, fournit des outils visant à vérifier si la présence de ces raidisseurs est vraiment nécessaire pour l'assemblage (en résistance et en rigidité). On peut aussi optimiser efficacement une configuration pour que l'assemblage soit rigide, mais pas plus.

- **L'assemblage est supposé rotulé.** Dans la pratique, un assemblage "rotulé" possède toujours une certaine rigidité. L'approche nouvelle permet d'estimer cette valeur; l'assemblage peut dans les faits reprendre un moment de flexion et la poutre est donc moins chargée. La taille de la poutre peut alors être réduite en tenant compte de la semi-rigidité effective de l'assemblage.
- L'ingénieur décide, en premier lieu, d'intégrer les propriétés mécaniques réelles des éléments structuraux (poutres, colonnes et assemblages) dans l'analyse de la structure (Figure 2-6). L'adoption de la nouvelle approche exige une bonne connaissance du compromis à réaliser entre, d'un côté, le coût et la complexité des assemblages et, de l'autre côté, l'optimisation du comportement global de la structure et de la performance de tous les éléments structuraux, dont les assemblages.
  - Dans une structure contreventée, l'utilisation des assemblages semi-rigides n'est généralement pas plus onéreuse que celle d'assemblages rotulés, mais conduit généralement à une diminution de poids des poutres, et donc de matériau à mettre en œuvre.
  - Dans une structure non contreventée, l'utilisation des assemblages semi-rigides, moins coûteux que les rigides, se solde par une possible augmentation de poids de la structure.

Diverses études technico-économiques réalisées sur des structures en acier ont montré qu'un bénéfice global de l'ordre de 5 à 10% peut être obtenu dans le premier cas, mais qu'une économie encore plus substantielle peuvent être entrevue dans le second cas et ce, la raison de l'importance des coûts de fabrication et de montage, en regard des coûts de matériaux.

L'ensemble des points évoqués dans ce paragraphe devra faire un jour l'objet d'une étude spécifique à la construction en bois.

## 2.4 Résumé

Dans ce chapitre, nous avons décrit les deux approches de modélisation des assemblages dans une structure. Avec le développement des outils informatiques, l'approche semi-rigide devient accessible et prend une place de plus en plus importante dans l'analyse des structures. Elle est plus générale, plus complète et plus réaliste en matière de modélisation des assemblages; de plus, elle englobe l'approche traditionnelle.

L'approche semi-rigide permet de regarder le comportement d'un assemblage au travers de ses composantes constitutives (voir §3). D'un côté, elle exige de la part de l'ingénieur une bonne connaissance du comportement de chacune de ces composantes mais de l'autre côté, lui donne une maîtrise totale quant au choix des assemblages et à leur degré d'optimisation.

D'un point de vue économique, l'approche semi-rigide des assemblages permet enfin à l'ingénieur de sélectionner les configurations d'assemblages optimum à la fois du point de vue du comportement et du coût global de la structure.



# Chapitre 3 Représentation du comportement des assemblages

## 3.1 Introduction

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

- 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.

L'intégration du comportement d'un assemblage dans l'analyse de structure doit être précédé de plusieurs étapes [JAS-1997]:

- **caractérisation de l'assemblage:** évaluation des caractéristiques mécaniques de l'assemblage;
- **classification de l'assemblage:** comparaison du comportement de l'assemblage (rigidité, résistance et ductilité) à des critères conventionnels afin de juger de la manière de le considérer dans l'analyse: rigide, rotulé ou semi-rigide (pour le critère de rigidité); à résistance complète, partielle ou nulle (pour le critère de résistance) et ductile, semi-ductile ou fragile (pour le critère de ductilité);
- **modélisation de l'assemblage:** représentation de l'assemblage dans l'analyse structurale;
- **idéalisation de l'assemblage:** comportement idéalisé de l'assemblage selon le type d'analyse.

Ces quatre étapes sont abordées en détail dans les pages suivantes.

## 3.2 Caractérisation d'un assemblage

Les caractéristiques mécaniques d'un assemblage en rotation peuvent être décrites par une courbe de comportement  $M_j-\phi$  (moment-rotation). Trois catégories de méthodes de caractérisation du comportement d'un assemblage sont souvent mentionnées:

- **les travaux expérimentaux** permettent d'étudier le comportement de l'assemblage à l'échelle réelle;

- **les approches numériques** permettent d'analyser le comportement de l'assemblage au travers de simulations numériques, le plus souvent aux éléments finis;
- **les méthodes analytiques** abordent le comportement de l'assemblage sous une analyse plus souvent théorique, parfois empirique. C'est l'approche la plus courante pour un dimensionnement pratique de structure. Le modèle analytique, développé dans la présente thèse, a une base théorique et se fonde sur l'application de la **méthode des composantes**.

### 3.2.1 Méthode des composantes

Le comportement semi-rigide est associé à des déformations locales au sein d'un assemblage sous l'effet des efforts appliqués. Chacune de ces sources est appelée "composante"; elle contribue, selon les caractéristiques propres de déformation, au comportement global de l'assemblage. L'analyse du comportement d'un assemblage au travers de l'étude de l'ensemble de ses composantes constitutives est appelée "méthode des composantes", Figure 3-1.

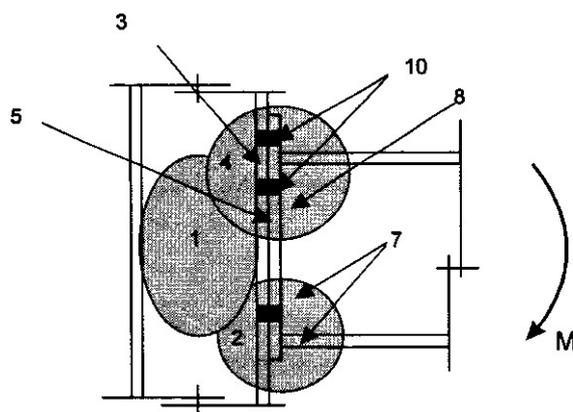


Figure 3-1 Composantes d'un assemblage poutre-colonne en acier.

(1. le panneau d'âme de la colonne en cisaillement ; 2. l'âme de la colonne en compression ; 3. la semelle de la colonne en flexion ; 4. l'âme de la colonne en tension, 5. la platine en flexion, 7. une partie d'âme et de semelle de la poutre en compression, 8. une partie d'âme et de semelle de la poutre en traction, 10. les boulons en traction).

Chacune des composantes peut être modélisée par un élément de ressort dont la réponse non linéaire "force-déformation" doit être définie. Le comportement d'un assemblage résulte de la recombinaison des réponses individuelles des ressorts assemblés. La procédure de détermination du comportement d'un assemblage, selon la méthode des composantes, peut être résumée en trois étapes:

- identification des composantes;
- caractérisation du comportement de chaque composante individuelle;
- assemblage des composantes en vue de la détermination du comportement de l'assemblage.

### 3.2.2 Modèle mécanique à ressorts

Une fois le comportement des composantes principales de l'assemblage déterminé, chacune entre elles est modélisée par un ressort. L'assemblage est cette fois effectivement représenté par un système des ressorts (Figure 3-2). Les efforts extérieurs lui sont alors appliqués et la réponse de l'assemblage tout entier est enfin déduite de l'étude du système à ressorts sur base des principes physiques tels que: équilibre des forces, compatibilité des déplacements, respect de résistance, respect de ductilité....

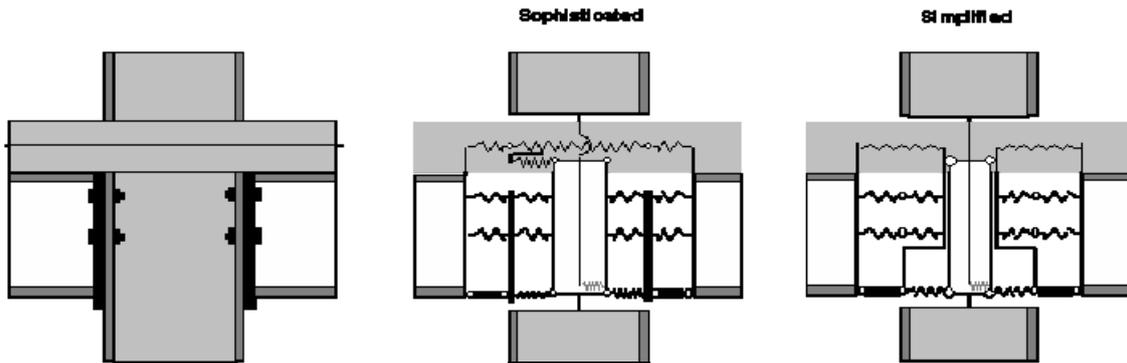


Figure 3-2 Modèle à ressorts pour un assemblage d'une structure mixte [JAS-1999].

La connaissance de la répartition des efforts dans l'assemblage permet de se rendre compte de la sollicitation des composantes et d'optimiser l'assemblage, par exemple pour des raisons de coûts. L'assemblage sera par exemple considéré comme efficace lorsque les efforts seront bien repartis entre les composantes, que ces dernières seront toutes exploitées jusqu'à leur capacité portante, ou encore que l'assemblage possèdera une ductilité appréciable.

### 3.2.3 Caractérisation des composantes

Le comportement d'une composante peut être déterminé par différentes approches: expérimentale, numérique ou encore analytique. Les approches expérimentale et numérique sont souvent utilisées dans les travaux de recherche afin d'étudier le comportement d'une composante non connue et d'enfin valider l'approche analytique. Cette dernière est la plus souvent utilisée dans les applications pratiques. Les trois caractéristiques mécaniques les plus importantes d'une composante sont théoriquement fournies par l'approche analytique (disponibles en [EN1993] et [EN1994] pour les composantes d'assemblages en acier ou mixtes):

- coefficient de rigidité  $k_i$ ;
- résistance  $F_{i,Rd}$ ;
- capacité de déformation  $w_{i,Rd}$ .

### 3.2.4 Assemblage des composantes

Les composantes sont à présent connues. Elles sont ensuite assemblées sur base de l'utilisation d'un modèle à ressorts, soit à l'aide de formules analytiques telles que celles fournies par les [EN1993] et [EN1994] pour les assemblages en acier ou mixtes. La précision du résultat obtenu dépend donc du niveau de caractérisation des composantes et de la complexité du modèle d'assemblage choisi.

La réponse d'un assemblage dépend des efforts appliqués. Dans les ossatures de bâtiments, les sollicitations principales des assemblages sont flexionnelles. C'est la raison par laquelle la plupart des modèles disponibles estiment le comportement en rotation des assemblages. La réponse de l'assemblage peut être représentée soit par des valeurs isolées (rigidité initiale, résistance de moment et capacité de rotation) ou bien par une courbe complète "moment-rotation".

Un modèle sophistiqué de prédiction donne bien sûr de bons résultats, mais entraîne inévitablement des calculs complexes. En pratique, une prédiction raisonnable du comportement de l'assemblage au travers d'un modèle simplifié est largement suffisante.

### 3.3 Classification d'un assemblage

Les caractéristiques mécaniques principales d'un assemblage sont la rigidité, la résistance et la ductilité; il existe donc trois types de classification des assemblages suivant ces trois caractéristiques:

- classification en rigidité;
- classification en résistance;
- classification en ductilité.

#### 3.3.1 Classification en rigidité

La comparaison entre la rigidité élastique de l'assemblage et deux limites de rigidité conventionnelles (Figure 3-3) permet de classer l'assemblage dans une des 3 catégories: rigide, semi-rigide ou rotulé.

La limite supérieure (resp. inférieure) définit la "zone rigide" (resp. "zone rotule") dans laquelle l'assemblage peut être considéré comme rigide (resp. rotulé). L'hypothèse de comportement rigide (resp. rotulé) de l'assemblage est admise si l'effet de celui-ci sur la réponse de la structure est proche de celui d'un assemblage réellement rigide (resp. rotulé); en fait, la différence est inférieure à 5%. La valeur de ces limites dépend de la rigidité relative entre

l'assemblage et les éléments structuraux (poutre dans le cas d'assemblages poutre-colonne) et de la rigidité globale de la structure.

Finalement, un assemblage ayant une rigidité élastique comprise entre ces deux limites doit être considéré comme semi-rigide et la structure doit être analysée selon la procédure "nouvelle" (Figure 2-6).

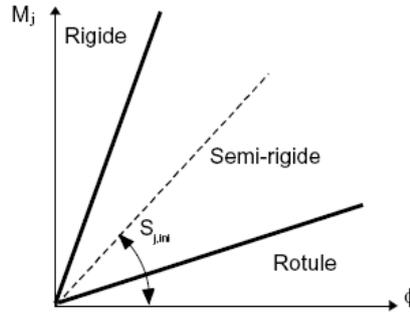


Figure 3-3 Classification en rigidité de l'assemblage (--- Rigidité élastique de l'assemblage, — Limite de rigidité).

### 3.3.2 Classification en résistance

La classification selon la résistance fait apparaître les notions d'assemblage à résistance complète, à résistance partielle ou nulle (Figure 3-4):

- Un assemblage à **résistance complète** possède une résistance plus grande que la résistance des éléments structuraux assemblés. Autrement dit, une éventuelle rotule plastique se formera plutôt dans les éléments structuraux (poutre, colonne).
- Un assemblage **nulle** possède une faible résistance, au maximum 25% de la résistance minimum requise pour avoir un assemblage à résistance complète.
- Un assemblage à **résistance partielle** constitue une solution intermédiaire.

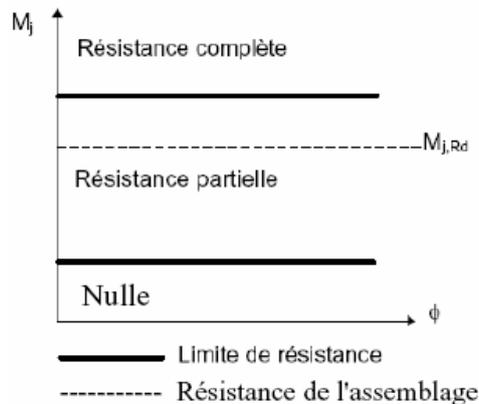


Figure 3-4 Classification en résistance de l'assemblage.

La classification en résistance est manifestement très utile pour l'analyse rigide-plastique de structure dans laquelle la procédure se réfère à la formation des rotules plastiques.

L'assemblage doit posséder une ductilité suffisante qui assure sa déformation lors de la formation de la rotule plastique. Même un assemblage à résistance complète dont la résistance est inférieure à 1.2 fois la résistance minimale définie ci-avant pour un assemblage à résistance complète doit posséder une ductilité suffisante nécessaire, au cas où, pour des raisons d'"over-strength" (sur-résistance), la rotule se formerait néanmoins dans l'assemblage. En effet, si le matériau des membrures a des caractéristiques mécaniques beaucoup plus importantes que les valeurs nominales, le calcul conduit alors à la sous-estimation de la résistance des éléments structuraux assemblés (poutre, colonne) et donc à l'éventuelle formation, en réalité, de la rotule plastique dans l'assemblage alors qu'on l'attend dans la poutre, par exemple.

### 3.3.3 Classification en ductilité

La ductilité d'un assemblage se réfère à sa capacité maximale de déformation en rotation. Si, dans les assemblages à résistance partielle ou bien nulle, pour un certain niveau de chargement, une rotule plastique se forme dans l'assemblage, une ductilité suffisante est requise pour assurer une éventuelle redistribution plastique des efforts dans la structure.

Il y a peu d'études consacrées à l'évaluation de la ductilité d'un assemblage. Les codes [EN1993] et [EN1994] fournissent des informations assez limitées sur ce sujet. En gros, un assemblage peut être classé en trois catégories:

- **Classe 1, ductile:** l'assemblage peut développer sa résistance plastique et possède une capacité importante de rotation, ce qui permet une analyse plastique.
- **Classe 2, semi-ductile:** l'assemblage peut développer sa résistance plastique, mais il possède une capacité de rotation limitée. Une vérification de ductilité doit être réalisée.
- **Classe 3, fragile:** une rupture fragile (instabilité) dans une composante limite la résistance de l'assemblage et empêche la redistribution plastique complète des efforts entre les composantes.

### 3.4 Idéalisations d'un assemblage

La prise en compte de la non-linéarité de comportement des assemblages dans les calculs pratiques n'est pas aisée. L'idéalisation du comportement d'un assemblage est alors très utile puisqu'elle diminue la charge de calcul, mais tant que la précision des résultats obtenus reste acceptable. Le modèle le plus souvent utilisé est "élastique-parfaitement-plastique". Son avan-

tage est qu'il est semblable à celui utilisé classiquement pour les éléments structuraux (poutre, colonne) en flexion (Figure 3-5).

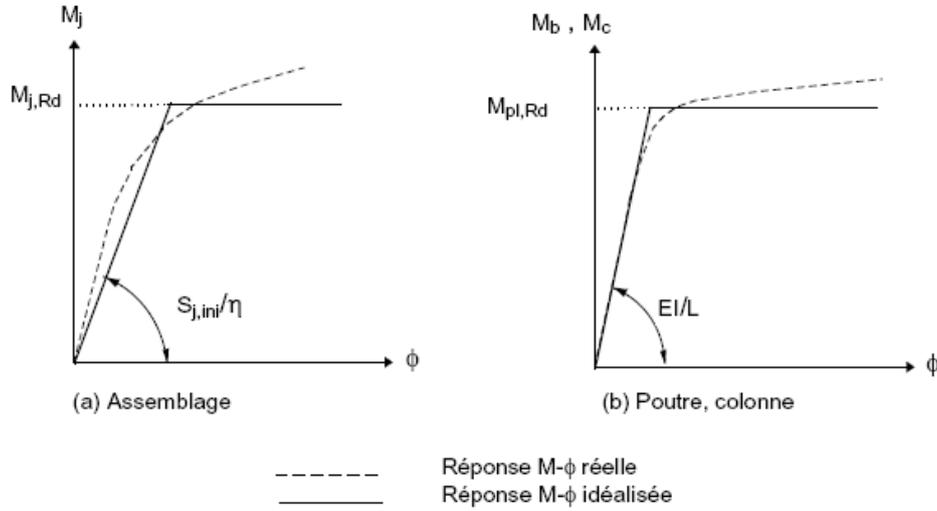


Figure 3-5 Bi-linéarisation du comportement moment-rotation d'un assemblage.

Bien sûr, l'idéalisation du comportement d'un assemblage dépend du type d'analyse structurale réalisée (Figure 3-6).

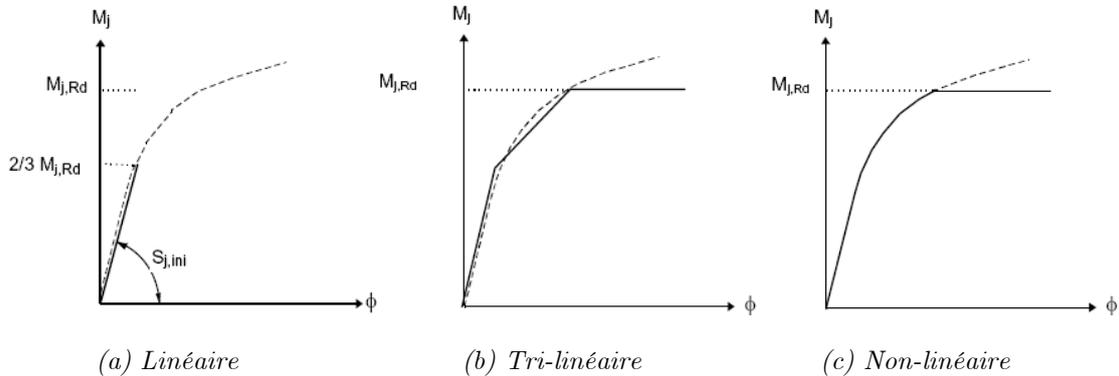


Figure 3-6 Idéalisations linéaire, tri-linéaire et non-linéaire du comportement  $M_j-\phi$  d'un assemblage [EN1993].

### 3.5 Modélisation d'un assemblage

Il existe trois types d'assemblage liés à la méthode d'analyse globale de structure et à la classification des assemblages. Une modélisation "continue" assure la continuité en rotation (en rigidité et/ou en résistance); une modélisation "semi-continue" correspond à un degré de rigidité et/ou de résistance partiel et une modélisation simple (rotulé) signifie qu'il n'y a pas de continuité en rotation entre les éléments structuraux assemblés (Figure 3-7).

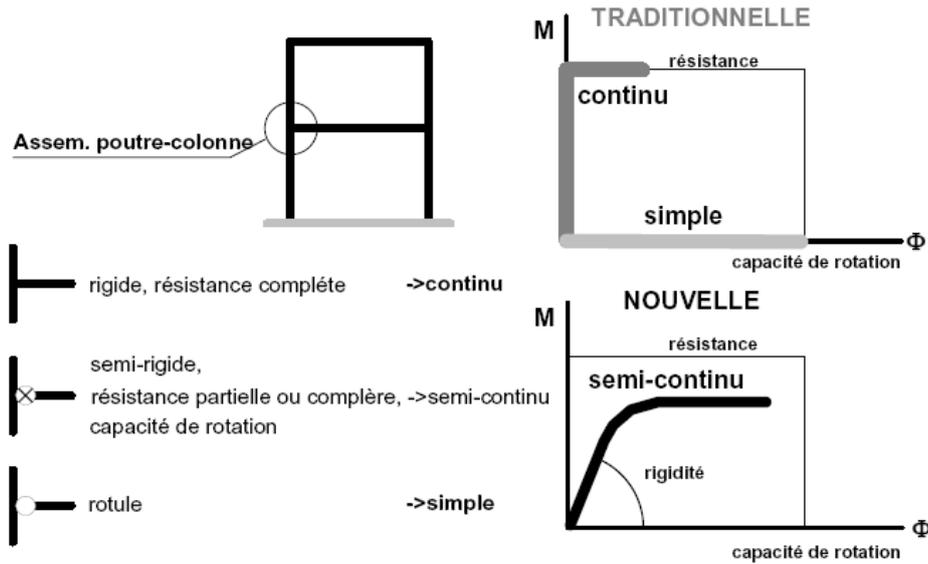


Figure 3-7 Modélisation d'un assemblage [JAS-1999].

Dans l'approche traditionnelle de dimensionnement, une modélisation continue ou simple des assemblages est systématiquement utilisée. Aujourd'hui, les outils informatiques de plus en plus performants facilitent les calculs d'analyse et la modélisation semi-continue des assemblages devient tout à fait abordable.

L'interprétation à donner aux termes "simple", "semi-continu" et "continu" dépend de la méthode d'analyse structurale adoptée: élastique, rigide-plastique ou bien élastique-plastique. Dans le cas d'une analyse rigide-plastique, seule la notion de résistance importe pour définir la modélisation retenue. Dans le cas d'une analyse élastique, la modélisation des assemblages repose uniquement sur la classification en rigidité (Tableau 3-1).

ANALYSE	CRITERE DE CLASSIFICATION	CLASSE		
		Rotulé	Semi-Rigide	Rigide
Elastique	Rigidité	Rotulé	Semi-Rigide	Rigide
Rigide-plastique	Résistance	Rotulé	Résistance partielle	Résistance complète
Elastique-Plastique	Rigidité et résistance	Rotulé	Semi-rigide/Résistance partielle Semi-rigide/Résistance complète	Rigide/Résistance complète
Modélisation		SIMPLE	SEMI-CONTINUE	CONTINUE

Tableau 3-1: Modélisation d'un assemblage [JAS-1999].

En pratique, la modélisation "semi-continue" est représentée par un ressort de rotation dont la réponse moment-rotation décrit le comportement de l'assemblage (Tableau 3-2):

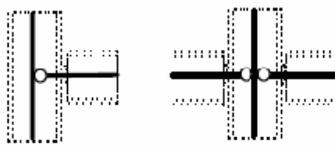
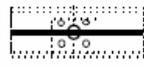
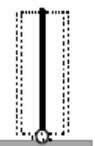
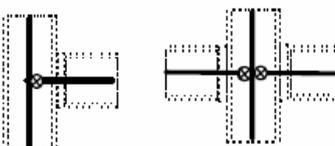
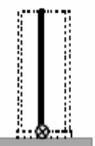
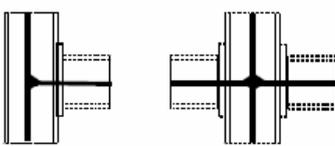
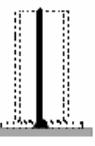
MODELISATION	POUTRE-COLONNE	BOUT-A-BOUT	COLONNE-PIED
SIMPLE			
SEMI-CONTINU			
CONTINU			

Tableau 3-2 Modélisation des assemblages dans l'analyse de structure.

### 3.6 Perspectives d'application

La méthode des composantes permet de considérer un assemblage comme un ensemble de composantes individuelles. Une fois les composantes constitutives caractérisées, le comportement de l'assemblage peut être prédit par l'intermédiaire de procédures dites "d'assemblage".

La méthode des composantes dans l'analyse du comportement d'un assemblage peut être comparée à celle des éléments finis qui est très familière de nos jours pour l'analyse du comportement d'un objet mécanique. Alors que la méthode des éléments finis s'affirme aujourd'hui comme un outil universel pour la résolution de nombreux problèmes mécaniques, la méthode des composantes semble se répandre largement dans le domaine des assemblages.

De nombreuses recherches relatives aux assemblages dans les structures en acier (surtout [EN1993]) ou mixtes (surtout [EN1994]) ont été menées ces dernières années; elles ont démontré tout l'intérêt de la méthode des composantes comme concept général de caractérisation du comportement des assemblages fait d'un quelconque matériau (acier, mixte et bientôt bois) et soumis à n'importe quel type de chargement (statique, dynamique, feu...).

Un matériau naturel comme le bois est d'une rigidité moindre que des autres matériaux comme l'acier et le béton. Un assemblage bois avec sa configuration spécifique reflète plus nettement un comportement semi-rigide que les autres matériaux précités. L'évidence du comportement semi-rigide d'un assemblage bois sera discutée dans la partie suivante.

Le succès rencontré par l'approche semi-rigide dans les structures en acier ou mixtes laisse à penser qu'elle constitue la méthode indiquée pour l'analyse du comportement des assemblages dans les structures en bois.



## **Partie 3 Matériau bois et assemblages en bois**

---

## **Partie 3 Matériau bois et assemblages en bois**

### **Chapitre 4 Matériau bois**

4.1 Introduction.....	29
4.2 Anatomie du bois.....	29
4.3 Bois lamellé collé (BLC) .....	32
4.3.1 Généralités.....	32
4.3.2 Comportement mécanique.....	33
4.3.3 Propriétés élastiques de BLC.....	34
4.4 Bois lamellé collé utilisé dans la recherche .....	35
4.4.1 Projet $K_{ser}$ avec CTIB .....	35
4.4.2 Détermination des propriétés mécanique du BLC .....	36
4.4.3 Traitement des résultats d'essais de matériau.....	38
4.4.3.1 Comportement du BLC parallèlement aux fibres .....	38
4.4.3.2 Comportement du BLC perpendiculairement aux fibres .....	40
4.4.3.3 Comportement du BL parallèlement aux fibres .....	40
4.4.3.4 Comportement du BL perpendiculairement aux fibres .....	41
4.4.3.5 Conclusions.....	42
4.4.4 Modèle élastique-parfaitement plastique pour le comportement mécanique du bois ..	43
4.5 Résumé .....	47

### **Chapitre 5 Assemblages en bois**

5.1 Introduction.....	49
5.2 Divers types d'assemblages en bois .....	49
5.2.1 Assemblages traditionnels .....	50
5.2.2 Assemblages mécaniques. ....	51
5.2.2.1 Assemblages par pointes.....	51
5.2.2.2 Assemblages vissés.....	52
5.2.2.3 Assemblages par connecteurs métalliques à dents .....	52
5.2.2.4 Assemblages par anneaux.....	52
5.2.2.5 Assemblages par boulons et broches .....	53
5.3 Comportement semi-rigide des assemblages mécaniques.....	54
5.4 Résumé .....	55

# Chapitre 4 Matériau bois

## 4.1 Introduction

Contrairement à l'acier et au béton, le matériau bois a été beaucoup moins développé pendant de longues années à cause de son origine naturelle (matériau fortement anisotrope, 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 matériau bois. Ajouté à son caractère écologique, ceci explique la croissance actuelle de son utilisation.

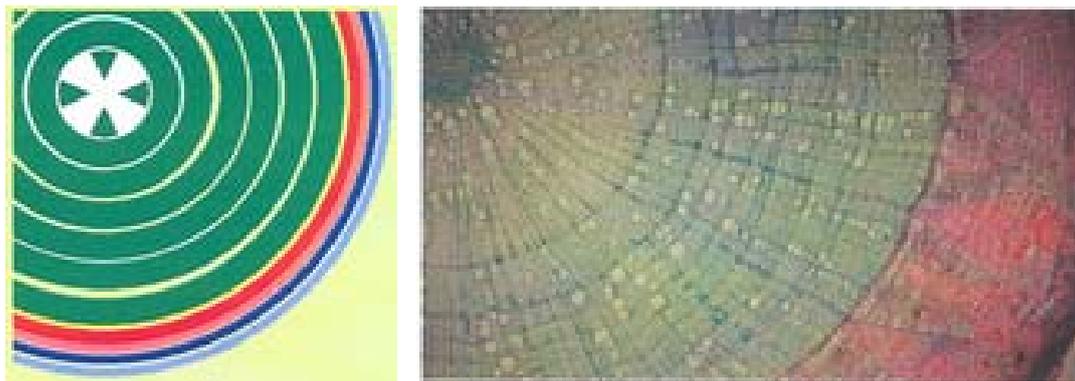
Une anatomie du bois est nécessaire afin de mieux comprendre sa formation à l'échelle microscopique et donc de rendre plus compréhensible le comportement macroscopique des éléments structuraux dans la construction en bois.

## 4.2 Anatomie du bois

Le bois est un ensemble de tissus composés de fibres ligneuses, de parenchyme et de vaisseaux. En fait, il est constitué en grande partie d'air. C'est ce qui lui donne une faible conductivité thermique et lui confère la faculté d'absorber ou de rejeter de l'humidité vers l'atmosphère.

Chez les espèces ligneuses, le fonctionnement du cambium (voir ci-après) suit un cycle saisonnier (dans les climats comportant des saisons bien distinctes). En région tempérée, le fonctionnement s'interrompt à l'automne et reprend au printemps. Chaque année, une couche nouvelle cylindrique de bois se forme à la périphérie extérieure de la précédente. Sur une coupe transversale de tronc, ces couches concentriques annuelles s'appellent des cernes.

Les cernes de bois sont souvent irréguliers. Leur épaisseur dépend des conditions climatiques de l'année durant laquelle ils se sont formés. Le liber (voir ci-après) éclate vers l'extérieur par suite de l'augmentation de diamètre. Dans la Figure 4-1(b), le cambium est la zone très fine qui sépare le bois (zone verte) et le liber (zone rouge). Le liège se trouve tout à l'extérieur du tronc.



(a) Schématisation d'un tronc de 6 ans. (b) Coupe anatomique transversale d'un tronc de tilleul de 8 ans

Figure 4-1 Autour des faisceaux de xylème primaire (au centre), les cernes de bois ont été formés ; le plus externe est le plus récent ; il est en contact avec le cambium (en jaune dans (a)) ; celui-ci a également formé des cernes de phloème mais les plus anciens ont éclaté par suite de l'augmentation du diamètre du tronc ; seul le plus récent (en rouge) est visible: toute l'écorce ancienne a disparu et est remplacée par la dernière production de liège (en bleu) [INT-a].

A l'échelle microscopique, l'arrangement structural du bois présente un maillon élémentaire qui est commun à toutes les espèces: la trachéide.

Dans une coupe transversale (Figure 4-2), on distingue le bois d'été à gauche (trachéides de faible diamètre à parois épaisses) et le bois de printemps à droite (trachéides de fort diamètre et à parois plus fines)

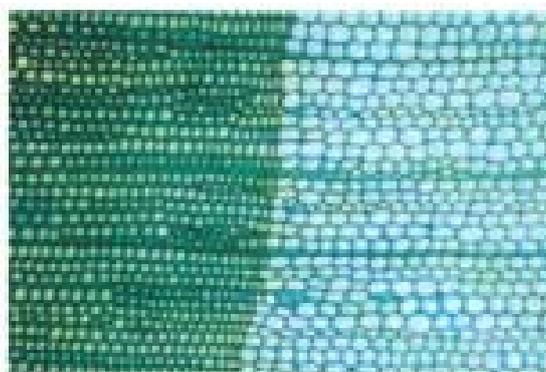
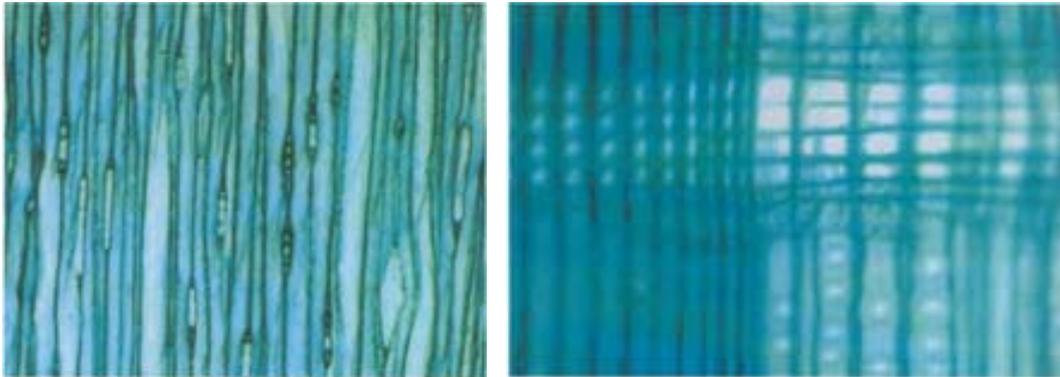


Figure 4-2 Coupe transversale de bois de pin à la limite de deux cernes [INT-a].

Une coupe longitudinale tangentielle, Figure 4-3(a), montre les éléments verticaux (les trachéides) sectionnés longitudinalement. Les trachéides sont les éléments conducteurs et de soutien. Elles sont aplaties et munies de parois transversales à leurs extrémités. Elles communiquent latéralement entre elles par des punctuations aréolées. Les rayons traversent les différents cernes radialement. Ils permettent une communication dans la masse du bois et sont responsables du fendage du bois dans le sens radial.

Une coupe longitudinale radiale, Figure 4-3(b), montre les éléments horizontaux (rayons) qui croisent les éléments verticaux (trachéides).



(a) Coupe longitudinale tangentielle.

(b) Coupe longitudinale radiale.

Figure 4-3 Coupes longitudinales tangentielle et radiale d'un tronc de bois [INT-a].

Avec leur forme cellulaire longiligne et élancée, les trachéides indiquent le sens des fibres du bois. Les trachéides forment des couches dont l'empilement successif constitue la macrostructure. Elles sont donc responsables des propriétés mécaniques du matériau bois. Cependant le niveau des connaissances actuelles ne permet pas, pour l'instant, d'établir le lien direct entre la macrostructure et la microstructure.

En raison de son origine végétale et du nombre d'essences, le bois présente une grande variété de propriétés mécaniques. On distingue deux grandes familles: les conifères, appelés aussi résineux, et les feuillus. Ce qui différencie ces deux familles, c'est non seulement la vie biologique de l'arbre, mais aussi la formation et la disposition des trachéides. Les résineux ont une structure poreuse qui laisse clairement apparaître les cernes annuels. Chez les feuillus, les trachéides se disposent apparemment de manière plus dense dans le cerne, donc la structure est donc moins poreuse. Chez les feuillus tropicaux, la présence des cernes est presque imperceptible.

La connaissance de la formation du bois à l'échelle microscopique permet de comprendre et d'étudier le comportement du bois dans la construction, c'est-à-dire à l'échelle macroscopique. La formation naturelle du bois nous permet de prévoir que ses propriétés mécaniques seront fortement anisotropes selon l'orientation par rapport aux fibres principales. En chaque point d'un tronc d'arbre, on distingue 3 axes d'orientation principaux et 3 coupes sont possibles perpendiculairement à ces axes (Figure 4-4). L'axe longitudinal joue le rôle le plus important, car les fibres sont essentiellement orientées dans ce sens. On distinguera donc les propriétés mécaniques parallèles aux fibres et celles perpendiculaires aux fibres.

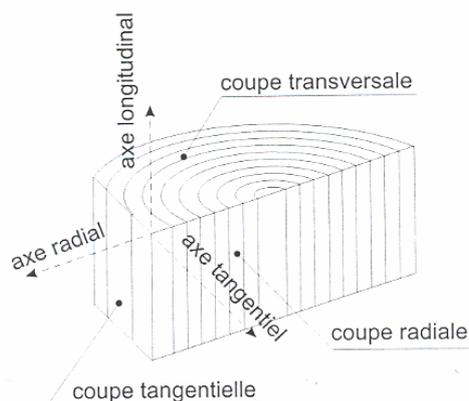


Figure 4-4 Coupes et axes dans un tronc d'arbre.

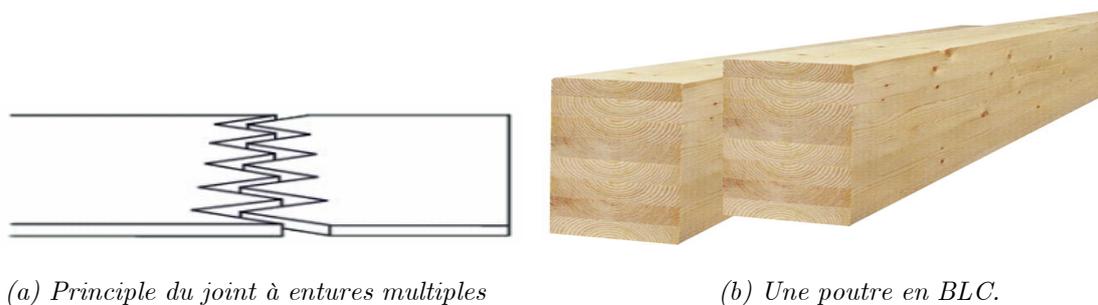
## 4.3 Bois lamellé collé (BLC)

### 4.3.1 Généralités

Pour éviter des problèmes liés au caractère fortement anisotrope et hétérogène du bois, on a développé des dérivés: les agglomérés, les contreplaqués et **les lamellés-collés**.

On appelle bois lamellé-collé (BLC), des pièces massives reconstituées à partir des lamelles de bois de dimensions relativement réduites par rapport à celles de la pièce. Assemblées par collage, les lamelles sont disposées de telle sorte que les fibres soient parallèles.

Parmi les dérivés, le BLC est l'un des plus intéressants. Il est beau et résistant. Les éléments de base sont des lamelles en résineux, le plus souvent de l'épicéa, d'une épaisseur maximale de 50mm et de 1,5 à 5 m de longueur. Ces lamelles sont séchées jusqu'à une humidité inférieure à 15%, rabotées et puis classées mécaniquement. Les nœuds d'extrémité des lamelles sont éliminés pour garantir un aboutage de bonne qualité. Elles sont ensuite raboutées à l'aide de joints collés à entures multiples, pour former des lamelles continues. Ces dernières sont alors juxtaposées et superposées afin de constituer un élément structural en BLC (Figure 4-5).



(a) Principe du joint à entures multiples

(b) Une poutre en BLC.

Figure 4-5 Principe de formation d'un élément en BLC.

La haute résistance du BLC par rapport à son poids permet de montrer que, à prix comparable, il est le plus solide des matériaux de construction en bois. Il est possible de fabriquer des éléments courbes ou droits, selon la demande.

Ce matériau revêt un grand intérêt pour la réalisation d'éléments de grande portée (donc, de grandes surfaces). Le BLC est aussi régulièrement utilisé dans des complexes sportifs et d'autres bâtiments publics où il est également apprécié pour des qualités acoustiques. La grande souplesse architecturale qu'il autorise en fait aussi un matériau de choix pour les maisons individuelles, églises, écoles... (Figure 4-6).

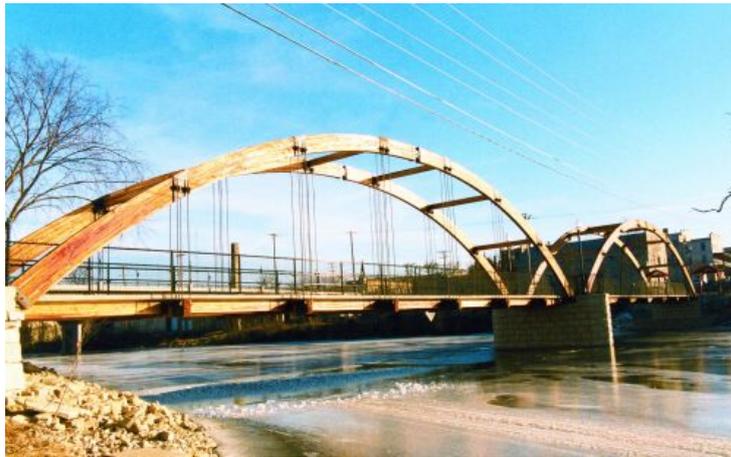


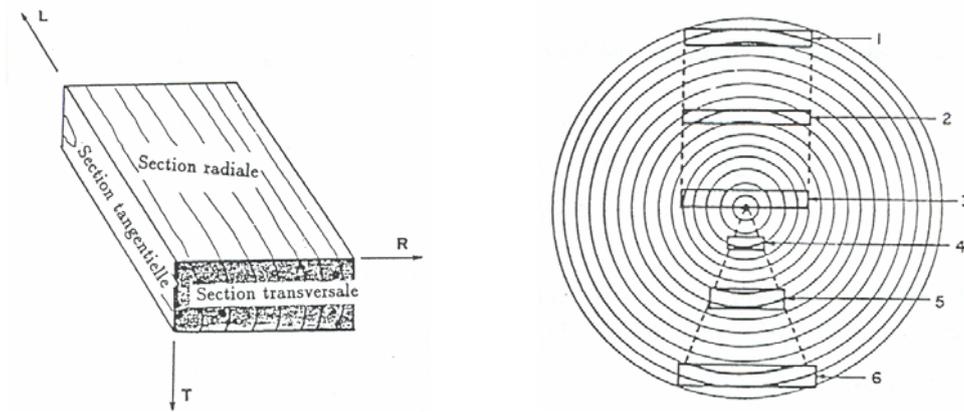
Figure 4-6 Un pont construit avec le BLC [INT-b].

Son coût d'entretien est bas grâce à son haut degré d'imperméabilité à l'humidité et à la pollution. Il offre également une grande stabilité au feu car, à l'inverse du métal, son mode de combustion et l'épaisseur des sections utilisées lui permettent de conserver longtemps sa résistance lorsqu'il est exposé à de fortes températures.

### 4.3.2 Comportement mécanique

L'étude anatomique du bois, au paragraphe précédent, devrait nous pousser à considérer le comportement mécanique d'un élément minuscule de bois lié à un repère local montré à la Figure 4-4. Pour le BLC, cette approche est suivie mais est appliquée à un élément plus grossier, les lamelles (Figure 4-7a).

Les lamelles sont les éléments de base pour la réalisation d'une poutre en BLC. Elles sont coupées normalement dans les différents endroits de la section transversale d'un arbre (Figure 4-7b); on distingue six types de coupe selon la taille et l'endroit. Dès lors, le choix d'un repère unique pour l'entièreté du matériau constituant l'élément structural en BLC constituera déjà une approximation.



(a) Les axes pour le matériau d'une lamelle (b) Toutes les coupes possibles pour former une lamelle.

Figure 4-7 Modèle orthotrope de matériau de la lamelle: L - direction longitudinale de la fibre ; R - direction radiale de la fibre ; T - direction tangentielle de la fibre. Image extraite de [BOU-1993]

D'après l'expérience, les caractéristiques mécaniques du bois dans le sens radial et tangential ne sont pas très différentes. Elles sont donc souvent assimilées; on parle alors de caractéristiques mécaniques perpendiculaires aux fibres [STE-1995].

Par conséquent, le BLC, en fonction de son mode de réalisation, possède des propriétés mécaniques assez homogènes; un seul repère (c à d généralisé pour toutes les lamelles constituantes) est ainsi considéré pour l'élément structural.

La théorie classique de la mécanique des milieux continus peut être utilisée pour le BLC à condition de l'acceptation des hypothèses suivantes:

- Les fibres longitudinales sont rectilignes et parallèles entre elles.
- Le BLC ne possède que deux types de comportements mécaniques, l'un parallèle aux fibres (à  $0^\circ$ ) et l'autre perpendiculaire aux fibres (à  $90^\circ$ ).

Une loi de matériau orthotrope est dès lors adoptée pour simuler le comportement du bois lamellé collé.

### 4.3.3 Propriétés élastiques de BLC

Pour une pièce de dimension suffisamment grande par rapport à la dimension des fibres, le comportement de petites déformations peut assez bien être représenté par la loi élastique de Hooke généralisée pour un matériau homogène élastique orthotrope.

Dans la construction du bois, les éléments structuraux travaillent souvent en plan: en flexion, en cisaillement, en traction ou bien en compression. Une hypothèse de comportement en état plan de contraintes est d'habitude formulée. Le vecteur des déformations en un point de

l'élément peut être exprimé en fonction du vecteur des contraintes par la loi de Hooke ( $\varepsilon = [S]\sigma$ ):

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} \quad (4.1)$$

La symétrie de la matrice  $[S]$  est assurée par la relation suivante:

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (4.2)$$

De plus, pour s'assurer que la matrice  $[S]$  est définie positive [BOU-1993], il convient que:

$$1 - \nu_{21}\nu_{12} > 0 \quad (4.3)$$

## 4.4 Bois lamellé collé utilisé dans la recherche

### 4.4.1 Projet $K_{ser}$ avec CTIB

Le point de départ des travaux présentés dans cette thèse est le programme de recherche " $K_{ser}$  - Modélisation de la déformation dans les modules de calcul des assemblages en bois", [CTI-2004].

Le bois lamellé-collé de résineux utilisé dans ce programme de recherche est issu d'une même production et répond à la classe de résistance GL28h. En fournissant le bois lamellé-collé appartenant à une classe de résistance donnée, le fabricant de bois s'engage à livrer un matériau répondant à des valeurs minimales en terme de résistance et de rigidité, mais ne donne aucune indication quant aux performances réelles du matériau. Toutes les caractéristiques mécaniques du bois peuvent éventuellement être estimées à partir de sa classe, à l'aide des normes disponibles (EC5). Bien que ces valeurs soient manifestement utiles dans la conception de la structure de bois, leur introduction dans les modèles numérique et analytique faisant l'objet de recherches constitue une approximation grossière. Il faut disposer des propriétés mécaniques réelles du bois étudié afin que les études comparatives, entre modèles et essais, soient significatives.

Les essais de matériau réalisés dans le cas de la présente étude visent:

- la détermination des propriétés de matériau du bois étudié ;

- la mise à disposition d'essais de référence.

Les éprouvettes ont été préparées au CTIB et les essais ont été réalisés au laboratoire M&S de l'Université de Liège. La description et les résultats d'essais sont présentés en détail dans un rapport interne du laboratoire M&S [LY-2004]. Seul, un résumé en est fait dans le présent document.

#### 4.4.2 Détermination des propriétés mécanique du BLC

Trois procédés de détermination des propriétés mécaniques du BLC sont généralement utilisés selon les besoins:

- Premièrement, toutes les propriétés du bois sont déterminées directement à partir des essais selon un processus proposé par [EN1193] et par [prEN408]. D'un côté, cette approche donne évidemment, avec certitude, toutes les valeurs des paramètres mécaniques de matériau. Mais d'un autre côté, elle est très coûteuse, et ce, en raison du nombre considérable d'essais à réaliser.
- Deuxièmement, seules deux propriétés principales du BLC,  $f_{m,g,k}$  et  $E_{0,g,moy}$  sont déterminées à partir des essais, en accord avec [EN338] ou bien [prEN408]. Les autres propriétés sont déduites par les formules proposées dans [EN1194]. Cette approche donne seulement deux valeurs ( $f_{m,g,k}$  et  $E_{0,g,moy}$ ) avec certitude; elle est moins coûteuse, mais le degré de connaissances des autres propriétés reste limité.
- Troisièmement, deux propriétés principales du BL,  $f_{t,0,l,k}$  (ou  $f_{m,l,k}$ ) et  $E_{0,l,moy}$  sont déterminées à partir des essais ([EN384] ou [prEN408]). Les autres propriétés sont à nouveau déduites des formules proposées par [EN1194].

L'étude de la rigidité des assemblages requiert la parfaite connaissance des modules élastiques de déformation en compression et en traction, parallèle et perpendiculaire aux fibres. Dès lors, il convient de mener des essais qui permettent de déterminer ces modules élastiques. Les autres paramètres, moins importants, en seront donc déduits par l'intermédiaire des formules disponibles.

Vu que l'effet d'"embedding", comme on le verra au chapitre 8, touche en même temps au comportement du BLC (niveau global) et au comportement du BL (niveau local), les essais ont par conséquent été menés aussi bien sur le BLC que sur le BL. Les résultats des deux séries d'essais devraient être complémentaires. En effet, comme les lamelles sont les éléments constitutifs principaux du BLC, les propriétés mécaniques caractéristiques de ce dernier pourraient représenter une sorte de moyenne de celles des lamelles.

Les essais de caractérisation qui ont été réalisés sont repris aux deux tableaux suivants:

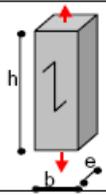
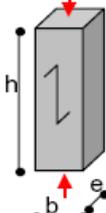
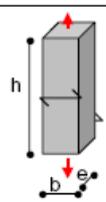
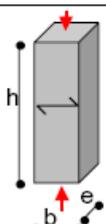
<b>BOIS LAMELLE (BL)</b>				
<b>5. BL en traction parallèle aux fibres</b>				
	1	LT0-1	$F_{\max,est}$ : 28.350 KN	hxbxe : 405x45x45
	2	LT0-2	$F_{\max,est}$ : 28.350 KN	hxbxe : 405x45x45
	3	LT0-3	$F_{\max,est}$ : 28.350 KN	hxbxe : 405x45x45
<b>6. BL en compression parallèle aux fibres</b>				
	1	LC0-1	$F_{\max,est}$ : 42.525 KN	hxbxe : 270x45x45
	2	LC0-2	$F_{\max,est}$ : 42.525 KN	hxbxe : 270x45x45
	3	LC0-3	$F_{\max,est}$ : 42.525 KN	hxbxe : 270x45x45
	4	LC0-4	$F_{\max,est}$ : 42.525 KN	hxbxe : 270x45x45
<b>7. BL en traction perpendiculaire aux fibres</b>				
	1	LT90-1	$F_{\max,est}$ : 0.896 KN	hxbxe : 180x32x70
	2	LT90-2	$F_{\max,est}$ : 0.896 KN	hxbxe : 180x32x70
	3	LT90-3	$F_{\max,est}$ : 0.896 KN	hxbxe : 180x32x70
<b>8. BL en compression perpendiculaire aux fibres</b>				
	1	LC90-1	$F_{\max,est}$ : 11.872 KN	hxbxe : 90x32x70
	2	LC90-2	$F_{\max,est}$ : 11.872 KN	hxbxe : 90x32x70
	3	LC90-3	$F_{\max,est}$ : 11.872 KN	hxbxe : 90x32x70
	4	LC90-5	$F_{\max,est}$ : 11.872 KN	hxbxe : 90x32x70

Tableau 4-1 Informations associées à chacune des éprouvettes en BL pour la caractérisation du matériau. (\*)  $F_{\max,est}$  est la force maximum estimée qui devrait pouvoir être appliqué à l'éprouvette.

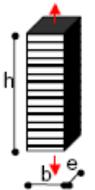
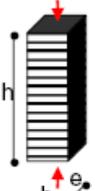
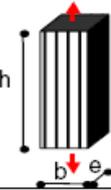
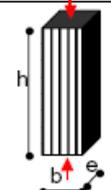
BOIS LAMELLE COLLE (BLC)				
<b>1. BLC en traction perpendiculaire aux fibres</b>				
	1	GLT90-1	$F_{\max,est}$ : 11.25 KN	hxbxe : 400x115x217
	2	GLT90-2	$F_{\max,est}$ : 11.25 KN	hxbxe : 400x115x217
	3	GLT90-3	$F_{\max,est}$ : 11.25 KN	hxbxe : 400x115x217
<b>2. BLC en compression perpendiculaire aux fibres</b>				
	1	GL90-1	$F_{\max,est}$ : 132.251 KN	hxbxe : 200x115x217
	2	GL90-3	$F_{\max,est}$ : 132.251 KN	hxbxe : 200x115x217
	3	GL90-4	$F_{\max,est}$ : 132.251 KN	hxbxe : 200x115x217
	4	GL90-5	$F_{\max,est}$ : 132.251 KN	hxbxe : 200x115x217
<b>3. BLC en traction parallèle aux fibres</b>				
	1	GLT0-2	$F_{\max,est}$ : 137.7 KN	hxbxe : 810x90x90
	2	GLT0-4	$F_{\max,est}$ : 137.7 KN	hxbxe : 810x90x90
	3	GLT0-6	$F_{\max,est}$ : 137.7 KN	hxbxe : 810x90x90
<b>4. BLC en compression parallèle aux fibres</b>				
	1	GL0-2	$F_{\max,est}$ : 210000 N	hxbxe : 540x90x90
	2	GL0-3	$F_{\max,est}$ : 210000 N	hxbxe : 540x90x90
	3	GL0-6	$F_{\max,est}$ : 210000 N	hxbxe : 540x90x90

Tableau 4-2 Informations associées à chacune des éprouvettes en BLC pour la caractérisation du matériau. (\*)  $F_{\max,est}$  est la force maximum estimée qui devrait pouvoir être appliquée à l'éprouvette.

#### 4.4.3 Traitement des résultats d'essais de matériau

Le protocole expérimental et les résultats des essais de matériau sont présentés en détail dans un rapport interne du laboratoire M&S, Université de Liège, [LY-2004]. Ces résultats sont traités afin de pouvoir les utiliser dans le cadre de cette thèse.

##### 4.4.3.1 Comportement du BLC parallèlement aux fibres

Les essais doivent être, en règle générale, menés sur des éprouvettes aussi homogènes que possible. Si cette condition est satisfaite, la résistance obtenue en traction devrait être plus grande que celle obtenue en compression [STE-1995]. Mais vu la nature du bois, il y a souvent des défauts dans une éprouvette; les éprouvettes de traction risquent toujours de périr prématurément. Alors, les valeurs de résistance obtenues en traction sont, à cause des défauts, souvent plus petites que celles obtenues en compression.

En compression parallèle aux fibres, en plus du problème de la résistance du matériau, intervient un autre phénomène: le flambement des trachéides. En fait, l'étude anatomique montre que les fibres, dans un élément en bois, ne sont pas tout à fait rectilignes le long de son axe (Figure 4-3a). Ce "défaut" cause une courbure des fibres (une sorte d'imperfection initiale) par rapport à la force appliquée, ce qui amorce le phénomène de flambement. La ruine d'une éprouvette en compression parallèle aux fibres est donc une combinaison de deux phénomènes, la résistance et le flambement des fibres.

Ainsi, que ce soit en traction ou en compression, l'imperfection naturelle du bois perturbe l'évaluation des caractéristiques mécaniques, surtout celles des paramètres post-élastiques. Mais les imperfections faisant partie intégrante du matériau bois, les valeurs obtenues lors des essais de caractérisation qui les intègrent couvrent finalement la réalité des phénomènes.

La Figure 4-8 présente les résultats des essais en traction et en compression parallèle aux fibres. En traction, le BLC possède un comportement élastique jusqu'à l'atteint d'une ruine à caractère fragile; en compression, le comportement élasto-plastique est caractérisé par une grande ductilité.

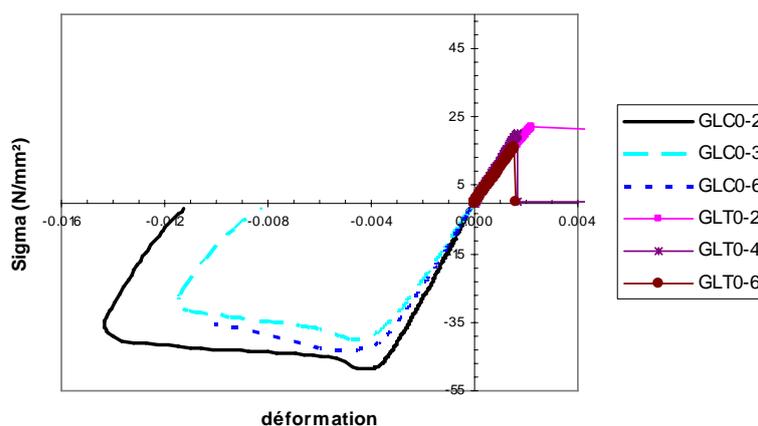


Figure 4-8 Comportement du BLC parallèlement aux fibres.

Nous supposons que le bois a un module élastique équivalent en compression et en traction, [NAT-2004], la partie élastique des courbes de comportement semblant similaire pour ces deux sollicitations. Etant donné que les éprouvettes ont été traitées pour avoir une humidité relative conforme à celle recommandée par l'EC5 et ont été soumises aux essais dans les conditions prescrites par l'EC5, la petite différence qui existe entre les courbes reportées à la Figure 4-8 est probablement due à la différence de la masse volumique des éprouvettes.

Les valeurs du module d'élasticité et de la résistance ultime obtenues lors des essais sont reportées au Tableau 4-3, ainsi que la masse volumique des éprouvettes. L'étude de la relation entre la masse volumique et les paramètres mécanique est présentée au §4.4.4.

#### 4.4.3.2 Comportement du BLC perpendiculairement aux fibres

Dans la direction perpendiculaire aux fibres, le bois est moins résistant que dans la direction parallèle aux fibres. A l'instar du comportement "parallèle aux fibres", le bois est également fragile en traction et ductile en compression (Figure 4-9):

- En traction, le bois a un comportement élastique et fragile. La rupture s'amorce souvent à cause de défauts dans l'éprouvette. Ces défauts peuvent être le collage entre les lamelles, la présence d'une fissure initiale,....
- En compression, les fibres sont de plus en plus compactées l'un contre l'autre au cours de chargement, ce qui génère un comportement très ductile (sa déformation maximale peut atteindre à 20%) jusqu'à l'écrasement des fibres. Un comportement de type bilinéaire est aussi observé.

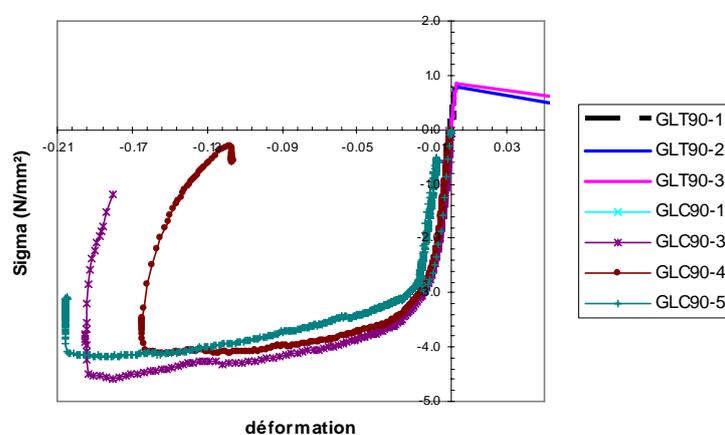


Figure 4-9 Comportement du bois lamellé collé perpendiculairement aux fibres.

Que ce soit en traction ou en compression, les valeurs du module élastique et l'allure du comportement observées pour les différents essais (Figure 4-9) sont presque identiques. Ceci peut s'expliquer par la faible dispersion de la qualité du bois des éprouvettes.

Les valeurs du module d'élasticité et de la résistance ultime obtenues lors des essais sont reportées au Tableau 4-3, à nouveau avec la masse volumique des éprouvettes.

#### 4.4.3.3 Comportement du BL parallèlement aux fibres

Le BL a, en gros, un comportement similaire à celui du BLC. Parallèlement aux fibres, le comportement du BL est fragile en traction et ductile en compression (Figure 4-10). En traction, le BL se comporte élastiquement et atteint brusquement la charge ultime. En compression, le flambement peut parfois survenir; la ruine est associée, par conséquent, soit à un manque de résistance (courbes LC0-1 et LC04), soit à une instabilité (courbes LC0-2 et LC0-3).

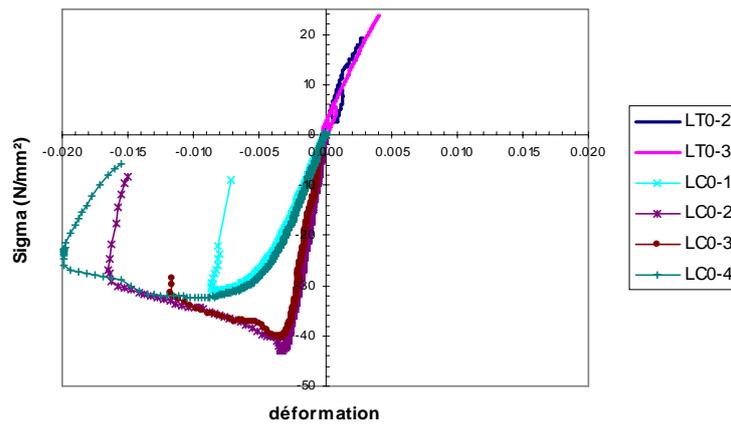


Figure 4-10 Comportement du bois lamelle parallèlement aux fibres.

Si on suppose que les éprouvettes de BL ont une même provenance, la différence de comportement entre les courbes doit être due à la densité de disposition des fibres des éprouvettes, donc à leur masse volumique. Les valeurs du module d'élasticité et de la résistance ultime obtenues par essais sont reprises au Tableau 4-3, où sont également indiquées les valeurs de la masse volumique.

#### 4.4.3.4 Comportement du BL perpendiculairement aux fibres

En compression "perpendiculaire aux fibres" des lamelles, l'observation des résultats montre que le comportement post-élastique est très sensible à la disposition des fibres. Ceci explique les différents modes de ruine qui sont observés (Figure 4-7b). Cependant, le module élastique des éprouvettes semble moins influencé par ce facteur.

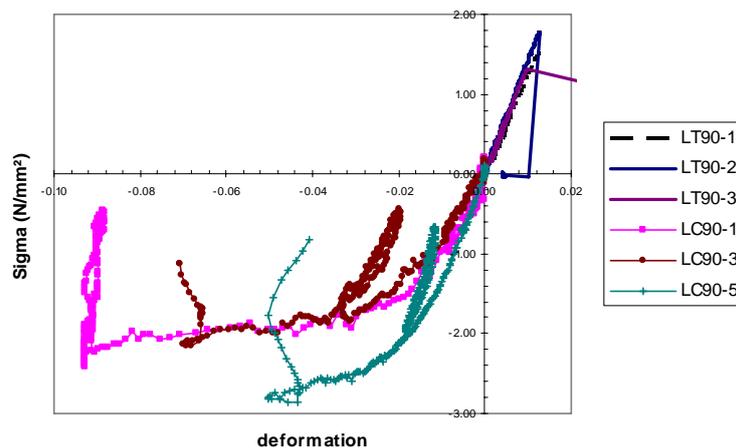


Figure 4-11 Comportement du bois lamelle perpendiculairement aux fibres.

Les valeurs du module d'élasticité et de la résistance ultime obtenues sont là aussi reportées au Tableau 4-3 avec les valeurs de la masse volumique correspondantes.

#### 4.4.3.5 Conclusions

A la suite des essais de matériau réalisés sur le BL et le BLC, les conclusions suivantes peuvent être tirées quant aux différents comportements du bois selon le type de sollicitation (en traction ou en compression) et la direction de la sollicitation (parallèle ou perpendiculaire aux fibres):

- en traction "parallèle aux fibres", le bois a un comportement élastique et fragile;
- en compression "parallèle aux fibres", le bois a un comportement non linéaire et ductile; l'apparition du flambement des fibres empêche souvent d'aller jusqu'au bout de la caractérisation;
- en traction "perpendiculaire aux fibres", le bois a aussi un comportement élastique et fragile;
- en compression "perpendiculaire aux fibres", le bois a un comportement presque bilinéaire (élasto-plastique) et très ductile;
- l'hypothèse d'un module élastique équivalent en compression et en traction est acceptable.

Que ce soit en traction ou en compression, l'imperfection naturelle du bois perturbe l'évaluation des caractéristiques mécaniques, surtout les caractéristiques post-élastiques. Mais les imperfections font partie intégrante du matériau bois et les valeurs obtenues lors des essais de caractérisation, qui les intègrent, couvrent finalement la réalité des phénomènes.

En raison de son origine végétale, même pour une même essence de bois et la provenance d'un même arbre, la densité des fibres, qui est responsable des propriétés mécaniques du bois, diffère d'un endroit à l'autre. Ce caractère hétérogène explique le caractère non uniforme des propriétés mécaniques des lamelles (BL). Quant au BLC, le mode de fabrication - par assemblage des lamelles - homogénéise visiblement ses propriétés mécaniques.

Les fibres (les trachéides) sont responsables des propriétés mécaniques du bois et, par conséquent, la densité du bois, et donc sa masse volumique, reflète pratiquement la qualité mécanique des éprouvettes (Tableau 4-3). Dès lors, une étude statistique visant à mettre en relation les propriétés mécaniques mesurées des éprouvettes et la masse volumique a été menée à bien. Les BL et BLC auxquels on se réfère dans la présente recherche provenant d'une même essence de bois; les résultats mesurés des éprouvettes de BL et BLC, seront donc tous utilisés pour constituer la base de données.

	masse volumique	E0	fu,0		masse volumique	E90	fu,90
	KG/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>		KG/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
GLT0	488.520	11660.214	22.122	GLT90	411.940	306.498	0.778
	462.820	11415.657	20.149		415.350	323.183	0.693
	455.220	10030.213	16.351		413.640	303.854	0.557
LT0	398.870	9373.259	19.282	LT90	382.440	138.424	1.546
	322.720	5424.951	23.724		392.860	154.494	1.583
	513.720	14402.610	48.599		385.660	154.558	1.309
GLC0	513.720	14402.610	48.599	GLC90	450.210	341.302	4.082
	504.570	11185.600	40.124		462.630	372.450	4.573
	500.910	12618.577	43.170		458.630	332.077	4.125
LC0	434.930	6253.021	30.990	LC90	461.430	226.066	4.178
	541.380	15166.074	42.868		364.580	83.517	2.410
	533.150	15778.429	40.242		372.520	90.753	2.151
	416.460	6689.952	32.429		392.86	142.111	2.856

(a) parallèlement aux fibres.

(b) perpendiculairement aux fibres.

Tableau 4-3: Caractéristiques mécaniques mesurées des éprouvettes:  $E_0$  est le module élastique parallèle aux fibres et  $E_{90}$ , perpendiculaire aux fibres;  $f_{u,0}$  est la résistance ultime en traction ou en compression ( $f_{uc,0}$  ou  $f_{ut,0}$ ) parallèle aux fibres et  $f_{u,90}$ , perpendiculaire aux fibres ( $f_{uc,90}$  ou  $f_{ut,90}$ ).

#### 4.4.4 Modèle élastique-parfaitement plastique pour le comportement mécanique du bois

Vu la complexité du comportement du bois, un comportement simplifié est envisagé. Ceci doit approcher au mieux le comportement réel du bois dans le domaine de déformation étudié (élastique et un peu plastique). En effet, l'objectif de la thèse vise la prédiction du comportement élastique des assemblages. La description du matériau bois est alors moins exigeante. Elle doit comporter le moins de paramètres possibles, couvrir correctement la phase élastique mais permettre néanmoins, grâce aux simulations numériques, d'étudier de manière satisfaisante le comportement non linéaire des composantes constitutives d'assemblages. C'est pour cette raison qu'une loi de matériau élastique-parfaitement plastique est proposée (Figure 4-12):

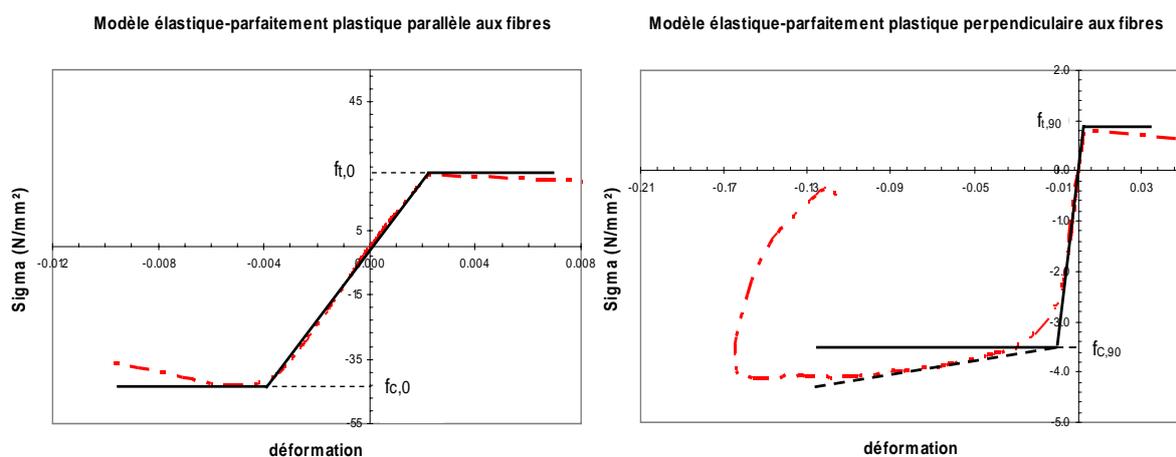


Figure 4-12 Modèle élastique-parfaitement plastique de comportement du bois.

- En traction (parallèle et perpendiculaire aux fibres), le bois atteint fragilement la résistance ultime ( $f_{ut,0}$  ou  $f_{ut,90}$ ) dans le domaine élastique. Cette dernière peut être

introduite, dans le modèle, en tant que limite élastique ( $f_{t,0}$  ou  $f_{t,90}$ ) car le bois, au sein d'un assemblage, est soumis à l'effet d'"embedding" et travaille donc principalement en compression ; la limite de résistance en traction n'est donc pas atteinte dans les cas traités.

- En compression parallèle aux fibres, une description élastique-parfaitement plastique, avec la limite élastique  $f_{c,0}$  égale à  $f_{uc,0}$ , est assez proche du comportement réel dans le domaine de déformation étudié.
- En compression perpendiculaire aux fibres, le bois a un comportement bilinéaire; la limite élastique  $f_{c,90}$  est définie à partir du modèle bilinéaire approprié comme indiqué à la Figure 4-12.

Au Tableau 4-4, sont reportées les valeurs des caractéristiques mécaniques mesurées des éprouvettes selon les deux directions, parallèle et perpendiculaire aux fibres, telles qu'elles résultent d'une idéalisation "élastique-parfaitement plastique".

	masse volumique KG/m <sup>3</sup>	E0 N/mm <sup>2</sup>	fe,0 N/mm <sup>2</sup>		masse volumique KG/m <sup>3</sup>	E90 N/mm <sup>2</sup>	fe,90 N/mm <sup>2</sup>
<b>GLT0</b>	488.520	11660.214	22.122	<b>GLT90</b>	411.940	306.498	0.778
	462.820	11415.657	20.149		415.350	323.183	0.693
	455.220	10030.213	16.351		413.640	303.854	0.557
<b>LTO</b>	398.870	9373.259	19.282	<b>LT90</b>	382.440	138.424	1.546
	322.720	5424.951	23.724		392.860	154.494	1.583
					385.660	154.558	1.309
<b>GLC0</b>	513.720	14402.610	48.599	<b>GLC90</b>	450.210	341.302	3.500
	504.570	11185.600	40.124		462.630	372.450	3.650
	500.910	12618.577	43.170		458.630	332.077	3.500
			461.430		226.066	3.200	
<b>LC0</b>	434.930	6253.021	30.990	<b>LC90</b>	364.580	83.517	1.820
	541.380	15166.074	42.868		372.520	90.753	1.700
	533.150	15778.429	40.242		392.86	142.111	2.200
	416.460	6689.952	32.429				

(a) parallèlement aux fibres.

(b) perpendiculairement aux fibres.

Tableau 4-4 Caractéristiques mécaniques mesurée des éprouvettes d'après le modèle élastique-parfaitement plastique:  $f_{e,0}$  est la limite élastique du bois en traction ou en compression parallèle aux fibres ( $f_{t,0}$  ou  $f_{c,0}$ ) et  $f_{e,90}$ , la limite élastique du bois dans en traction ou en compression perpendiculaire aux fibres ( $f_{t,90}$  ou  $f_{c,90}$ ).

Comme annoncé ci-avant, les propriétés mécaniques mesurées peuvent être mises en relation avec la masse volumique du bois (Tableau 4-4) via des études de type statistique. Nous avons mené ces études; elles ont conduit aux résultats suivants:

- **Relation linéaire entre le module élastique parallèle aux fibres  $E_0$  et la masse volumique  $\rho$  (Figure 4-13):** 80.15% ( $R^2 = 0.8015$ ) des valeurs mesurées  $E_0$  varient linéairement avec  $\rho$ , d'après la formule (4.4).

$$E_0 = 48.624\rho - 11749 \text{ (N/mm}^2\text{)}, (\rho = 320\div 540 \text{ KG/m}^3\text{)} \quad (4.4)$$

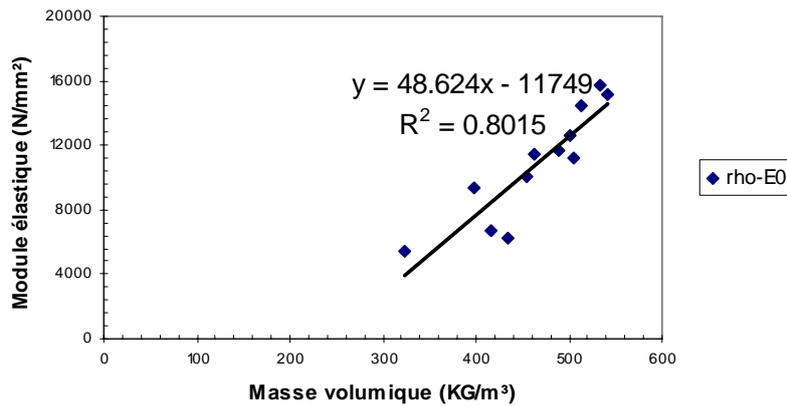


Figure 4-13 Relation linéaire entre  $E_0$  et  $\rho$  du bois:  $R^2$  est le coefficient de corrélation.

- **Relation linéaire entre le module élastique perpendiculaire aux fibres  $E_{90}$  et la masse volumique  $\rho$  (Figure 4-14):** 69.9% ( $R^2 = 0.699$ ) des valeurs mesurées  $E_{90}$  varient linéairement avec  $\rho$ , d'après la formule (4.5).

$$E_{90} = 2.4896\rho - 798.98 \text{ (N/mm}^2\text{)}, (\rho = 360\div 460 \text{ KG/m}^3) \quad (4.5)$$

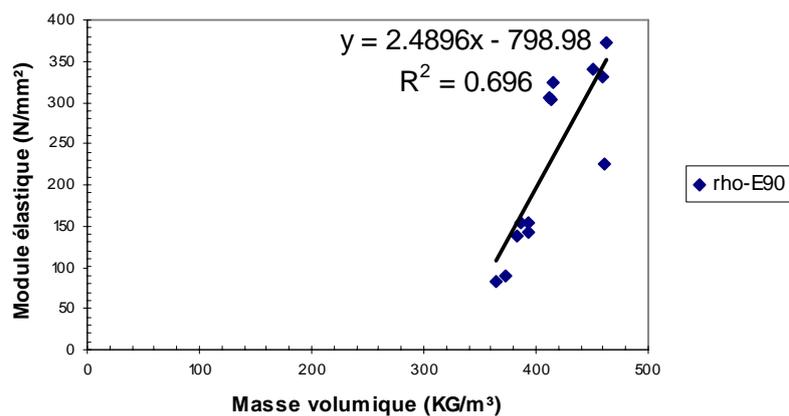


Figure 4-14 Relation linéaire entre  $E_{90}$  et  $\rho$  du bois.

- **Relation linéaire entre les limites élastiques en compression  $f_{c,0}$  et en traction  $f_{t,0}$  parallèle aux fibres et la masse volumique (Figure 4-15):** 66.51% ( $R^2 = 0.665$ ) des valeurs mesurées  $f_{c,0}$  varient linéairement avec  $\rho$ , d'après la formule (4.6). Dans ce cas, toutefois, il n'y a presque pas de lien entre  $f_{t,0}$  mesurée et  $\rho$ .

$$f_{c,0} = 0.1054\rho - 12.084 \text{ (N/mm}^2\text{)}, (\rho = 320\div 500 \text{ KG/m}^3) \quad (4.6)$$

$$f_{t,0,moy} = 20.326 \text{ N/mm}^2, (\rho = 322\div 488 \text{ KG/m}^3) \quad (4.7)$$

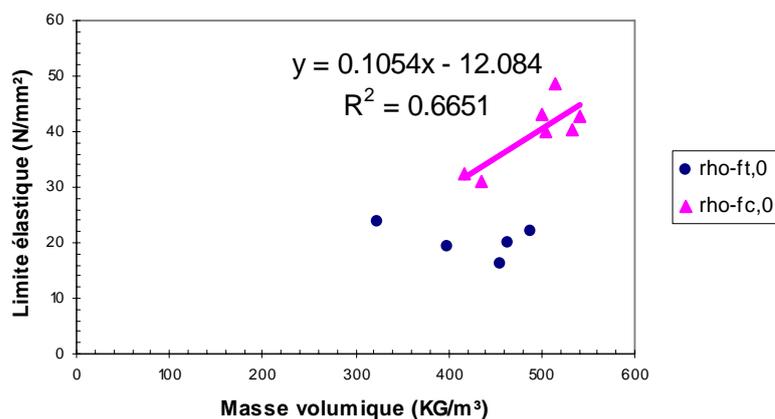


Figure 4-15 Relations linéaires entre  $f_{t,0}$ ,  $f_{c,0}$  et  $\rho$  du bois.

- **Relation linéaire entre les limites élastiques en compression  $f_{c,90}$  et en traction  $f_{t,90}$  perpendiculaire aux fibres et la masse volumique (Figure 4-16): 95.7% ( $R^2 = 0.957$ )** des valeurs mesurées  $f_{c,90}$  varient linéairement avec  $\rho$ , d'après la formule (4.8). A nouveau, il n'y presque pas de lien entre  $f_{t,90}$  et  $\rho$ .

$$f_{c,90} = 0.0188\rho - 5.1511 \text{ (N/mm}^2\text{)}, \text{ (}\rho = 360\div 460 \text{ KG/m}^3\text{)} \quad (4.8)$$

$$f_{t,90,moy} = 1.078 \text{ N/mm}^2, \text{ (}\rho = 382\div 415 \text{ KG/m}^3\text{)} \quad (4.9)$$

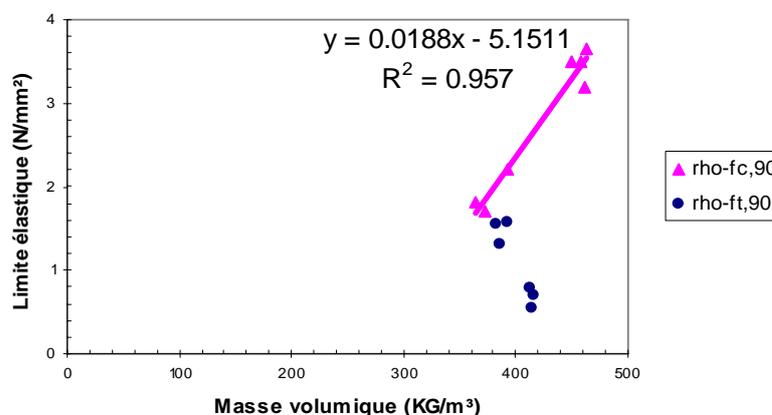


Figure 4-16 Relations linéaires entre  $f_{t,90}$ ,  $f_{c,90}$  et  $\rho$  du bois.

Au travers des travaux statistiques ci-dessus, on constate que:

- Les propriétés mécaniques ( $E_0$ ,  $E_{90}$ ,  $f_{c,0}$ ,  $f_{c,90}$ ) du bois étudié peuvent être exprimées comme des fonctions linéaires de la masse volumique par les formules proposées aux (4.4), (4.5), (4.6) et (4.8); ces dernières seront utilisées pour déduire les propriétés mécaniques d'autres éprouvettes, dans le cadre de la recherche.
- $f_{t,0}$  et  $f_{t,90}$  mesurées ne montrent pas nettement de lien avec la masse volumique; on prendra alors les valeurs moyennes  $f_{t,0,moy}$  et  $f_{t,90,moy}$  proposées aux (4.7) et (4.9).

## 4.5 Résumé

Le caractère naturel du bois, en ce compris sa nature poreuse et fibreuse, en fait un matériau fortement hétérogène et anisotrope, en élasticité comme en plasticité. Une technique qui permet d'améliorer de manière stable la qualité du bois et de le rendre plus homogène et plus résistant est celle, usuelle dans la construction en bois, du bois lamellé collé (BLC).

Des tests de matériau sur le BLC ont été menés à l'ULG dans le cadre d'une recherche, effectuée en collaboration avec le CTIB, afin de mettre à jour les caractéristiques mécaniques du matériau bois étudié. Ces essais étaient impératifs en vue de l'étude ultérieure du comportement des assemblages en bois avec broches.

Sur base de ces essais, quelques remarques générales sur le comportement du bois ont pu être formulées. Le bois possède un comportement beaucoup plus rigide et beaucoup plus résistant parallèlement aux fibres que perpendiculairement à celles-ci. Que ce soit parallèlement ou perpendiculairement aux fibres, le bois a un comportement élastique et fragile en traction, mais élasto-plastique et assez ductile en compression.

A l'aide d'approches statistiques, des formules qui expriment la relation linéaire entre les caractéristiques mécaniques du bois et sa masse volumique ont ensuite été établies. Elles seront utilisées pour la prédiction des caractéristiques mécaniques des éprouvettes dans l'étude locale des composantes et l'étude globale des assemblages.



# Chapitre 5 Assemblages en bois

## 5.1 Introduction

Comme pour les autres matériaux, le dimensionnement des assemblages prend, dans la construction en bois, une place importante car il influence considérablement les dimensions des éléments assemblés, le coût global (les assemblages en bois prennent une part plus importante que dans les autres matériaux) et la durabilité de la structure. En général, plus un assemblage est simple et moins il y a d'assembleurs, meilleure est la solution [FRA-2002].

Comme ce que nous avons mentionné précédemment, deux approches sont à présent disponibles pour la modélisation du comportement des assemblages:

- l'approche traditionnelle où l'on suppose deux comportements extrêmes possibles (rigide ou rotule) des assemblages en vue de l'analyse de la structure sans beaucoup de calculs complexes;
- l'approche nouvelle qui permet de prendre en compte le comportement semi-rigide des assemblages; elle permet une représentation plus réaliste dans la représentation des assemblages lors de l'analyse structurale.

Au cours de ces dernières années, les outils informatiques de plus en plus performants ont énormément facilité les travaux d'analyse. La modélisation d'un assemblage semi-rigide ne pose aujourd'hui plus de difficulté. Dans la construction en bois, moins d'efforts ont été consentis que pour les constructions en acier et en mixtes à l'étude du comportement semi-rigide des assemblages: [COST-C1].... Ils ont par ailleurs été davantage consacrés à la détermination de la résistance des assemblages qu'à celle de la rigidité. Pourtant, le caractère semi-rigide du comportement des assemblages influence de façon non négligeable la réponse de la structure. Ceci nécessite une évaluation de la rigidité des assemblages avant de réaliser, selon la nouvelle procédure mentionnée au §2.2, l'analyse structurale (élastique ou élasto-plastique).

Ce chapitre fournit une vue générale de différents types d'assemblages et ensuite introduit le caractère semi-rigide du comportement des assemblages mécaniques, dont les assemblages mécaniques à broches qui font l'objet de cette thèse.

## 5.2 Divers types d'assemblages en bois

Deux grandes familles d'assemblages sont identifiées: les assemblages traditionnels et les assemblages mécaniques.

### 5.2.1 Assemblages traditionnels

On y retrouve dans ce groupe les moyens d'assemblage mis au point au cours des siècles par les charpentiers; ils font appel, essentiellement, à une mise à forme des extrémités des éléments à assembler. Quelques types d'assemblage représentatifs sont montrés ci-après.

Les embrèvements (Figure 5-1) restent encore aujourd'hui un moyen d'assemblage économique pour transmettre un effort de compression, sans nécessiter d'autres pièces métalliques que celles qui assurent le positionnement, un boulon par exemple. Pour que la transmission des efforts se fasse convenablement et sans grandes déformations, il importe que l'usinage des pièces soit très précis, ce qui ne pose plus de problème avec les machines actuelles, lorsque ces assemblages sont préparés en atelier.

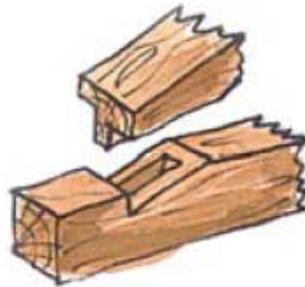


Figure 5-1 Assemblages à embrèvement [INT-c].

Un assemblage à tenon (Figure 5-2) peut servir à maintenir en place deux pièces dans leurs positions respectives. L'usinage de ce type d'assemblage est moins précis. Les deux pièces sont donc en contact soit au bout du tenon soit au pied du tenon. La surface de contact disponible pour la transmission de l'effort de compression est donc réduite. Cet assemblage ne convient pas pour les éléments fortement sollicités.

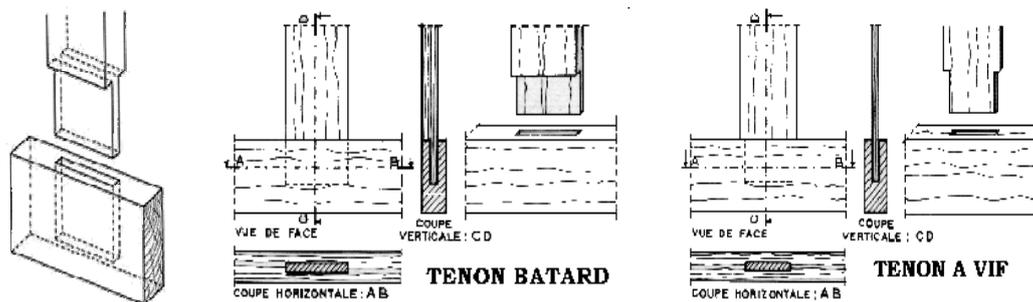


Figure 5-2 Assemblages par tenon et mortaise [INT-d].

Les assemblages à mi-bois et par enfourchement (Figure 5-3) font aussi partie des assemblages traditionnels. Comme tous les autres assemblages traditionnels, l'entaille des extrémités réduit la section brute, donc éventuellement la portance des éléments structuraux.

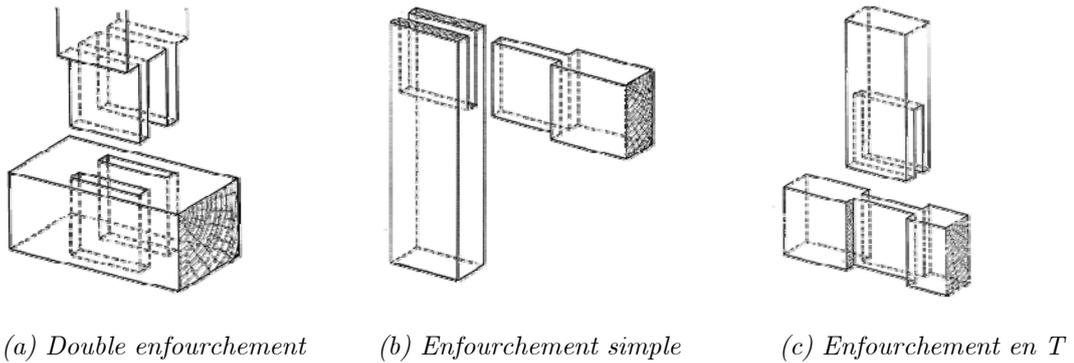


Figure 5-3 Assemblages à mi-bois et par enfourchement [INT-e].

## 5.2.2 Assemblages mécaniques.

Dans un assemblage mécanique, les différentes pièces en bois à assembler sont traversées par des connecteurs métalliques: pointes, vis, broches, boulons, agrafes... Le transfert des efforts fait appel à la portance locale et la résistance en cisaillement du bois, ainsi qu'à la résistance en flexion des tiges.

La réalisation d'un assemblage mécanique demande le respect de certaines distances entre les connecteurs aussi qu'entre les connecteurs et les bords des pièces, et ce, afin d'éviter un fendage excessif. Les exigences relatives à la configuration des assemblages et la détermination de leur résistance sont disponibles dans l'EC5. Quelques types d'assemblages mécaniques représentatifs de la construction en bois sont montrés ci-après.

### 5.2.2.1 Assemblages par pointes

Les pointes (les clous) constituent les connecteurs mécaniques les plus anciens (Figure 5-4). Les pointes lisses sont souvent les plus utilisées. Les pointes torsadées sont conseillées quand on veut améliorer leur résistance à l'arrachement. Les pointes conviennent pour les assemblages en cisaillement simple qui assemblent des pièces latérales en bois, en acier ou des panneaux à base de bois.

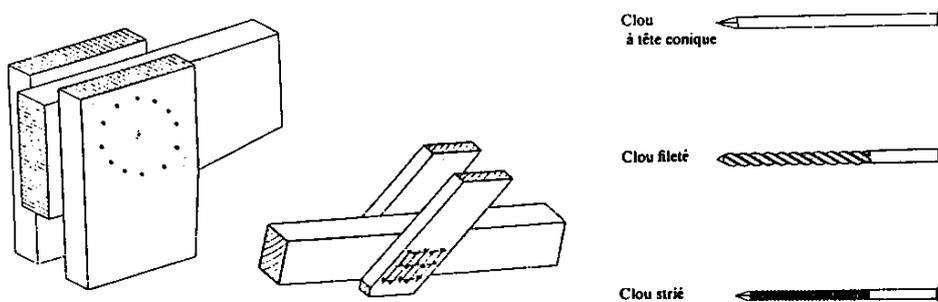
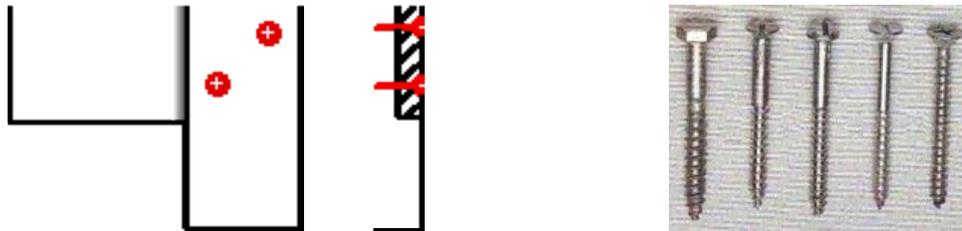


Figure 5-4 Exemples des assemblages à pointes [BOU-1993].

### 5.2.2.2 Assemblages vissés

Les vis à bois sont utilisées pour les assemblages acier-bois ou panneau-bois mais on peut aussi les utiliser pour des assemblages bois-bois (Figure 5-5). Les vis à bois travaillent principalement en cisaillement simple mais elles peuvent aussi transmettre des efforts d'arrachement.



(a) La configuration d'un assemblage à vis

(b) les vis à bois

Figure 5-5 Exemple d'un assemblage à mi-bois et à vis [INT-f].

### 5.2.2.3 Assemblages par connecteurs métalliques à dents

Les connecteurs métalliques à dents sont fabriqués à partir d'une tôle galvanisée emboutie perpendiculairement de manière à ce que les parties défoncées forment des dents. Ils sont utilisés pour assembler deux ou plusieurs éléments structuraux dans le même plan (Figure 5-6). Leur domaine d'application privilégié est celui des fermes planes. Comme les connecteurs métalliques sont souvent exposés à l'extérieur, la résistance au feu de ce type d'assemblage n'est pas satisfaisante. Mais cela n'est pas vraiment important car la résistance au feu des éléments assemblés, avec les épaisseurs modérées, n'est pas très élevée non plus.

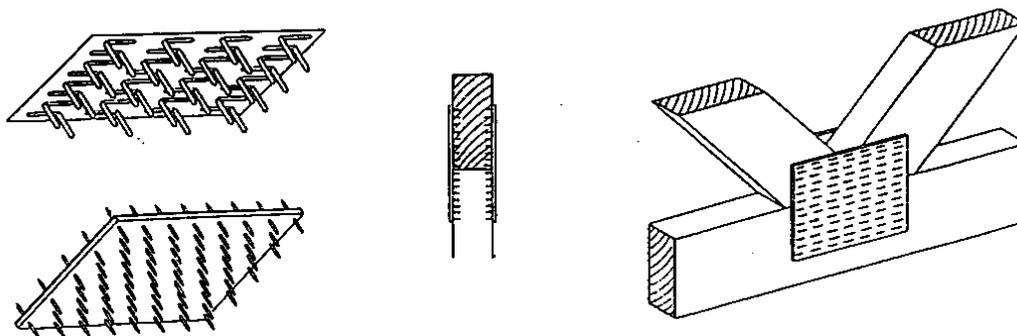


Figure 5-6 Exemple d'un assemblage par connecteurs métalliques à dents [BOU-1993].

### 5.2.2.4 Assemblages par anneaux

Les anneaux métalliques circulaires associés à des boulons sont utilisés pour des assemblages sollicités en cisaillement (Figure 5-7). Il y a des anneaux simples, de forme torique, pour les assemblages "bois-bois" et des anneaux à fond plat, employés aussi bien pour les assemblages bois-bois que pour les assemblages "bois-métal". Les anneaux sont normalement déjà installés dans les pièces avant le montage de la structure.

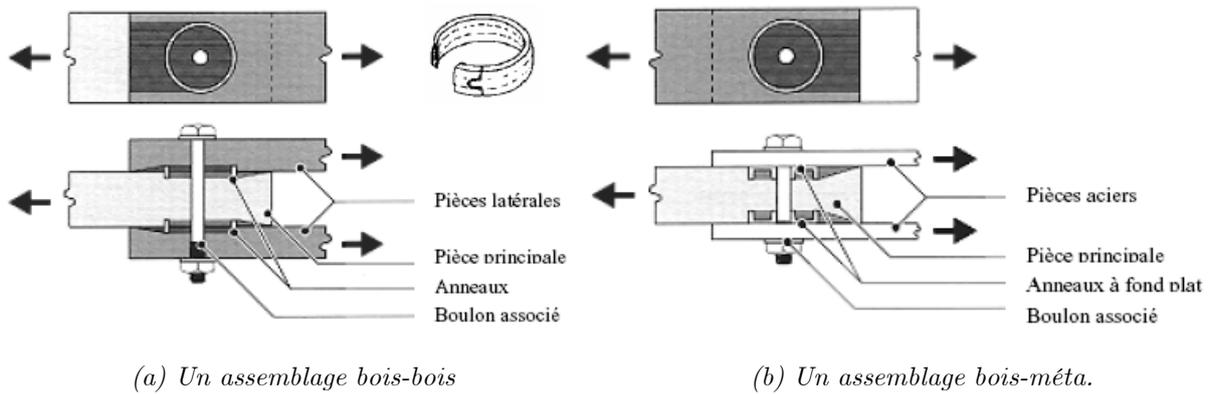


Figure 5-7 Exemple d'un assemblage par anneaux [INT-g].

### 5.2.2.5 Assemblages par boulons et broches

Les broches sont des tiges cylindriques lisses d'un diamètre minimum de 6 mm, généralement en acier. Pour les placer dans les éléments en bois, on fore des trous d'un diamètre inférieur ou égal à celui de la broche. Dans une pièce métallique, le trou peut être foré 1mm plus large que le diamètre de la broche et cela doit être pris en compte pour le glissement au niveau de l'assemblage.

Les boulons sont aussi de type cylindrique, mais ils ont en plus une tête et un écrou dont le serrage maintient les éléments assemblés en contact (avec serrage après que le bois ait atteint un équilibre en terme d'humidité). Il y a habituellement un jeu inférieur à 1 mm entre le boulon et le trou préformé. Si le jeu est nul, le boulon se comporte comme une broche.

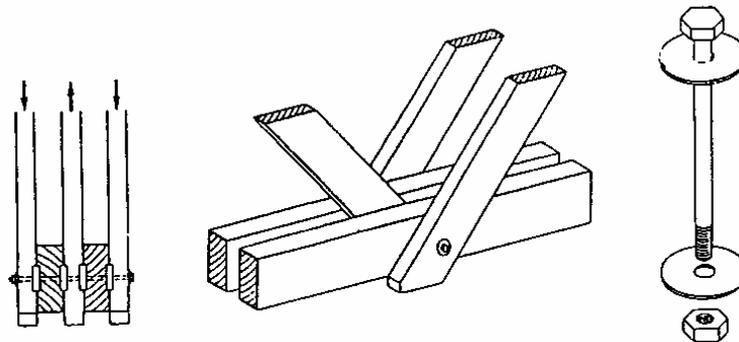


Figure 5-8 Exemple d'un assemblage rotulé à boulon [BOU-1993].

Les assemblages par boulons et par broches sont utilisés dans la construction bois pour transmettre les grands efforts. C'est un type d'assemblage économique et facile à fabriquer. Dans un assemblage à broches, quelques unes de ces broches sont remplacées par des boulons pour bien fixer les membrures assemblées. La présence des jeux dans les assemblages par boulons est déconseillée pour les structures où les grandes déformations diminuent les propriétés en service.

### 5.3 Comportement semi-rigide des assemblages mécaniques

L'analyse traditionnelle d'une structure en bois présuppose, par défaut, les assemblages sont soit rigides, soit rotulés; alors leur comportement réel est manifestement intermédiaire, c-à-d semi-rigide. La prise en compte du comportement semi-rigide des assemblages permet d'obtenir une réponse réaliste de la structure, en terme de distribution des efforts entre les éléments structuraux. Le comportement d'un assemblage à plusieurs connecteurs est, dans la méthode des composantes, estimé sur base de la connaissance du comportement d'un assemblage similaire à un connecteur unique. Etudions donc le comportement "connecteur-bois", par plan de cisaillement, pour plusieurs types de connecteurs (Figure 5-9).

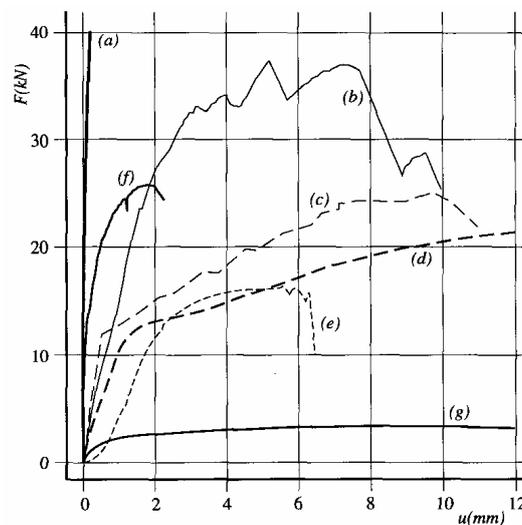


Figure 5-9 Comportement "charge-enforcement" des assemblages à un seul connecteur et par un plan de cisaillement en traction parallèle aux fibres: (a) Assemblage collés ( $12.5 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$ ), (b) Assemblage par anneaux (100 mm), (c) Assemblage à deux côtés par crampons (62 mm) (Hirashima, 1990), (d) Assemblage par broches (14 mm), (e) Assemblage par boulons (14 mm), (f) Assemblage par connecteurs métalliques à dents ( $10^4 \text{ mm}^2$ ), (g) Assemblage par pointes (4,4 mm) [STE-1995].

Au contraire de l'assemblage collé rigide, les assemblages mécaniques montrent des déformations locales assez importantes qui doivent être prises en compte dans l'analyse de la structure. Le comportement d'un assemblage dépend effectivement de l'interaction "connecteur-bois" et du mode de ruine dans les connecteurs ou dans le bois. Les connecteurs métalliques sont souvent fabriqués à partir de métal assez ductile, tandis que le bois est un matériau fragile. Par conséquent, l'assemblage démontrera un comportement très ductile dans le cas où les connecteurs pourront former des rotules plastiques au cours de chargement; dans le cas contraire, un comportement fragile lié à l'écrasement du bois avant la plastification des connecteurs sera enregistré. La Figure 5-9 permet de tirer les conclusions suivantes:

- La plaque métallique à dents apporte peu de déformation plastique. Cela entraîne, par conséquent, un mode de ruine fragile pour l'assemblage, courbe (f).

- Le connecteur "anneau" reste assez rigide en raison de la nature de son matériau et de sa forme torique. L'assemblage présente, par conséquent, un mode de ruine fragile associé au cisaillement du bois, courbe (b).
- Des glissements initiaux considérables entre les pièces assemblées sont souvent observés dans les assemblages à boulons car il y a habituellement un jeu entre le boulon et le trou pré-perforé, courbe (e).
- Parmi les connecteurs mécaniques, les pointes possèdent les diamètres les plus faibles; elles procurent donc peu de rigidité et de résistance aux assemblages. Mais le comportement de ce type d'assemblage est très ductile, courbe (g).
- Un comportement presque bilinéaire est relevé pour la plupart des assemblages mécaniques.

Le caractère semi-rigide du comportement des assemblages mécaniques est de toute manière bien visible à la Figure 5-9. La rigidité, la résistance et la ductilité d'un assemblage dépendent évidemment des éléments constitutifs, donc des connecteurs et du bois. Vu que le bois est un matériau anisotrope, la direction de transfert des efforts par rapport aux fibres influence considérablement le comportement de l'assemblage. L'analyse de tous les éléments influençant le comportement de l'assemblage sera abordée en détail au chapitre 8.

## 5.4 Résumé

Comme pour les assemblages en acier et en mixtes, les assemblages mécaniques en bois ont très souvent un comportement semi-rigide. Vu que l'influence de ce dernier sur la réponse de la structure est importante, la prise en compte de celui-ci dans l'analyse structurale (élastique ou élasto-plastique) est donc indispensable. Cela demande, en premier lieu, une estimation de la rigidité des assemblages présents dans la structure. Dans le cadre de cette thèse, nous n'étudierons que les assemblages mécaniques à broches.



## **Partie 4 Objectifs et stratégie de développement**

---

## **Partie 4 Objectifs et stratégie de développement**

### **Chapitre 6 Objectifs de la thèse**

6.1 Introduction .....	57
6.2 Programme d'étude $K_{ser}$ du comportement semi-rigide des assemblages à broches .....	57
6.3 Objectifs de la thèse .....	58
6.4 Contenu et limitation .....	58
6.5 Perspectives d'application .....	59

### **Chapitre 7 Stratégie de développement**

7.1 Etape de la recherche.....	61
7.2 Méthode des composantes dans les assemblages mécaniques en bois .....	62
7.3 Etapes de l'étude .....	62
7.3.1 Etude locale des composantes .....	63
7.3.1.1 Stratégie .....	63
7.3.1.2 Analyse de composantes .....	63
7.3.1.2.1 Description du comportement "broche-bois" .....	63
7.3.1.2.1.1 Description des essais .....	63
7.3.1.2.1.2 Comportement élastique "broche-bois" parallèlement aux fibres .....	64
7.3.1.2.1.3 Comportement élastique "broche-bois" perpendiculairement aux fibres .....	66
7.3.1.2.2 Identification des composantes .....	68
7.3.1.2.3 Caractérisation de la composante d'"embedding" .....	70
7.3.1.3 Conclusions.....	71
7.3.2 Etude globale des assemblages .....	72
7.3.2.1 Stratégie .....	72
7.3.2.2 Analyse de l'étude globale des assemblages.....	73
7.3.2.2.1 Description du comportement d'un assemblage .....	73
7.3.2.2.2 Assemblage en cisaillement .....	74
7.3.2.2.3 Assemblage en flexion .....	75
7.3.2.2.4 Assemblage en flexion et en cisaillement.....	76
7.3.2.3 Conclusions.....	76

## Chapitre 6 Objectifs de la thèse

### 6.1 Introduction

Les chapitres précédents nous ont donné une image générale du comportement semi-rigide des assemblages en bois. Nous avons acquis une connaissance assez fine de la formation du bois à l'échelle microscopique, ce qui nous a fourni certaines justifications quant au comportement mécanique, à l'échelle macroscopique, des éléments structuraux.

Le comportement semi-rigide des assemblages mécaniques commence à être reconnu et étudié dans les structures en bois, notamment pour des raisons économiques et sécuritaires de la construction. La présente recherche est aussi associée à ce thème. Dans les pages suivantes, nous définissons les objectifs de la thèse.

### 6.2 Programme d'étude $K_{ser}$ du comportement semi-rigide des assemblages à broches

Ce projet, bien qu'étant la suite d'un programme de recherche préalable mené au CTIB (1999-2001), se basait sur une approche différente: alors que ce programme "Cadlam" fondait le calcul du dimensionnement de l'assemblage sur sa résistance aux états limites ultimes, le projet  $K_{ser}$  a pour but de prendre en compte la déformabilité des assemblages dans l'étude de la structure; l'effet se manifeste en service, bien avant la rupture, lorsque le matériau est encore en régime élastique.

Les objectifs du projet sont les suivantes:

1. **La modélisation de la rigidité des assemblages.** Cette phase concerne la modélisation de la rigidité des assemblages, encore imparfaitement ciblée par les normes actuellement en vigueur qui négligent, à tort, le caractère anisotrope du bois. Cette orientation des travaux a été confirmée par les résultats obtenus à partir des essais de validation effectués au cours du programme de recherche au CTIB. Ceux-ci ont clairement mis en évidence l'importance de la semi-rigidité des assemblages qui, si elle n'est pas prise en compte, ne permet pas un dimensionnement suffisamment correct des éléments structuraux. Les étapes successives de l'étude se résument comme suit:
  - o l'identification et la quantification des paramètres qui influencent la rigidité de l'assemblage (frottement, angle de sollicitation des fibres, diamètre et élanement de l'assembleur, hygrométrie, jeu fonctionnel entre le bois et l'assembleur...);

- la conduite d'une campagne d'essais pour établir la matrice de rigidité de l'élément en prenant en compte les effets d'anisotropie du bois;
  - la modélisation de l'action combinée de plusieurs assembleurs et son influence sur la déformation totale de la structure.
2. L'intégration du travail du bois (retrait/gonflement) pour définir un glissement d'assemblage différé.
  3. L'amélioration de la quantification des efforts que l'assemblage doit reprendre par un calcul ajusté des diagrammes M, N, T rendu possible par l'introduction d'un ressort de rigidité entre les membrures.
  4. Le développement d'un outil de calcul informatique indépendant de tout logiciel existant et l'intégration de modules de calcul de la semi-rigidité des assemblages dans le logiciel d'aide à la conception et au dessin (Cadlam) destiné au secteur de la construction.

### 6.3 Objectifs de la thèse

La présente thèse concerne uniquement le premier point du projet  $K_{ser}$ , à savoir la modélisation de la rigidité des assemblages (Figure 6-1):

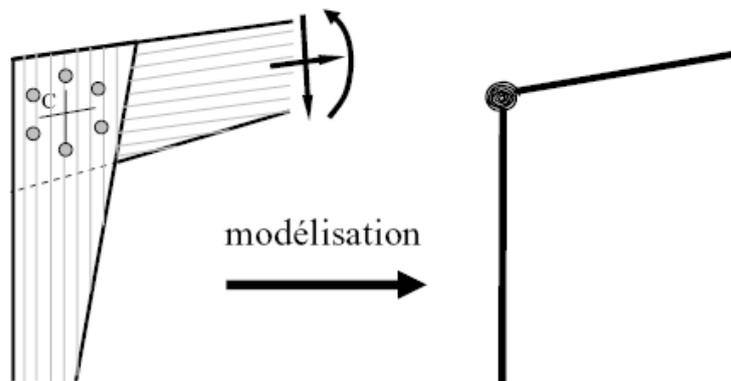


Figure 6-1 Comportement semi rigide des assemblages mécaniques en bois.

Les travaux poursuivis portent sur le développement et la validation de modèles mathématiques de prédiction de la rigidité des assemblages par broches. Au niveau des composantes, le développement de modèles est basé sur l'analyse d'un assembleur de type tige qui interagit avec la composante "bois". Au niveau des assemblages, des modèles sont à développer pour la détermination de la rigidité des assemblages tout entiers, à un ou plusieurs assembleurs.

### 6.4 Contenu et limitation

Pour atteindre l'objectif visé, trois axes de travaux ont été développés à chaque niveau d'études (**étude locale des composantes** et **étude globale des assemblages**):

- **Axe analytique:** Au niveau de l'étude "locale" des composantes, des modèles mathématiques sont recherchés afin de caractériser le comportement élastique des composantes. Au niveau de l'étude "globale" des assemblages, les modèles analytiques recherchés portent sur la détermination de la rigidité des assemblages (en cisaillement et/ou en flexion) sur base de la connaissance des composantes préalablement identifiées.
- **Axe numérique:** Une fois les modèles numériques validés par comparaison avec des essais expérimentaux, des études paramétriques relatives au comportement des composantes (ou des assemblages) peuvent être menées à bien. A l'issue de ces études paramétriques, un modèle analytique peut alors être proposé et validé par les résultats numériques.
- **Axe expérimental:** Sur le plan expérimental, des essais de caractérisation du comportement du matériau bois, des composantes et des assemblages sont réalisés. Ces essais jouent un rôle capital dans la validation des modèles numériques et analytiques.

La thèse concerne plus particulièrement les assemblages mécaniques par broches (voir §5.2.2.5) dont le comportement élastique  $K_j$  doit être déterminé sur base des caractéristiques mécaniques du bois et de la broche. Les autres types d'assemblages mécaniques ont des comportements assez similaires avec celui des assemblages par broches. La compréhension du comportement des assemblages par broches devrait permettre, à l'avenir, de dériver le comportement d'autres types d'assemblages mécaniques.

Le bois est très sensible à l'environnement: des facteurs d'origine naturelle (surtout l'humidité) influencent considérablement la qualité mécanique du bois, et donc également sur le comportement des assemblages. Dans le cadre de cette thèse, le bois étudié a atteint son "humidité d'équilibre" à l'air ambiant, tel que requis par l'EC5 (à une température de 20°C et une humidité de l'air de 65%, ce qui correspond à une humidité du bois de 12%). Les phénomènes de retrait et gonflement de matériau ne seront pas discutés dans cette thèse.

## 6.5 Perspectives d'application

Un modèle analytique pour la détermination du comportement élastique des assemblages par broches peut également être appliqué à d'autres types d'assemblages mécaniques, moyennant de petites modifications dans le modèle. C'est là l'un des intérêts de la méthode des composantes.

La plupart des recherches sur les assemblages en bois sont relatives à la détermination de la résistance. L'EC5 permet la détermination de la dernière au travers de l'approche "rigide-plastique" de Johansen appliquée à différents mécanismes de ruine de l'assemblage. En y ajoutant une étude du comportement élastique, telle que celle effectuée dans cette thèse, une loi de comportement presque complète devrait pouvoir être définie pour les assemblages mé-

caniques. Elle pourrait ensuite être introduite dans la procédure nouvelle (Figure 2-6) d'analyse et de dimensionnement de la structure aux ELU et ELS, comme dans les structures en acier et en mixtes.

L'approche semi-rigide de la modélisation des assemblages contient, comme précisé précédemment, l'approche traditionnelle. En pratique, il convient de regarder quand l'approche nouvelle doit être utilisée et/ou quand une utilisation de l'approche traditionnelle est suffisante. Ce choix s'effectue sur base des résultats de classification des assemblages en bois, comme pour les assemblages en acier et en mixtes ([EN1993] et [EN1994]). Trois types de classification peuvent être envisagés:

- classification en rigidité;
- classification en résistance;
- classification en ductilité.

Le développement de critères de classification similaires à ceux proposés pour les assemblages en acier et en mixtes est une tâche à laquelle de futurs travaux de recherche devront être consacrés afin de pouvoir réellement offrir dans l'avenir, aux praticiens, le choix entre approche habituelle et approche nouvelle.

# Chapitre 7 Stratégie de développement

## 7.1 Etape de la recherche

L'organigramme de la Figure 7-1 présente, de manière synthétique, les étapes de la recherche telles qu'elles ont été élaborées. Il précise également la stratégie suivie pour atteindre les objectifs fixés pour cette thèse.

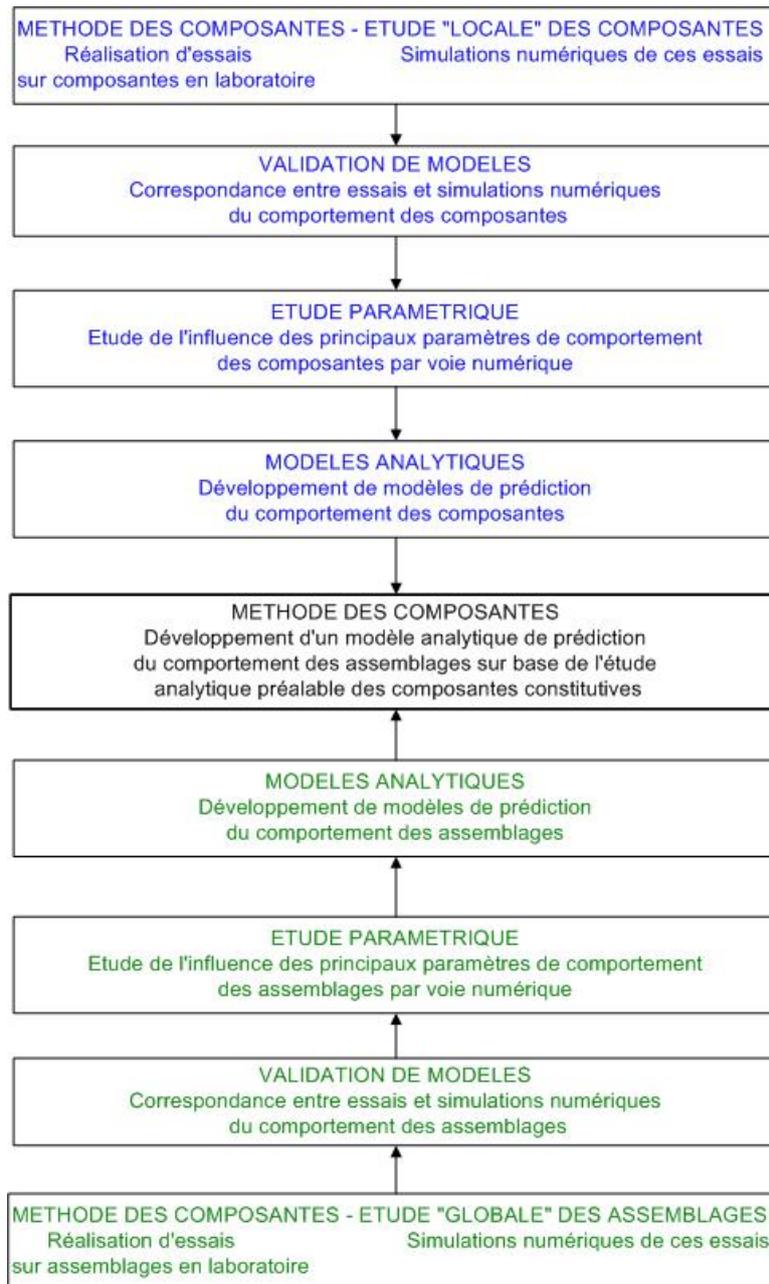


Figure 7-1 Organigramme de la recherche.

## 7.2 Méthode des composantes dans les assemblages mécaniques en bois

La méthode des composantes définit tout assemblage comme un ensemble de composantes individuelles. Chacune des composantes constitutives possède un comportement (rigidité, résistance et capacité de déformation en traction, compression ou cisaillement) qui lui est propre et qui peut être défini indépendamment de la configuration d'assemblage étudiée et du type de chargement considéré (moment de flexion et/ou effort axial, effort de cisaillement, etc.). Lorsque l'assemblage est soumis à son chargement, les efforts appliqués à l'assemblage tout entier se distribuent entre les différentes composantes et ce, en fonction de leurs rigidités et/ou résistances relatives.

L'application pratique de la méthode des composantes au calcul des assemblages en bois nécessite la connaissance:

- du comportement des composantes que les assemblages étudiés comportent;
- des mécanismes de distribution des efforts intérieurs entre les différentes composantes pour chaque niveau de sollicitation des assemblages envisagés.

Ces deux parties importantes du travail sont mises en évidence dans l'organigramme de la Figure 7-1 grâce à l'utilisation de couleurs différentes:

- couleur bleue pour **l'étude des composantes**;
- couleur verte pour **l'étude des assemblages**: aspects de distribution des efforts intérieurs.

Pour procéder à l'étude des "assemblages", on considère que le comportement des composantes est connu.

Lorsque des modèles analytiques pour la détermination du comportement des composantes et des procédures analytiques de distribution des efforts intérieurs au sein des assemblages sont disponibles, le but final de la recherche est alors atteint (cases grisées au centre de la Figure 7-1) dans la mesure où une prédiction purement analytique des propriétés des assemblages est mise à la disposition des utilisateurs. Dans le cadre de la thèse, on développe un outil analytique prédisant le comportement élastique des assemblages.

## 7.3 Etapes de l'étude

Conformément à ce qui vient d'être dit, les étapes de notre travail sont donc les suivantes:

- étude "locale" des composantes;
- étude "globale" des assemblages.

## 7.3.1 Etude locale des composantes

### 7.3.1.1 Stratégie

La réalisation d'essais de composantes est indispensable pour appréhender le comportement du binôme "broche-bois". De plus, les résultats obtenus via les essais de composantes jouent un rôle fondamental dans la validation des modèles numériques et analytiques proposés.

En parallèle avec les essais de composantes, des simulations numériques du comportement de ces essais sont réalisées à l'aide de la méthode des éléments finis. Elles contribuent d'une part à orienter la façon de mener les essais et d'autre part à identifier les composantes. Les résultats de ces simulations numériques sont ensuite comparés aux ceux expérimentaux. Le but recherché est de valider l'outil numérique afin qu'il puisse être utilisé dans le cadre d'études paramétriques visant à comprendre le comportement des composantes en cours de chargement, et ce, jusqu'à la ruine.

Une compréhension fine de la réponse des composantes constitue une étape indispensable lors de la mise au point de modèles analytiques à fondement théorique autorisant la prédiction du comportement des composantes et, en particulier dans cette recherche, de leur rigidité élastique.

### 7.3.1.2 Analyse de composantes

Un assemblage est constitué d'un ensemble de connecteurs, dont les broches. Selon la méthode des composantes, le comportement de l'assemblage est le résultat de comportement d'un ensemble de zones dans lesquelles le bois et les broches interagissent. Une étude du comportement de ces zones est donc la base de l'étude de comportement des assemblages.

#### 7.3.1.2.1 Description du comportement "broche-bois"

##### 7.3.1.2.1.1 Description des essais

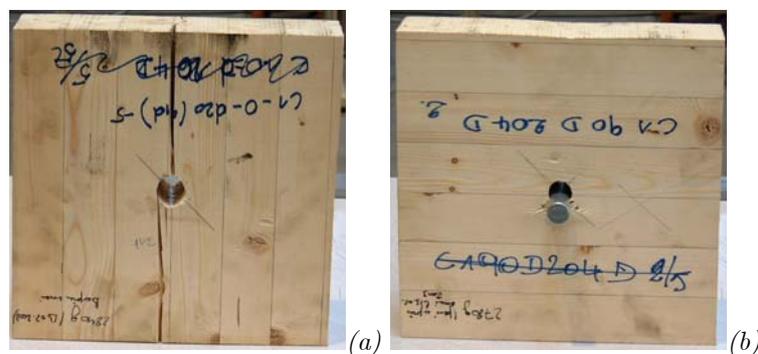


Figure 7-2 Essais de portance locale: (a) compression parallèle aux fibres, (b) compression perpendiculaire aux fibres.

Le comportement "broche-bois" a déjà été étudié par plusieurs auteurs. Dans l'EC5, un procédé [prEN383] est proposé pour la détermination de la portance locale "broche-bois" parallèlement et perpendiculairement aux fibres. Sur base de ces recommandations, des essais sur le comportement "broche-bois" ont été réalisés, dans le cadre de la présente recherche, avec des éprouvettes de forme carrée (Figure 7-2). Le choix de la forme pour les éprouvettes est justifié plus loin, au §8.

L'essai consiste à déplacer une broche d'un diamètre  $D$  (20 mm dans la Figure 7-2) placée dans un trou de même diamètre percé dans une éprouvette en bois de dimensions  $14D \times 14D \times 4D$  (280x280x80 mm dans la Figure 7-2). Un déplacement de la broche d'environ 5 mm est réalisé, avec une vitesse de 1 mm/min recommandée par l'EC5. Des capteurs permettent de mesurer l'enfoncement de la broche en fonction de la force appliquée. Il est recommandé de réaliser plusieurs cycles "déchargement-rechargement" afin d'observer et mesurer le comportement élastique "broche-bois".

#### 7.3.1.2.1.2 Comportement élastique "broche-bois" parallèlement aux fibres

La Figure 7-3 présente la courbe expérimentale "force-enfoncement" d'un essai de portance locale parallèle aux fibres. Après la réalisation des parcours "déchargement-rechargement", l'essai est poursuivi jusqu'à la ruine.

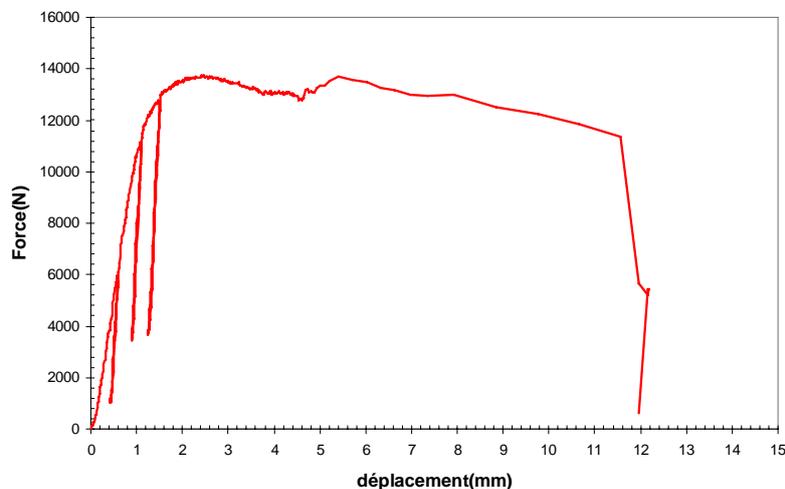


Figure 7-3 Courbe expérimentale "force-enfoncement" d'un essai de portance locale parallèle aux fibres

Lors du premier chargement, la courbe "force-enfoncement" est d'ordinaire perturbée par la mise en place de l'éprouvette et du système de mise en charge, ainsi que par le jeu de contact entre la broche et le bois. Puis, on passe à une autre phase durant laquelle l'interaction "broche-bois" présente un comportement linéaire plus raide, avec une rigidité initiale  $K_0$ . Ensuite, dans la phase "déchargement-rechargement", une rigidité plus importante que la phase précé-

dente et une déformation irréversible sont déjà observées. Après la phase "déchargement-rechargement", la courbe reprend une allure classique jusqu'à la ruine.

Au travers de la description sur la portance locale, nous voyons qu'une déformation irréversible apparaît déjà pendant la phase de comportement linéaire dans laquelle le bois est supposé en régime "élastique". Cette déformation irréversible ne provient donc pas de la plasticité des matériaux. En fait, il s'agit d'un tout autre phénomène: la densification. La rupture des couches de trachéides permet de combler les vides de la microstructure. Deux mécanismes de rupture des trachéides ont été mis en évidence [BOC-1997] (Figure 7-4):

- Les parois des trachéides flambent sous la charge et une instabilité globale se produit dans une couche de trachéides. Ce phénomène est appelé rupture par bande de cisaillement.
- Les parois entre-couches se rompent et les trachéides rentrent les uns dans les autres.

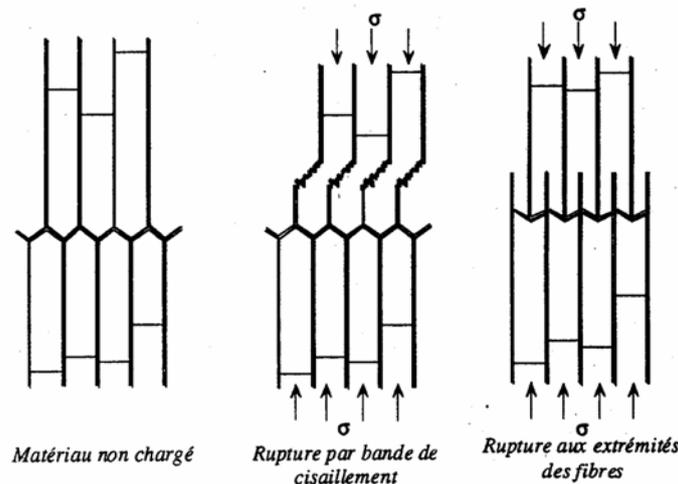


Figure 7-4 Mécanismes de rupture des trachéides du bois dans le sens des fibres [BOC-1997].

Au cours du chargement, deux phénomènes ont lieu conjointement: **la densification du bois** qui rend ce dernier moins poreux et plus compact, ce qui explique sa rigidité plus élevée pendant la phase "déchargement-rechargement"; **l'augmentation des contraintes de traction** agissant transversalement par rapport aux fibres continues et qui peut aller jusqu'à entraîner la décohésion des fibres (ou des trachéides), ce qui explique l'apparition des fissures parallèles aux fibres à la ruine de la pièce (Figure 7-5).



Figure 7-5 Mode de ruine d'un comportement "broche-bois" parallèle aux fibres.

### 7.3.1.2.1.3 Comportement élastique "broche-bois" perpendiculairement aux fibres

La Figure 7-6 présente la courbe expérimentale "force-enfoncement" d'un essai de portance locale perpendiculaire aux fibres. Après la réalisation des cycles de "déchargement-rechargement", l'essai est poursuivi jusqu'à la ruine.

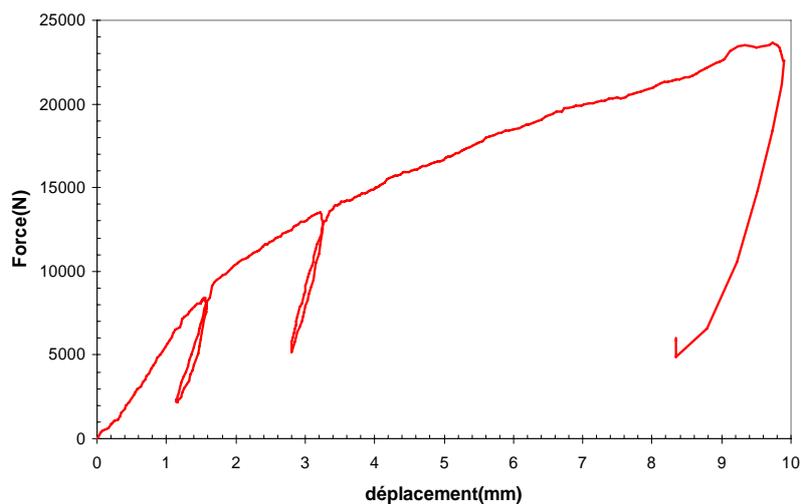


Figure 7-6 Courbe expérimentale "force-enfoncement" d'un essai de portance locale perpendiculaire aux fibres.

Comme lors de la description du comportement "broche-bois" parallèlement aux fibres, une déformation irréversible est également observée pendant la phase "pseudo-élastique". Il s'agit de nouveau du phénomène de densification du bois. Que ce soit dans la direction tangentielle ou radiale, les effets de densification sont les mêmes: les parois des trachéides se rapprochent et s'aplatissent [BOC-1997] (Figure 7-7).

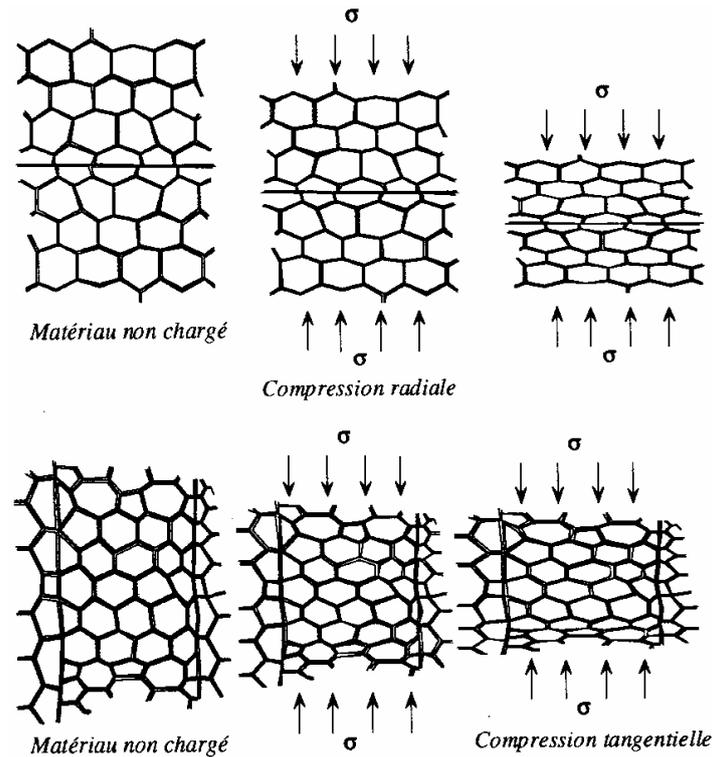
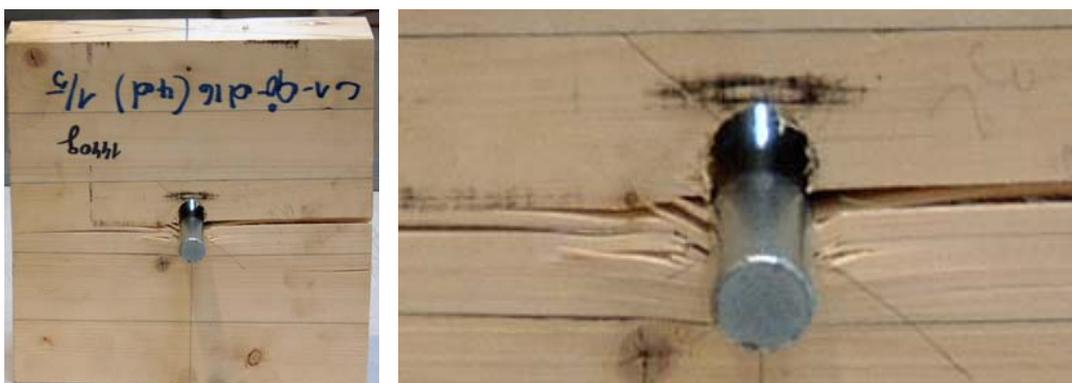


Figure 7-7 Mécanismes de rupture des trachéides du bois dans les sens tangential et radial [BOC-1997].

Parallèlement à la densification de matériau, les contraintes de traction agissant longitudinalement et transversalement par rapport aux fibres se développent jusqu'à ce qu'elles entraînent des ruptures dans les fibres. Ces ruptures consistent soit en décohésion des fibres due à la contrainte de traction transversale aux fibres, soit en tranchement des fibres dû à la contrainte de traction longitudinale aux fibres, soit en une combinaison des deux phénomènes (Figure 7-8).



(a) Vue générale de la ruine

(b) Vue focalisée autour de la broche

Figure 7-8 Modes de ruine d'un binôme "broche-bois" perpendiculairement aux fibres: (a) Fissure longitudinale entre les fibres due à la contrainte de traction transversale; (b) Rupture des fibres juste en-dessous de la broche due à la contrainte de traction longitudinale.

### 7.3.1.2.2 Identification des composantes

L'analyse phénoménologique du comportement "broche-bois" abordée au §7.3.1.2.1 permet de comprendre le mécanisme de distribution des efforts entre la broche et le bois et d'identifier les sources de déformation.

La réponse d'une éprouvette en essais de portance locale, tridimensionnelle par nature, est donc fondamentalement influencée par les caractéristiques géométriques et les propriétés du matériau dans les trois directions de l'espace. Une modélisation sophistiquée 3D complète des phénomènes semble toutefois superflue, surtout si un autre modèle simplifié peut représenter assez correctement ces phénomènes. En fait, les assemblages à broches travaillent normalement en état plan de contraintes. Les éprouvettes en essais doivent aussi respecter cette condition. Dans ce cas, le comportement 3D "broche-bois" peut être "scindé" en deux comportements 2D, dans deux plans perpendiculaires:

- **Dans le plan perpendiculaire à l'axe de la broche (Figure 7-9):**

Il s'agit de la réponse de chaque couche d'épaisseur du bois à l'application de la pression diamétrale de la broche. En fait, il s'agit du problème réel auquel nous devons faire face si l'essai était mené avec une broche supposée infiniment rigide.

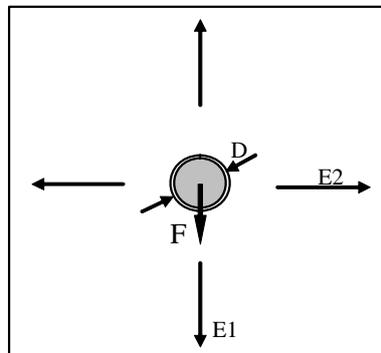


Figure 7-9 Comportement 2D du bois dans le plan perpendiculaire à l'axe de la broche.

- **Dans le plan parallèle à l'axe de la broche (Figure 7-10):**

Il s'agit de la réponse de l'ensemble des couches d'épaisseur de bois précitées sous l'action de la broche. Cette dernière, soumise à un effort  $F$  à la Figure 7-10, se déforme en flexion et en cisaillement. On peut assimiler le problème à celui d'une poutre déformable (la broche) reposant sur une fondation compressible (les couches d'épaisseur de bois).

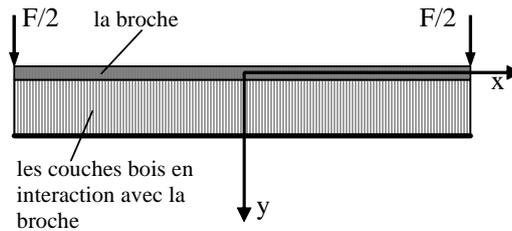


Figure 7-10 Comportement 2D du bois dans le plan parallèle à l'axe de la broche.

L'analyse du comportement 3D "broche-bois" peut à présent être remplacée par deux analyses 2D, dans deux plans perpendiculaires. Trois sources de déformation possibles sont alors identifiées:

- la déformation de la broche due à la flexion et au cisaillement;
- la déformation locale du bois juste sous la broche;
- la déformation de la partie inférieure de l'éprouvette d'essai sous la compression.

En effet, les efforts transmis au bois par la broche diffusent vers le pied de l'éprouvette. Localement, au voisinage du trou, l'effet de concentration de contraintes (l'effet d'"embedding") provoque une déformation locale dite "déformation d'"embedding"" (voir 'zone soumise à l'effet d'"embedding"' de la Figure 7-11). Mais plus globalement, les efforts diffusés entraînent aussi une déformation en compression à la partie inférieure de l'éprouvette (voir 'zone soumise à la compression' de la Figure 7-11).

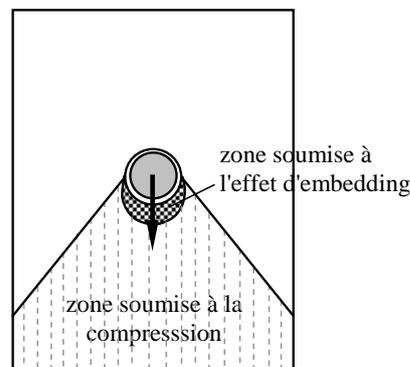


Figure 7-11 Deux types de déformation du bois.

Nous pouvons constater que le troisième type de déformation (dû à la compression) ne concerne pas la déformation locale proprement dite de l'assemblage. Dans l'analyse de structure, cet effet est inclus dans la déformation des éléments structuraux. Au final, le comportement "broche-bois", au sein des assemblages, est associé à deux sources principales de déformation: **la broche en flexion et cisaillement** et **le bois soumis à l'effet d'"embedding"**. A partir de là, deux composantes doivent être considérées (Figure 7-12):

- **composante "broche"** (broche en flexion et cisaillement);
- **composante d'"embedding"** (couche de bois d'épaisseur unitaire soumise à l'effet d'"embedding").

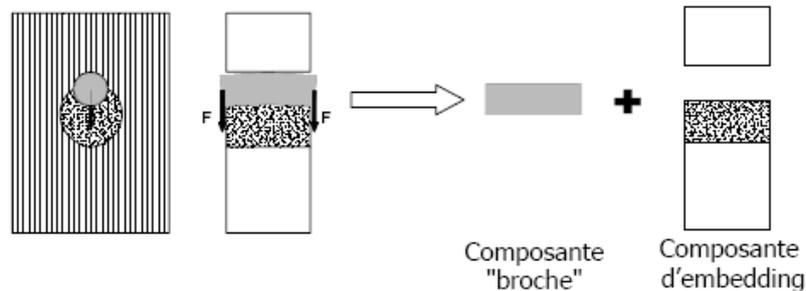


Figure 7-12 Composantes identifiées: composante "broche" et composante d'"embedding".

La composante "broche" est relativement bien connue. Des éléments "poutres" seront utilisés pour la modélisation de sa déformation en flexion et en cisaillement. Quant à la composante d'"embedding", les informations relatives sont par contre nettement moindres. Comme indiqué précédemment, l'EC5 propose une formule pour le " $K_{ser}$ " qui dépend uniquement du diamètre de l'assembleur et du poids propre du bois. Connaissant l'anisotropie du matériau bois, il est étonnant de constater que, d'après cette formule, le comportement du bois sous l'effet d'"embedding" apparaît comme insensible à la direction selon laquelle l'effort est exercé par rapport aux fibres du bois, ou encore à l'épaisseur de la pièce de bois. Manifestement, il s'agit là de simplifications non fondées et, dès lors, une expression analytique fournissant la rigidité de la composante d'"embedding", mais prenant en compte des caractéristiques mécaniques, la direction d'application de l'effort et l'épaisseur de la pièce de bois, doit être développée.

Le comportement 3D "broche-bois" repose donc sur deux composantes: la composante "broche" et la composante d'"embedding". Pour des efforts raisonnables, la composante "broche" reste souvent en régime élastique, tandis que la composante d'"embedding" peut travailler complètement en domaine non linéaire. L'allure non linéaire du comportement 3D "broche-bois" provient alors essentiellement du caractère non linéaire de la composante d'"embedding". Cette remarque sera confirmée plus tard par les simulations numériques. Elle est de plus très utile pour l'observation du comportement de la composante d'"embedding" à partir des essais sur la portance locale.

### 7.3.1.2.3 Caractérisation de la composante d'"embedding"

Une courbe expérimentale "charge-enfoncement" de comportement de la composante d'"embedding" obtenue par essai peut être subdivisée en 5 phases (Figure 7-13):

- Phase I (mise en place): la réponse de l'essai est fortement influencée par les diverses mises en place (système d'essai, jeu entre la broche d'acier et le bois, ...). La pente de la courbe est donc de toute évidence faible.
- Phase II (1<sup>er</sup> chargement): dès que la broche est en contact intime avec le bois et que le système est correctement mis en place et en charge, l'interaction "broche-bois" se manifeste pleinement et la rigidité de la courbe augmente.
- Phase III (déchargement-rechargement): cette phase est souvent utilisée pour mesurer le comportement "élastique" de la composante dans un essai.
- Phase IV (élasto-plastique): la plasticité progresse et la rigidité d'"embedding" décroît progressivement.
- Phase V (amorces de ruine et rupture): les premières fissures commencent à apparaître jusqu'à la rupture totale.

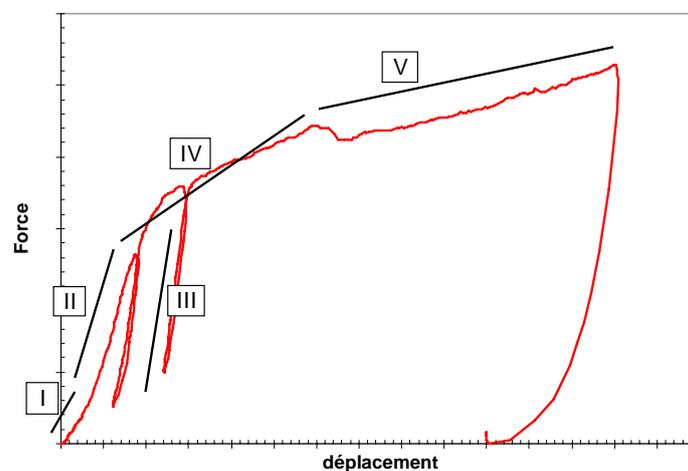


Figure 7-13 Phases caractéristiques du comportement de la composante d'"embedding".

Au contraire de l'acier, le bois est un matériau assez complexe. Son caractère fibreux et poreux influence manifestement son comportement mécanique. Alors que pour l'acier, une courbe de comportement mécanique doit avoir une rigidité presque similaire pour les deux phases "1<sup>er</sup> chargement" et "déchargement-rechargement", ceci n'est pas le cas dans le bois. Cela a été expliqué au §7.3.1.2.1.

Dans les faits, le bois sera souvent soumis au déchargement-rechargement, ce qui correspond à la phase III de la courbe de comportement. C'est dans cette phase que la rigidité de la composante d'"embedding" doit être mesurée et étudiée.

### 7.3.1.3 Conclusions

Deux composantes ont été identifiées dans le comportement "broche-bois": **la composante "broche"** et **la composante d'"embedding"**. Le comportement de la composante "broche" (en flexion et en cisaillement) est assez familier, tandis que peu d'informations relatives à la com-

posante d'"embedding" sont actuellement disponibles. La composante d'"embedding" doit donc être le sujet principal d'investigation lors de l'étude locale des composantes.

L'étude de la composante d'"embedding" doit être menée selon trois axes principaux:

- **Travaux à caractère expérimental**

Il s'agit des essais sur la portance locale afin de comprendre le comportement de la composante d'"embedding" en fonction des caractéristiques mécaniques du bois, l'angle de compression des fibres et le diamètre de la broche. Les résultats obtenus via ces essais jouent un rôle fondamental dans la validation des modèles numérique et analytique proposés.

- **Travaux à caractère numérique**

Il s'agit des simulations numériques, par la méthode des éléments finis, sur base d'un modèle numérique proposé. L'avantage des simulations numériques est qu'elles sont beaucoup moins coûteuses que les essais expérimentaux. Lorsque le modèle numérique est validé par les essais, de nombreuses simulations numériques sont générées pour l'étude paramétrique du comportement de la composante d'"embedding".

- **Travaux à caractère analytique**

Il s'agit de formules analytiques basées sur un modèle mathématique portant sur la prédiction du comportement élastique de la composante d'"embedding". Grâce à l'étude paramétrique menée numériquement, les paramètres les moins importants peuvent être négligés et un modèle analytique simplifié peut être proposé. Le but de la thèse est d'obtenir des formules analytiques simples et applicables pour les praticiens.

## 7.3.2 Etude globale des assemblages

### 7.3.2.1 Stratégie

En parallèle avec l'étude locale des composantes, une étude globale des assemblages est également menée. Il s'agit de la recherche d'un modèle capable de prévoir la manière dont les efforts se distribuent dans l'assemblage. Les étapes à suivre sont tout à fait similaires à celles de l'étude des composantes:

- Des essais d'assemblages, du très simple au plus complexe, sont indispensables pour évaluer le comportement des assemblages. Ils fournissent également une base de données fondamentales dans la validation des modèles numérique et analytique proposés.

- Des simulations numériques, sur base de modèles numériques, par la méthode des éléments finis, sont réalisées. Lorsque le modèle numérique est validé, les simulations contribuent efficacement à l'étude paramétrique du comportement des assemblages.
- Une fois une compréhension fine de la réponse des assemblages acquise, des modèles analytiques portant sur la prédiction du comportement élastique des assemblages sont proposés. Cela représente aussi l'objectif de cette thèse.

L'analyse de la distribution des efforts dans un assemblage est présentée dans les pages suivantes.

### 7.3.2.2 Analyse de l'étude globale des assemblages

#### 7.3.2.2.1 Description du comportement d'un assemblage

Les efforts transmis de la structure à un assemblage sont, en général, constitués de trois composantes (Figure 7-14): le moment ( $M_j$ ), l'effort tranchant ( $T_j$ ) et l'effort normal ( $N_j$ ).

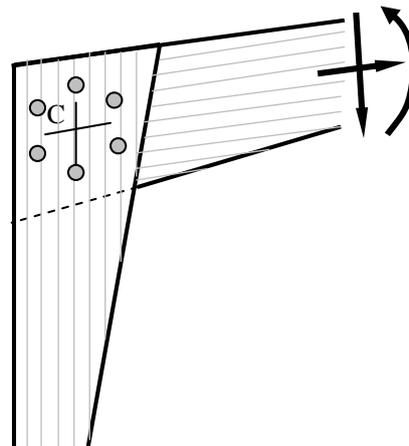


Figure 7-14 Efforts ( $M_j$ ,  $N_j$ ,  $T_j$ ) agissant sur un assemblage.

L'effort  $N_j$  (resp.  $T_j$ ) entraîne une déformation locale en translation au sein de l'assemblage; les broches se déplacent dans la direction de l'effort sollicitant. L'application du moment  $M_j$ , quant à lui, se solde par une déformation locale de l'assemblage en rotation. Vu la similitude des effets provoqués par deux efforts  $N_j$  et  $T_j$ , les assemblages soumis seulement à  $N_j$  ou  $T_j$  peuvent dès lors être classés dans la catégorie "assemblages en cisaillement". Les assemblages soumis seulement à  $M_j$  sont répertoriés comme "assemblages en flexion".

En régime élastique, en petites déformations, la superposition des effets dus à  $M_j$ ,  $N_j$  et  $T_j$  est admise. La réponse de l'assemblage sera donc étudiée séparément en cisaillement et en flexion. Une fois les comportements élastiques de l'assemblage en cisaillement et en flexion connus, le comportement élastique de l'assemblage sous la sollicitation réelle est obtenu par superposition.

### 7.3.2.2 Assemblage en cisaillement

La réponse d'un assemblage en cisaillement combiné (Figure 7-15a) -  $N_j$  et  $T_j$  transmis par la poutre - peut toujours être réduite à un problème de cisaillement simple (Figure 7-15b):

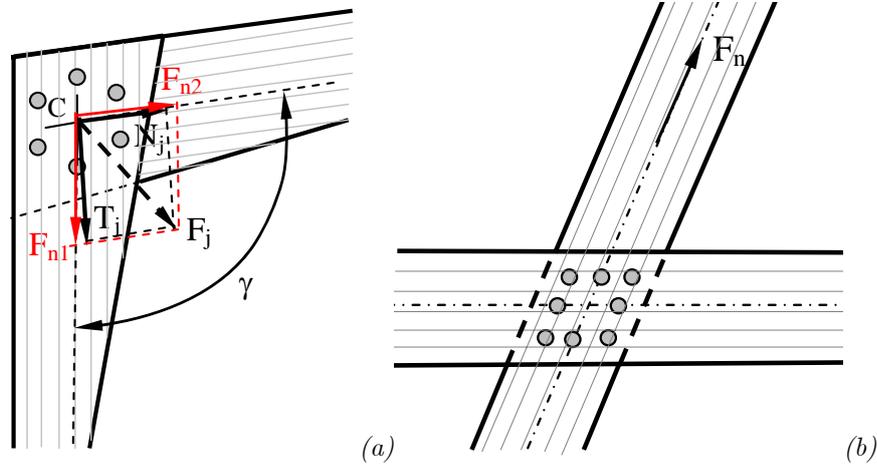


Figure 7-15 Assemblage en cisaillement combiné (a) et simple (b).

En effet, le couple  $(N_j, T_j)$ , dans le repère orthogonal de la poutre, peut être remplacé par  $(F_{n1}, F_{n2})$  équivalents dans le repère dont les axes sont orientés selon les directions des fibres de la poutre et de la colonne. Si la poutre est assemblée perpendiculairement à la colonne,  $(N_j, T_j)$  et  $(F_{n1}, F_{n2})$  sont identiques. Si la poutre est assemblée avec un angle  $\gamma$  par rapport à la colonne,  $(F_{n1}, F_{n2})$  sont calculés par les formules ci-après:

$$F_{n1} = \frac{T_j}{\cos(\gamma - \pi/2)} \quad (7.1)$$

$$F_{n2} = N_j + T_j \tan(\gamma - \pi/2) \quad (7.2)$$

Par le principe de superposition, le comportement élastique d'un assemblage en cisaillement combiné est la somme des réponses sous  $F_{n1}$  et  $F_{n2}$ . Le comportement de l'assemblage sous l'application de  $F_{n1}$  (resp.  $F_{n2}$ ) seul correspond à un cisaillement simple comme montré à la Figure 7-15b.

La réponse d'un assemblage soumis à cisaillement simple est liée à une déformation relative de translation  $u$  entre les membrures. En régime élastique, le comportement d'un assemblage en cisaillement simple est caractérisé par une rigidité de translation  $K_{ac}$  ( $K_{ac} = F_n/u$ ). Un modèle analytique pour la détermination de la rigidité d'un assemblage en cisaillement sera proposé au §9.

Dans la modélisation de la structure, le comportement d'un assemblage en cisaillement peut être modélisé par deux ressorts de translation caractérisés par  $K_{ac1}$  et  $K_{ac2}$ , selon la direction des fibres, respectivement de la poutre et de la colonne (Figure 7-16):

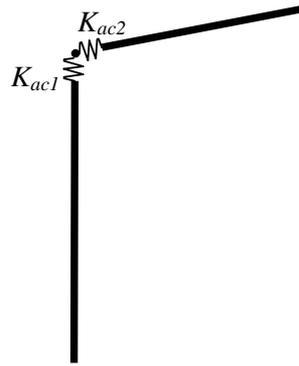


Figure 7-16 Modélisation d'un assemblage en cisaillement.

### 7.3.2.2.3 Assemblage en flexion

La réponse d'un assemblage soumis à un moment de flexion (Figure 7-17) est une rotation relative  $\varphi_j$  entre la poutre et la colonne. En régime élastique, le comportement de l'assemblage est caractérisé par une rigidité flexionnelle  $K_{af}$  ( $K_{af} = M_j/\varphi_j$ ).

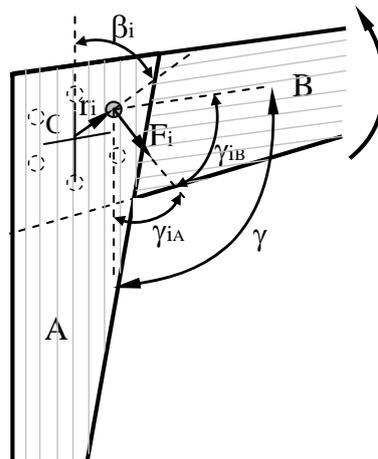


Figure 7-17 Assemblage en flexion.

Par la méthode des composantes, la détermination du comportement d'un assemblage en flexion doit être fondée sur le comportement de chaque zone "broche-bois". Ce dernier est déterminé à partir des composantes identifiées au §7.3.1.2.2. Un modèle pour la détermination de la rigidité en flexion de l'assemblage sera proposé au §10.

Dans la modélisation de la structure, le comportement d'un assemblage en flexion peut être représenté par un ressort de rotation de rigidité flexionnelle  $K_{af}$  (Figure 7-16):

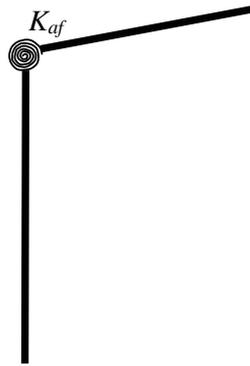


Figure 7-18 Modélisation d'un assemblage en flexion.

#### 7.3.2.2.4 Assemblage en flexion et en cisaillement

En général, le comportement élastique d'un assemblage soumis à la fois à  $M_j$ ,  $N_j$  et  $T_j$  devrait être modélisé par les trois types de ressort précisés aux deux paragraphes précédents. Cependant, dans bon nombre de cas, la déformation de l'assemblage en rotation entraîne un effet plus marqué sur la structure que les déformations locales en translation. Ceci conduit souvent à négliger les effets de  $N_j$  et  $T_j$  par rapport à ceux de  $M_j$  dans la modélisation du comportement semi-rigide de l'assemblage.

#### 7.3.2.3 Conclusions

Deux types de comportement caractéristiques pour les assemblages mécaniques à broches sont identifiées: **assemblage en cisaillement simple** (Figure 7-15b) et **assemblage en flexion** (Figure 7-17). Lorsque ceux-ci sont connus, le comportement élastique de l'assemblage soumis à une sollicitation quelconque peut être déterminé par le principe de superposition.

Tout comme pour les composantes, l'étude des assemblages sera menée selon trois axes principaux:

- **Travaux à caractère expérimental**

Il s'agit d'essais sur assemblages, allant du très simple (à une broche) au plus complexe (à plusieurs broches). Les résultats donnés par les essais jouent un rôle fondamental dans la validation des modèles numérique et analytique proposés.

- **Travaux à caractère numérique**

Il s'agit de simulations numériques, par la méthode des éléments finis, sur base d'un modèle numérique proposé. Lorsque le modèle numérique est validé par les essais expérimentaux, de nombreuses simulations numériques sont ensuite générées dans le cadre d'études paramétriques.

- **Travaux à caractère analytique**

Il s'agit du développement de formules analytiques basées sur un modèle mathématique autorisant la prédiction du comportement élastique des assemblages. Grâce à l'étude paramétrique numérique, les paramètres les moins importants peuvent être négligés et un modèle analytique simplifié peut être proposé.



## **Partie 5 Etude des composantes**

---

## Partie 5 Etude des composantes

### Chapitre 8 Etude de la composante d'"embedding"

8.1 Introduction.....	79
8.2 Définition du programme expérimental sur base de travaux à caractère numérique .....	79
8.2.1 Dimensions des éprouvettes .....	80
8.2.2 Evaluation de l'influence du frottement "acier-bois".....	81
8.2.3 Evaluation de l'influence du module de cisaillement du bois.....	82
8.2.4 Evaluation de l'influence du coefficient de Poisson du bois .....	82
8.2.5 Relation entre rigidité d'"embedding" et angle d'application de la charge .....	83
8.2.6 Mesures à effectuer sur les éprouvettes au laboratoire.....	84
8.2.7 Conclusions .....	85
8.3 Travaux à caractère expérimental .....	85
8.3.1 Définition du programme expérimental.....	85
8.3.2 Application des forces et instrumentation .....	87
8.3.3 Traitement des résultats d'essais de compression réalisés au CTIB .....	88
8.3.4 Résultats des essais de portance locale du projet $K_{ser}$ réalisés au CTIB .....	89
8.4 Travaux à caractère numérique.....	90
8.4.1 Modèle 2D dans le plan perpendiculaire à l'axe de la broche .....	91
8.4.1.1 Modélisation .....	91
8.4.1.2 Loi de matériau.....	91
8.4.1.3 Critère de plasticité anisotrope de HILL .....	93
8.4.1.4 Allure bilinéaire du comportement 2D de la composante d'"embedding" dans le plan perpendiculaire à l'axe de la broche.....	95
8.4.2 Modèle 2D dans le plan parallèle à l'axe de la broche - comportement "broche-bois" .....	95
8.4.2.1 Modélisation .....	96
8.4.2.2 Intégration du comportement des composantes .....	96
8.4.2.3 Estimation de la déformation due aux efforts tranchants .....	97
8.4.3 Traitement des simulations numériques .....	98
8.5 Travaux à caractère analytique .....	98
8.5.1 Modèle 2D dans le plan perpendiculaire à l'axe de la broche .....	98
8.5.2 Sensibilité de la rigidité d'"embedding" à la variation des propriétés mécaniques du matériau.....	99
8.5.2.1 Influence du coefficient de Poisson ( $\nu_{12}$ ).....	99

8.5.2.3 Conclusions.....	101
8.5.3 Modèle 2D dans le plan parallèle à l'axe de la broche - comportement "broche-bois" .....	101
8.5.3.1 Lois du comportement.....	101
8.5.3.2 Formule analytique pour une poutre en flexion .....	102
8.6 Validation des modèles numérique et analytique .....	104
8.6.1 Comparaison des résultats obtenus par les modèles numérique et analytique avec ceux obtenus expérimentalement au CITB.....	105
8.6.1.1 Eprouvettes de diamètre D10.....	106
8.6.1.2 Eprouvettes de diamètre D16.....	107
8.6.1.3 Eprouvettes de diamètre D20.....	108
8.6.1.4 Discussion des résultats.....	109
8.6.2 Consultation des essais de portance locale dans la bibliographie .....	110
8.6.2.1 Essais de Bocquet et d'Iroko [BOC-1997].....	110
8.6.2.1.1 Essais d'Iroko	111
8.6.2.1.2 Essais de Bocquet	112
8.6.2.2 Essais de portance locale de l'Université de Naples [CAL-2005].....	113
8.6.2.3 Discussion des résultats.....	114
8.6.3 Nouveaux essais de portance locale réalisés à l'ULG.....	115
8.6.3.1 Eprouvettes de diamètre D10.....	116
8.6.3.2 Eprouvettes de diamètre D16.....	117
8.6.3.3 Eprouvettes de diamètre D20.....	118
8.6.3.4 Discussion des résultats.....	119
8.7 Conclusions .....	121



# Chapitre 8 Etude de la composante d'"embedding"

## 8.1 Introduction

Comme mentionné au chapitre "Stratégie de développement", deux composantes ont été identifiées pour le comportement "broche-bois": **la composante "broche"** et **la composante d'"embedding"**. Le comportement de la composante "broche" (en flexion et en cisaillement) est assez bien connu, tandis que peu d'informations relatives à la composante d'"embedding" sont actuellement disponibles. La composante d'"embedding" est donc le sujet principal d'investigation de ce chapitre.

L'étude de la composante d'"embedding" sera menée selon trois axes principaux: expérimental, numérique et analytique. Pour les aspects numériques, le logiciel aux éléments finis Lagamine est utilisé. Le code Lagamine est développé par le département M&S de l'Université de Liège depuis 1982. Il permet de résoudre des analyses de types mécanique, thermique et dynamique. Ces dernières peuvent être réalisées avec des matériaux anisotropes non linéaires, en grandes déformations et avec problèmes de contact.

## 8.2 Définition du programme expérimental sur base de travaux à caractère numérique

Le programme expérimental joue un rôle très important dans l'établissement de règles de calcul des composantes. Afin de mener ces essais d'une manière aussi judicieuse que possible, une étude numérique préalable est effectuée.

Les travaux numériques donnent une première vue du comportement des composantes étudiées et permettent d'affiner la compréhension que l'on peut avoir, au départ, des phénomènes à étudier. En fait, l'idée est de profiter des résultats numériques afin:

- de préciser la géométrie des éprouvettes à tester en laboratoire;
- d'analyser les paramètres mécaniques du bois (frottement "acier-bois", module de cisaillement, coefficient de Poisson, ...) et en déterminer le nombre minimum et strictement nécessaire à mesurer en laboratoire;
- d'étudier la réponse de l'éprouvette sous l'effet d'"embedding" et d'en déduire la manière de réaliser les mesures expérimentales lors des essais.

### 8.2.1 Dimensions des éprouvettes

La rigidité d'"embedding" provient de la réponse locale du bois due à la pression diamétrale appliquée par la broche en acier. Pour bien étudier cette composante selon la direction d'application de la charge par rapport aux fibres et en évitant les effets de bord, les dimensions de l'éprouvette doivent respecter certaines valeurs limites.

Des recommandations relatives aux dimensions des éprouvettes de portance locale avec des angles de compression de  $0^\circ$  et  $90^\circ$  par rapport aux fibres sont données dans [EN383]. A partir de ces recommandations, un type d'éprouvette de forme carrée est proposé pour réaliser les essais de portance locale selon différents angles de compression par rapport aux fibres. Les dimensions sont fixées en fonction du diamètre  $D$  de la broche:  $14D \times 14D$  de côté (Figure 8-1 et Figure 8-2).

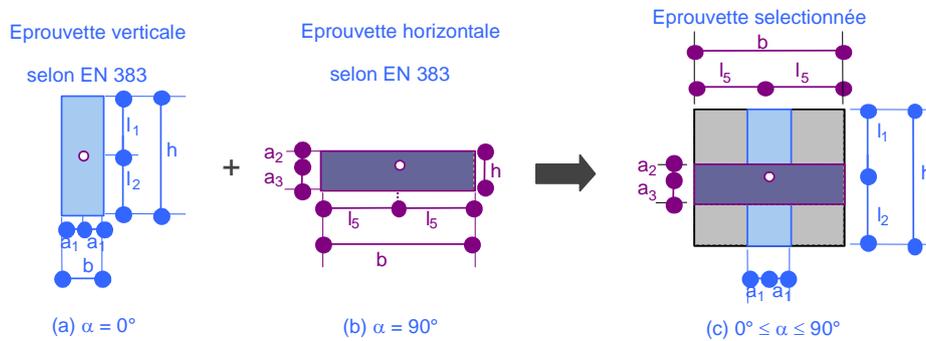


Figure 8-1 Dimensionnement des éprouvettes de portance locale.

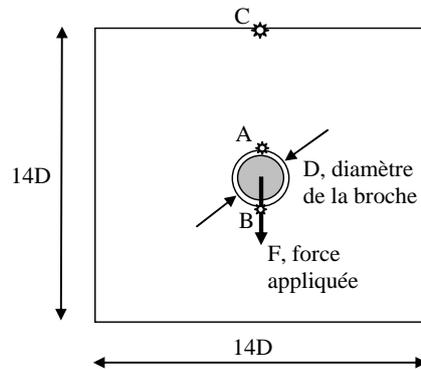


Figure 8-2 Géométrie des éprouvettes de portance locale.

En partant de cette géométrie, avec une broche D16 ( $D = 16\text{mm}$ ) et une épaisseur  $t$  égale à 34 mm, des simulations numériques ont été en premier lieu réalisées afin de vérifier:

- les effets de bord;
- l'influence des paramètres mécaniques du bois étudié (frottement "acier-bois"  $\phi$  au §8.2.2, module de cisaillement  $G$  au §8.2.3 et coefficient de Poisson  $\nu$  au §8.2.4);
- l'évolution de la rigidité d'"embedding" en fonction de l'angle de compression des fibres (§8.2.5);

- les mesures à effectuer sur les éprouvettes au laboratoire (§8.2.6).

Au départ de la recherche, les paramètres de matériau ont été fixés en accord avec l'EC5, sur base de la classe du bois étudié (Tableau 8-1 au §8.4.1.2). La modélisation pour les simulations sera présentée en détail au §8.4.

La Figure 8-3 montre l'état de contraintes de von Mises lors de la simulation d'une éprouvette comprimée dans le sens des fibres. Les contraintes, ainsi que les déformations, se concentrent au milieu de l'éprouvette et diffusent rapidement vers les bords. Cela confirme bien que les dimensions de l'éprouvette proposées suffisent pour éviter les effets de bord.

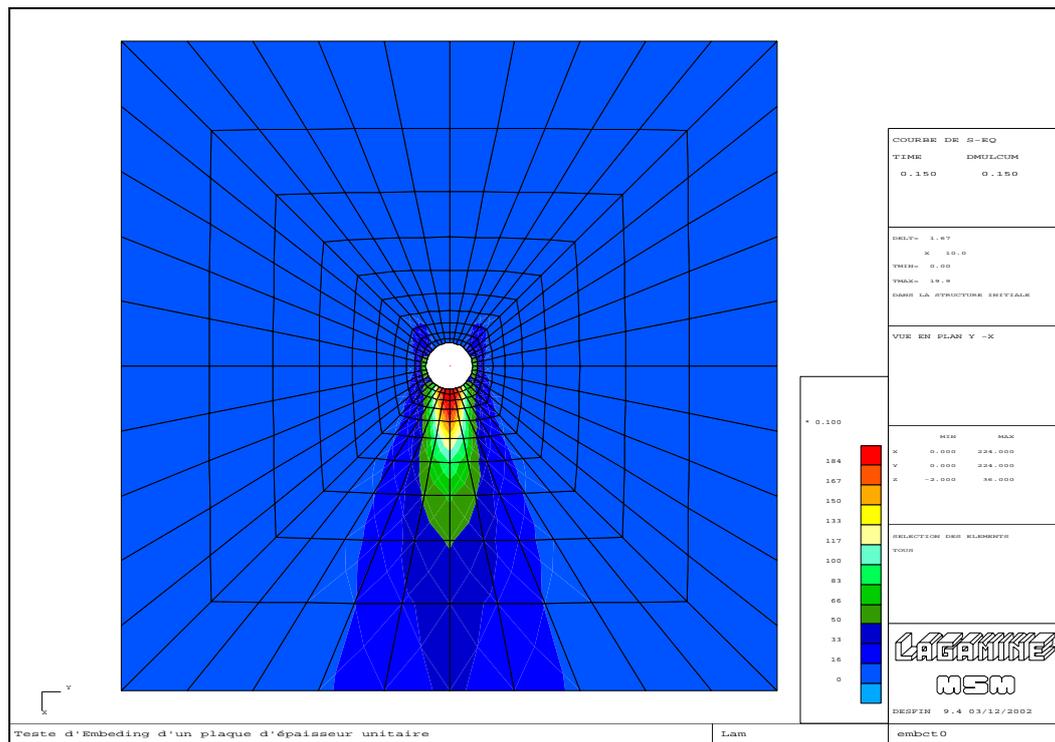


Figure 8-3 Contraintes de Von Mises issues du code Lagamine.

### 8.2.2 Evaluation de l'influence du frottement "acier-bois"

La Figure 8-4 présente les courbes "charge-déplacement" de la broche obtenues via des simulations des essais de type "embedding" pour différentes valeurs du coefficient de frottement "acier-bois" (de 0 à 0.6 selon [BLE-2000]). A l'échelle de l'essai tout entier, les courbes sont presque similaires dans la partie élastique et ne se différencient que lorsque la déformation progresse de manière non réversible dans le bois. Puisque la recherche a pour objectif l'étude du comportement élastique de la composante d'"embedding", c'est-à-dire la rigidité dans la zone de déformation élastique, on en conclut que l'influence du paramètre "frottement acier-bois" peut être négligée.

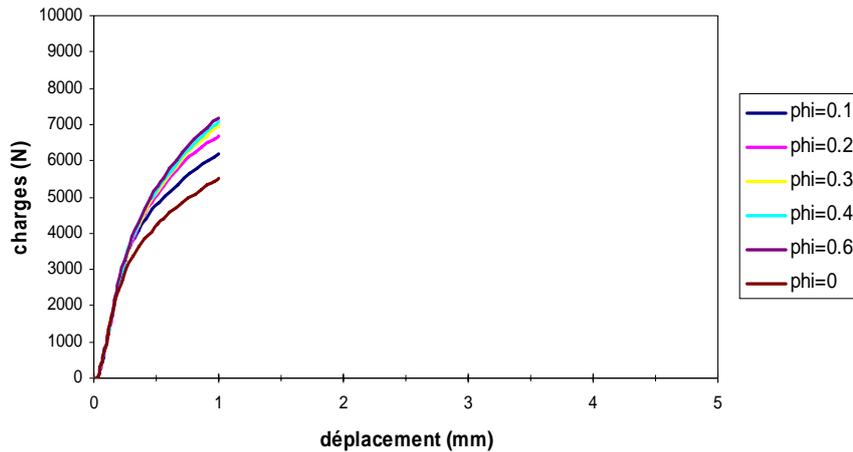


Figure 8-4 Courbes "charge-déplacement" de la broche en fonction de différentes valeurs de frottement "acier-bois".

### 8.2.3 Evaluation de l'influence du module de cisaillement du bois

Le BLC a normalement une valeur de module de cisaillement  $G$  comprise entre 400 et 1500 N/mm<sup>2</sup> (valeur obtenue dans [EN338]). La Figure 8-5 présente une série de courbes charge-déplacement de la broche pour des simulations réalisées avec différentes valeurs de  $G$ . On constate, ici aussi, la faible sensibilité des courbes à la valeur du paramètre  $G$ . Ce paramètre ne fera donc pas l'objet de mesures complémentaires en laboratoire.

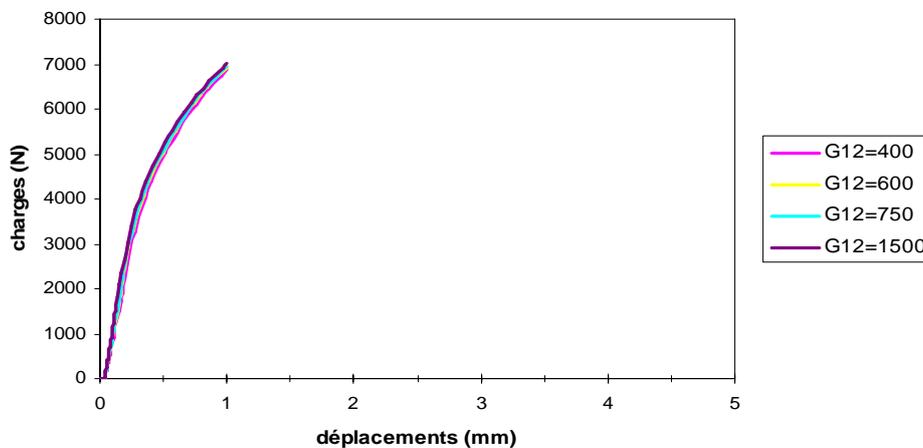


Figure 8-5 Courbes "charge-déplacement" de la broche en fonction de différentes valeurs de  $G$ .

### 8.2.4 Evaluation de l'influence du coefficient de Poisson du bois

Des valeurs de 0,1 à 0,5 du coefficient de Poisson  $\nu$  sont considérées pour les simulations de comportement illustrées à la Figure 8-6. Les courbes sont presque identiques dans le domaine de déformation élastique. En conclusion, le coefficient de Poisson  $\nu$  n'influence pas de manière significative la rigidité d'"embedding" et ne fera donc pas l'objet de mesures expérimentales spécifiques.

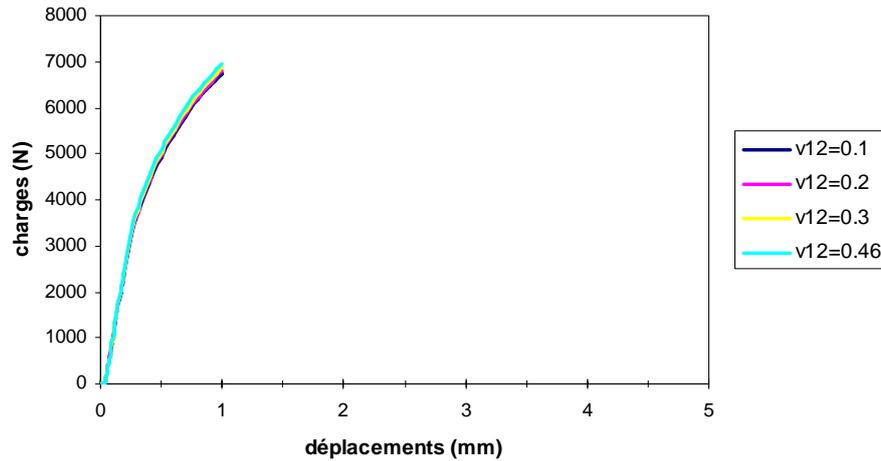


Figure 8-6 Courbe "charge-déplacement" de la broche en fonction de différentes valeurs du coefficient de Poisson  $v$ .

### 8.2.5 Relation entre rigidité d'"embedding" et angle d'application de la charge

Inspiré des modèles à ressort utilisés souvent dans la méthode des composantes ainsi que pour la modélisation de structures, l'interaction "broche-bois" selon un angle  $\alpha$  de compression des fibres peut être représentée, dans un modèle simplifié, par deux ressorts orthogonaux disposés suivant les axes orthogonaux du matériau bois. A la Figure 8-7, la composante d'"embedding" est modélisée de manière telle que la broche d'acier est soutenue par un système de ressorts qui représentent les deux composantes principales à  $0^\circ$  et à  $90^\circ$ :

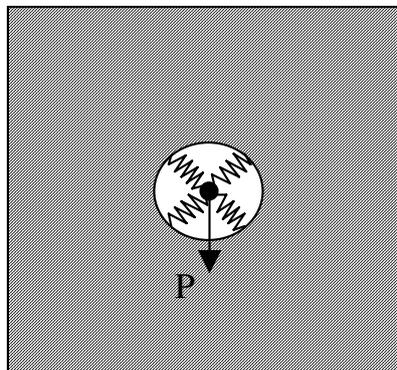


Figure 8-7 Modèle simplifié de calcul de la rigidité d'"embedding" sur base des deux composantes-clés: la rigidité d'"embedding" à  $0^\circ$  et la rigidité d'"embedding" à  $90^\circ$ .

Ce modèle permet d'établir une formule d'évolution de la valeur de rigidité d'"embedding" en fonction des angles de compression des fibres:

$$K_\alpha = K_0 \cos^2 \alpha + K_{90} \sin^2 \alpha \quad (8.1)$$

La validité de cette formule peut être démontrée par voie numérique. La Figure 8-8 présente un diagramme d'évolution de la rigidité d'"embedding" en fonction des angles de compression des fibres. Les valeurs de la rigidité d'"embedding" issues des simulations numériques effec-

tuées avec Lagamine sont reportées dans ce diagramme, sous forme de points associés aux angles d'inclinaison des fibres, par pas de  $10^\circ$  (les points "simul"). La courbe continue "formule" exprime la variation de la rigidité d'"embedding"  $K_\alpha$  en fonction de l'angle de compression des fibres (Equation (8.1) dans laquelle  $K_0$  et  $K_{90}$  représentent respectivement les valeurs numériques pour  $\alpha = 0^\circ$  et  $\alpha = 90^\circ$ ).

La correspondance entre les valeurs de  $K_\alpha$  numériques et la courbe d'évolution estimée par la formule ci-dessus semble presque parfaite. Tout cela reste évidemment à confirmer expérimentalement.

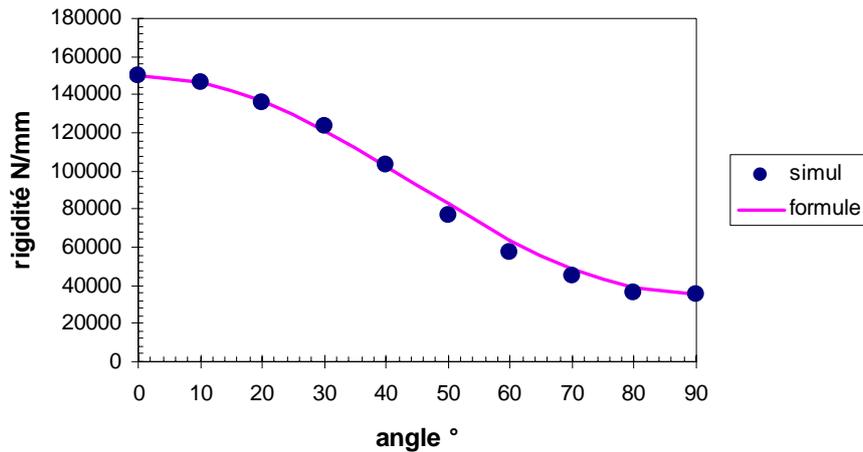


Figure 8-8 Relation rigidité d'"embedding" - angle de compression des fibres.

### 8.2.6 Mesures à effectuer sur les éprouvettes au laboratoire

Il est nécessaire de rappeler que la composante d'"embedding" couvre la seule déformation locale, aussi appelée déformation d'"embedding". Dans les essais tels que ceux décrits à la Figure 8-2, le déplacement de la broche (point B) fait plus que refléter la déformation locale que l'on veut mesurer: en fait, cette mesure cumule le déplacement dû à l'"embedding" et celui dû au raccourcissement de la partie inférieure de l'éprouvette en compression.

La Figure 8-9 présente les résultats de deux simulations numériques sur la portance locale, l'une pour une application de la charge dans le sens des fibres (angle de  $0^\circ$  - courbes a et b), l'autre perpendiculairement aux fibres (angle de  $90^\circ$  - courbes c et d).

Pour chaque simulation, deux courbes "charges-déplacements" sont présentées:

- le déplacement mesuré au point B de la Figure 8-2 (courbes a et c);
- le déplacement mesuré au point A de la Figure 8-2 (courbes b et d).

Le déplacement au point B représente l'enfoncement de la broche dans l'éprouvette et le déplacement au point A représente approximativement le raccourcissement de la partie inférieure de l'éprouvette en compression, mesure non entâchée par le déplacement lié à l'effet

d'"embedding". La Figure 8-9 démontre à quel point ce dernier (au point A) n'est pas tout à fait négligeable devant le déplacement de la broche (au point B). Il est dès lors conseillé de mesurer, en plus du déplacement de la broche, le déplacement du point A et de définir comme "déformation d'"embedding"", le déplacement relatif entre les points B et A.

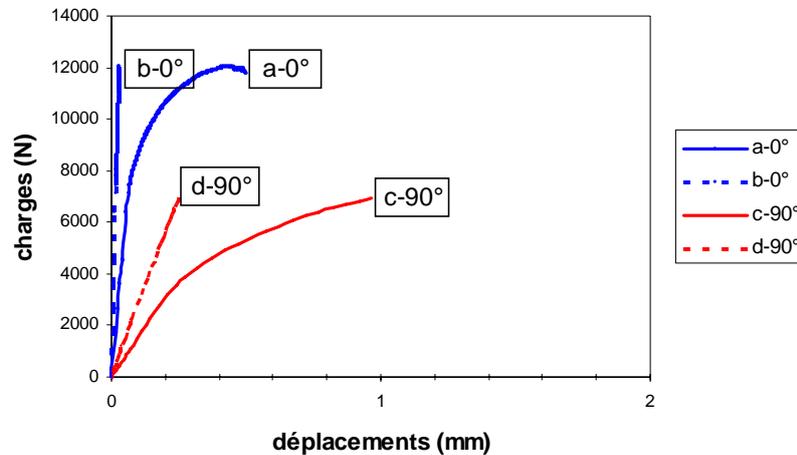


Figure 8-9 Contributions au déplacement total de la broche mesuré lors des essais.

## 8.2.7 Conclusions

Puisque le modèle numérique n'est pas encore validé par les essais expérimentaux, les premiers résultats ci-dessus ne sont que des observations préliminaires tirées des simulations numériques. En tout cas, cela permet, en premier lieu de:

- fixer une géométrie pour les éprouvettes de portance locale qui satisfait à la fois les recommandations de EC5 et qui réduit l'influence des effets de bord sur la réponse d'"embedding" de l'éprouvette;
- reconnaître une influence négligeable de certains paramètres (le frottement acier-bois, le module de cisaillement, le coefficient de Poisson) sur le comportement élastique de l'éprouvette dû à l'effet d'"embedding"; il suffira donc de déduire les valeurs de ces paramètres au moyen des formules proposées par l'EC5;
- décrire l'évolution de la rigidité d'"embedding" en fonction de l'angle de compression des fibres;
- identifier la composante d'"embedding" et suggérer la manière de réaliser les mesures expérimentales.

## 8.3 Travaux à caractère expérimental

### 8.3.1 Définition du programme expérimental

Comme indiqué avant (au §8.2), les objectifs poursuivis par ces essais sont de caractériser l'influence de l'angle de compression des fibres du bois, d'étudier l'influence du diamètre de la

broche, d'analyser l'influence de l'épaisseur du bois et enfin de déterminer des valeurs expérimentales de rigidité d'"embedding".

Les éprouvettes d'essais sont des parallélépipèdes à faces carrées (Figure 8-10a) dont le côté vaut 14 fois le diamètre de la broche. Elles sont fabriquées en fonction de l'angle des fibres  $\alpha$  ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $90^\circ$ ), du diamètre de la broche  $D$  (10mm, 16mm, 20mm) et de l'épaisseur  $t$  (1,5D, 4D). En outre, pour satisfaire la norme [EN383], des éprouvettes de forme parallélépipédique à faces rectangulaires, positionnées verticalement (Figure 8-10b) sous compression axiale et positionnées horizontalement (Figure 8-10c) sous compression transversale, complètent la série d'essais; elles permettront de vérifier la cohérence entre les résultats d'essais.

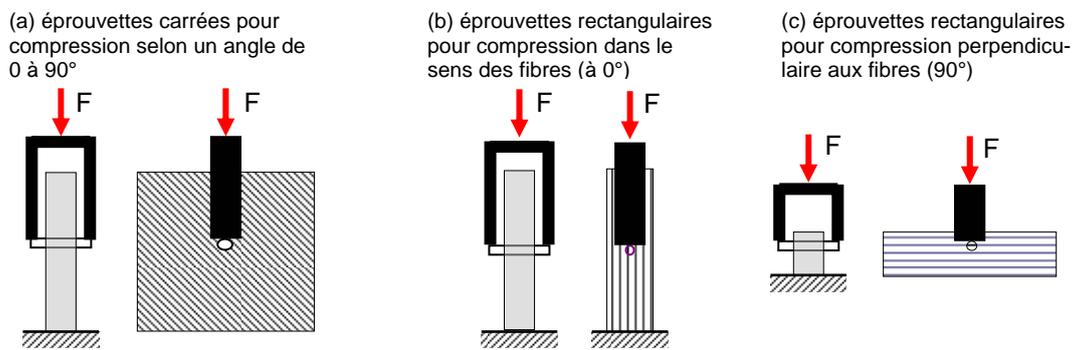


Figure 8-10 Eprouvettes des essais de portance locale.

Les échantillons sont prélevés dans des poutres en bois lamellé-collé standard (Figure 8-11a) produites en milieu industriel par la société Lamcol Sud Charpentes (à Marloie). Elles sont en résineux et sont classées GL28h selon le fabriquant.



Figure 8-11 (a) Poutres en bois lamellé-collé utilisées pour l'ensemble des essais de compression et de flexion (b) Eprouvettes à faces carrées pour les essais de compression selon des angles variant de  $0$  à  $90^\circ$  par rapport aux fibres.

Toutes les informations relatives à chacune des ces éprouvettes sont disponibles à l'**Annexe C.1**.

### 8.3.2 Application des forces et instrumentation

Le dispositif d'essai est illustré à la Figure 8-12 ci-après. La charge est appliquée de chaque côté de la broche via une pièce métallique spécialement usinée pour venir épouser la broche sur la moitié de la circonférence. La charge ( $F$ ) et le déplacement de la tête du vérin ( $d1$  de la Figure 8-13, correspondant au déplacement du point B de la Figure 8-2) sont mesurés en continu.

La charge est appliquée selon une vitesse de déplacement constante de la tête du vérin (1 mm/min), en 3 cycles de charge-décharge plafonnés à :

- 4 dixièmes de la charge maximale estimée;
- 6 dixièmes de la charge maximale estimée;
- la rupture.

Le déplacement du point A de la Figure 8-2 ne peut être directement mesuré. Un dispositif particulier a donc dû être mis au point: une cornière métallique (voir Figure 8-12b), suffisamment rigide et dont une aile a été éliminée sur toute la longueur de l'éprouvette en bois, est fixée à l'horizontale par 2 clous de 1 mm de diamètre, positionnés de part et d'autre du point A repéré à la Figure 8-2. Les capteurs de déplacement sont placés verticalement sur chaque extrémité de la cornière (mesures  $d2$  et  $d3$  de la Figure 8-13) et permettent, après re-traitement des données, de déterminer le déplacement du point A. Le même dispositif est fixé sur la face arrière de l'éprouvette pour permettre de relever les déplacements  $d4$  et  $d5$ , aussi illustrés à la Figure 8-13.

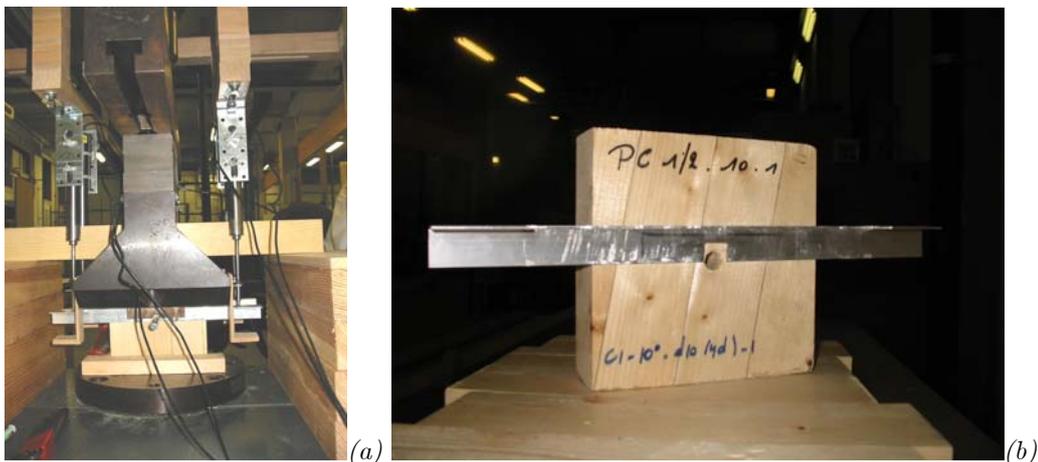


Figure 8-12 (a) Vue générale du dispositif d'essai (b) vue des cornières métalliques servant à mesurer le déplacement du point A.

Le déplacement du point C de la Figure 8-2 est relevé par le capteur  $d6$ , Figure 8-13.

La charge et les 6 déplacements sont mesurés en continu, tout au long de l'essai de compression mené en 3 phases.

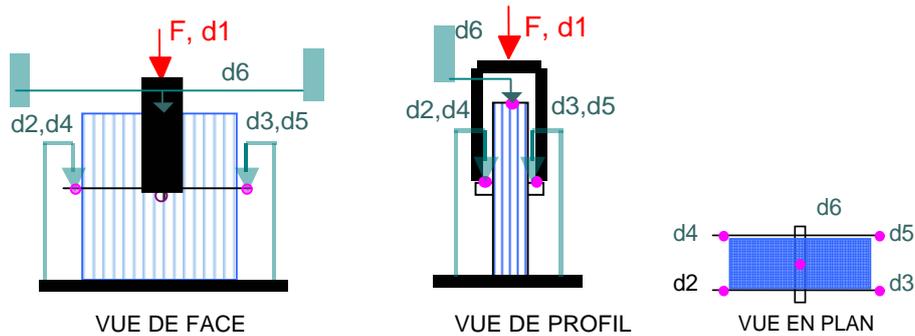


Figure 8-13 Instrumentation des essais de compression.

### 8.3.3 Traitement des résultats d'essais de compression réalisés au CTIB

Au cours d'un essai de portance locale, trois courbes caractéristiques principales sont relevées (Figure 8-14). La première correspond au déplacement total (courbe noire "zwick"); la deuxième s'identifie à la déformation de la partie inférieure de la pièce en compression (courbe rouge "dep. compress."); et enfin, la dernière, à la déformation due à l'effet d'"embedding" (courbe bleu "emb").

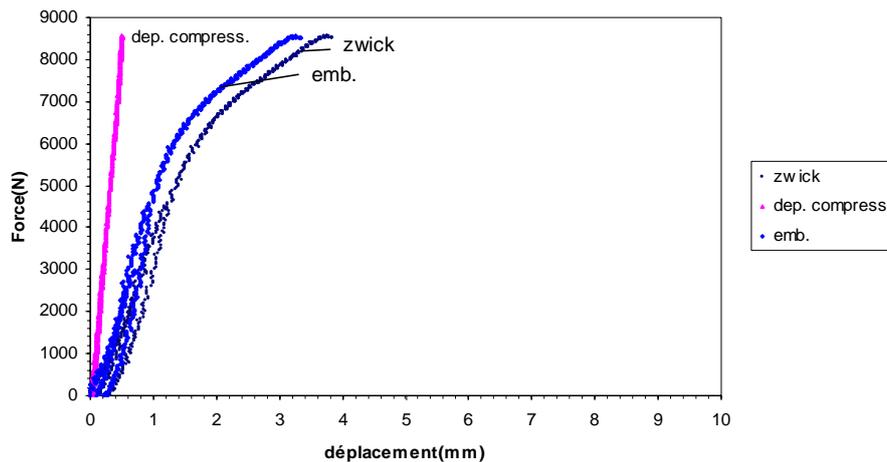


Figure 8-14 Courbes caractéristiques d'un essai de portance locale mené jusqu'à la ruine.

Les résultats expérimentaux valident les observations obtenues via les premières simulations numériques présentées au §8.2, à savoir:

- deux phénomènes contribuent au déplacement de la broche dans un essai de portance locale: la déformation de la pièce due à l'effet d'"embedding" et celle due à la compression;
- la déformation due à l'effet d'"embedding" a lieu localement, au voisinage du trou;
- la déformation de la partie inférieure de la pièce due à la compression est effectivement non négligeable par rapport avec celle d'"embedding" et doit être retirée de la déformation totale mesurée par le déplacement de la broche et ce, afin de bien évaluer la seule déformation d'"embedding".

Après avoir effectué le traitement individuel de chacun des essais, une seconde phase consiste à comparer entre eux, les essais d'une même série, afin de juger de la dispersion des résultats d'essais, mais aussi d'éventuellement éliminer, après examen détaillé, une courbe "hors-normes" dont, manifestement, l'allure s'éloignerait trop de celle des autres courbes du même groupe.

Les résultats complets des essais de portance locale sont regroupés à l'Annexe C.1 de la thèse.

### 8.3.4 Résultats des essais de portance locale du projet $K_{ser}$ réalisés au CTIB

Si la broche est supposée être indéformable en flexion et cisaillement, la rigidité de la composante d'"embedding" (**module d'"embedding"**), définie comme une rigidité par unité d'épaisseur de bois, peut simplement être obtenue en divisant l'effort appliqué à l'éprouvette par le déplacement de la broche, et ensuite par l'épaisseur de l'échantillon de bois. En réalité, la broche ne respecte pas l'hypothèse d'indéformabilité, et donc une correction est requise afin de définir le "vrai" module d'"embedding". Cette correction est basée sur le modèle 2D analytique proposé au §8.5.3.

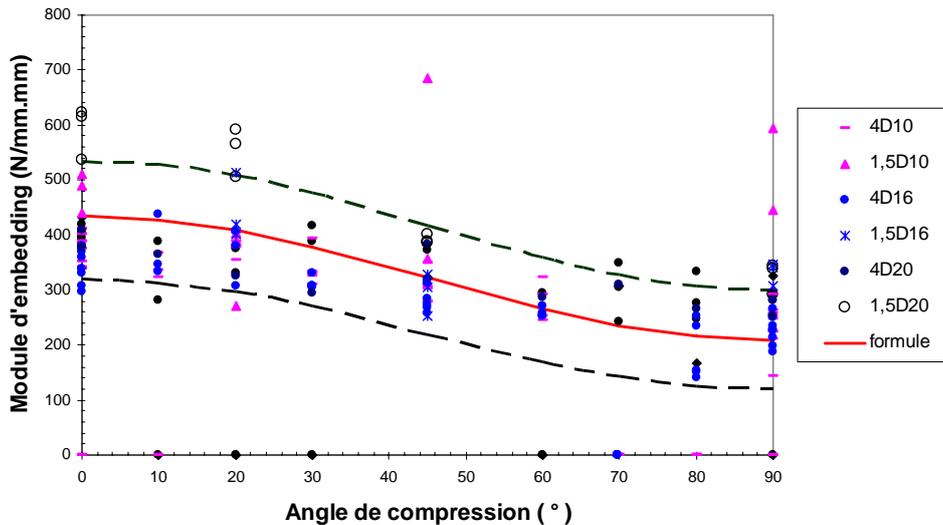


Figure 8-15 Diagramme des valeurs expérimentales et théoriques de la rigidité de la composante d'"embedding" des essais de diamètre D10, D16, D20 et d'épaisseur 4D-1,5D.

Les résultats expérimentaux des essais réalisés au CTIB concernant la rigidité de la composante d'"embedding" sont présentés en détail dans [CTI-2004]. La Figure 8-15 présente tous les résultats relatifs à la rigidité de la composante d'"embedding", en fonction de l'angle de compression des fibres, pour les essais décrits au §8.3.1:

- les points "-" représentent les valeurs des modules d'"embedding" obtenus via les éprouvettes avec une épaisseur 4xD10;

- les points "Δ" représentent les valeurs des modules d'"embedding" obtenus via les éprouvettes avec une épaisseur 1,5xD10;
- les points "●" représentent les valeurs des modules d'"embedding" obtenus via les éprouvettes avec une épaisseur 4xD16;
- les points "\*" représentent les valeurs des modules d'"embedding" obtenus via les éprouvettes avec une épaisseur 1,5xD16;
- les points "◆" représentent les valeurs des modules d'"embedding" obtenus via les éprouvettes avec une épaisseur 4xD20;
- les points "o" représentent les valeurs des modules d'"embedding" obtenus via les éprouvettes avec une épaisseur 1,5xD20;
- la courbe "formule" représente l'évolution théorique du module d'"embedding" en fonction de l'angle de compression des fibres (formule (8.1));
- les courbes discontinues déterminent la zone où se trouvent la plupart des valeurs expérimentales.

L'analyse des résultats à la Figure 8-15 montre une relative insensibilité des valeurs du module d'"embedding" selon le diamètre des broches: D10, D16 et D20. La courbe d'évolution du module d'"embedding" en fonction de l'angle de compression des fibres (obtenue via la formule (8.1)) correspond assez bien aux valeurs moyennes des résultats expérimentaux. Au final, ce diagramme permet de:

- justifier le fait de négliger l'effet du diamètre de la broche pour le calcul du module d'"embedding" (ceci sera confirmé par le modèle 2D analytique proposé au §8.5.1);
- de valider expérimentalement la formule (8.1).

En conclusion, le comportement élastique de la composante d'"embedding", pour un angle quelconque par rapport aux fibres, peut être étudié par l'intermédiaire des deux composantes orthogonales  $k_0$  et  $k_{90}$  (Figure 8-7). Dès que les modules d'"embedding"  $k_0$  et  $k_{90}$  sont connus, le module correspondant à une inclinaison intermédiaire ( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ ) peut être évalué sur base de la formule (8.1).

## 8.4 Travaux à caractère numérique

L'analyse pour l'identification des composantes au §7.3.1.2.2 a conduit à montrer que le comportement 3D "broche-bois" peut être assimilé au couplage de deux comportements 2D dans deux plans perpendiculaires: l'un perpendiculaire à l'axe de la broche et l'autre parallèle à l'axe de la broche. Deux composantes sont identifiées: la composante "broche" et la composante d'"embedding". La composante "broche" travaille souvent en régime élastique, tandis que la composante d'"embedding" est le siège de non linéarité lorsque les efforts appliqués augmentent. L'allure non linéaire du comportement 3D "broche-bois" provient donc souvent

du caractère non linéaire de la composante d'"embedding". Cette remarque sera confirmée plus tard par les simulations numériques. Le "couplage" en deux plans perpendiculaires et la connaissance du comportement des deux composantes permettent de reconstruire le comportement 3D "broche-bois" des éprouvettes.

### 8.4.1 Modèle 2D dans le plan perpendiculaire à l'axe de la broche

Ce modèle permet de relever numériquement le comportement de la composante d'"embedding".

#### 8.4.1.1 Modélisation

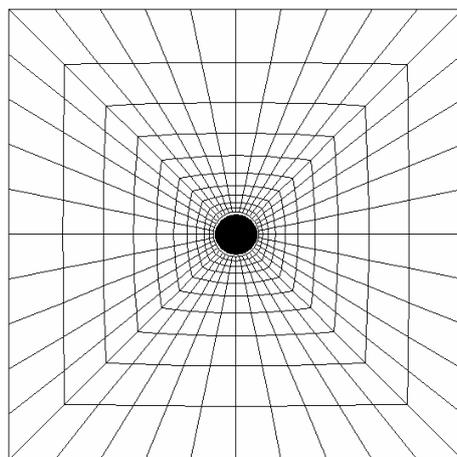


Figure 8-16 Modèle 2D numérique de la composante d'"embedding".

Le modèle 2D utilisé reprend les mêmes dimensions que celles des éprouvettes d'essais de portance locale. Le problème est traité en état plan de contraintes. Une couche de 400 éléments volumiques est utilisée pour représenter une couche d'épaisseur de l'éprouvette; une fondation rigide permet de simuler l'action de la broche en acier (Figure 8-16). Ce niveau de maillage est suffisamment fin pour obtenir de bons résultats.

Le problème de contact entre la broche et le bois est aussi modélisé dans ce modèle numérique.

#### 8.4.1.2 Loi de matériau

Etant donné que, dans un premier temps, les essais de caractérisation de matériau initialement prévus dans le cadre du projet  $K_{ser}$  [CTI-2004] n'ont pas pu être réalisés, des hypothèses ont dû être formulées et ce, sur base des indications fournies par le document européen [EN338] qui, pour le BLC résineux classé GL28h (bois lamelle classé C27), propose des valeurs (Tableau 8-1, ligne "EC5") qui ont été utilisées pour les simulations numériques préliminaires. Ces dernières ont contribué significativement à la définition du programme expérimental (voir §8.2).

	masse volum. KG/m <sup>3</sup>	E0 N/mm <sup>2</sup>	E90 N/mm <sup>2</sup>	G(*) N/mm <sup>2</sup>	ft,0,moy N/mm <sup>2</sup>	fc,0 N/mm <sup>2</sup>	ft,90,moy N/mm <sup>2</sup>	fc,90 N/mm <sup>2</sup>	fx <sub>y</sub> (**) N/mm <sup>2</sup>
<b>pm,D10,0</b>	474.67	11331.35	382.76	736.54	20.33	37.95	1.08	3.77	3.56
<b>pm,D16,0</b>	437.21	9509.90	289.50	618.14	20.33	34.00	1.08	3.07	3.56
<b>pm,D20,0</b>	452.81	10268.43	328.34	667.45	20.33	35.64	1.08	3.36	3.56
<b>pm,D10,90</b>	478.63	11523.91	392.62	749.05	20.33	38.36	1.08	3.85	3.56
<b>pm,D16,90</b>	449.67	10115.75	320.52	657.52	20.33	35.31	1.08	3.30	3.56
<b>pm,D20,90</b>	442.60	9771.98	302.92	635.18	20.33	34.57	1.08	3.17	3.56
<b>EC5</b>	GL28(C27)	12000.00	400.00	750.00	16.00	22.00	0.40	5.60	3.00

Tableau 8-1 Caractéristiques mécaniques de matériau des éprouvettes de portance locale; d'après [EN1194]: (\*)  $G=0.065 \cdot E_0$ ; (\*\*)  $f_{xy}=0.32 \cdot f_{t,0}^{0.8}$ .

En fournissant du BLC appartenant à une classe de résistance donnée, le fabricant de bois s'engage à livrer un matériau répondant à des critères minimaux en terme de résistance et de rigidité, mais ne donne aucune indication quant aux performances réelles du matériau. Lorsque l'on veut confronter des simulations numériques au comportement physique réel, il y a lieu d'introduire des données proches de la réalité, affranchies au maximum de toute source d'erreur. Des essais sur le matériau ont donc été menés à l'Université de Liège [LY-2004]; ils sont traités au §3.4.3. Des formules statistiques de détermination des caractéristiques mécaniques relevées en relation avec la masse volumique du bois permettent d'estimer les valeurs des caractéristiques mécaniques des éprouvettes.

Les éprouvettes destinées à un type d'essai sont généralement issues d'un même lot de bois. Leurs poids propres sont donc souvent très voisins. Nous prenons donc les valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques des éprouvettes, calculées à partir de la valeur moyenne des masses volumiques des éprouvettes. Seuls les paramètres mécaniques principaux ( $E_0$ ,  $E_{90}$ ,  $f_{c,0}$ ,  $f_{c,90}$ ,  $f_{t,0}$ ,  $f_{t,90}$ ) sont déterminés directement par les essais; les autres, moins importants, sont déduits via les formules proposées par l'EC5 (Tableau 8-1).

Dans le Tableau 8-1,  $p_{m,D10,0}$ ,  $p_{m,D16,0}$ ,  $p_{m,D20,0}$ ,  $p_{m,D10,90}$ ,  $p_{m,D16,90}$ ,  $p_{m,D20,90}$  sont respectivement les valeurs moyennes (indice "m") des poids propres des éprouvettes pour différents diamètres (indice "D") de broche (10mm, 16mm, 20mm) et avec des angles de compression des fibres à 0° et 90°.

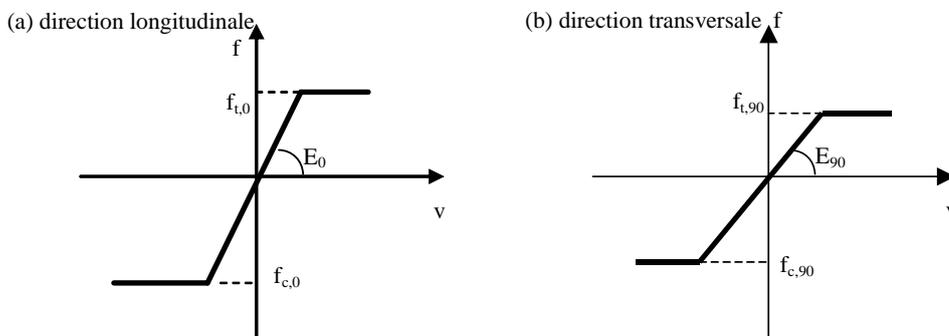


Figure 8-17 Hypothèse sur la loi du comportement du bois dans les deux directions, longitudinale et transversale.

Par ailleurs – et faute de mieux - le bois est supposé posséder un comportement élastique parfaitement plastique dans les deux directions, longitudinale et transversale, Figure 8-17.

### 8.4.1.3 Critère de plasticité anisotrope de HILL

Dans la modélisation du matériau bois, la plupart des auteurs utilisent le critère de Tsai-Wu [TSA-1971] pour une description de la plasticité anisotrope. Pour un matériau anisotrope à la fois dans le domaine élastique et plastique comme le bois, le critère Tsai-Wu complet permet de décrire assez correctement le comportement mécanique du bois. Cependant, il exige la détermination de beaucoup de paramètres pour une description du matériau: 12 coefficients au moins pour une description 3D complète.

L'objectif de la thèse vise plutôt à la prédiction de la rigidité de la composante d'"embedding". La description du matériau bois est alors moins exigeante. Elle peut comporter moins de paramètres mais doit couvrir correctement la phase élastique du bois. C'est pour cette raison que le critère Hill "décalé", plus simple d'utilisation, a été choisi.

La description du critère Hill "décalé" pour une surface de plasticité est définie comme suit:

$$F = \frac{1}{2}(\underline{\sigma}' - \underline{X}) : \underline{H} : (\underline{\sigma}' - \underline{X}) - \sigma_F^2 = 0 \quad (8.2)$$

Avec:

- $\underline{\sigma}'$  et  $\underline{X}$ , tenseurs de 2<sup>me</sup> ordre, sont respectivement le déviateur du tenseur des contraintes de Cauchy et le "back stress" qui définit le centre et l'évolution de la surface de plasticité;
- $\underline{H}$ , tenseur de 4<sup>me</sup> ordre, caractérise le matériau anisotrope;
- $\sigma_F$  est un scalaire définissant la taille de la surface de plasticité Hill. Sa valeur dépend de l'état d'écroutissage du matériau.

Dans la programmation aux éléments finis, les tenseurs  $\underline{\sigma}'$ ,  $\underline{X}$  et  $\underline{H}$  de la formule (8.2) peuvent être réécrits sous la forme de matrices, comme suit:

$$F = \frac{1}{2}(\sigma' - X)^T [H](\sigma' - X) - \sigma_F^2 = 0 \quad (8.3)$$

La matrice  $[H]$  contient les 6 constantes  $F$ ,  $G$ ,  $H$ ,  $N$ ,  $L$  et  $M$ . Vu que l'écroutissage n'est pas considéré pour le matériau étudié (Figure 8-17), ces paramètres sont constants ( $[\dot{H}] = 0$ ).

$$[H] = \begin{pmatrix} G+H & -H & -G & 0 & 0 & 0 \\ -H & H+G & -F & 0 & 0 & 0 \\ -G & -F & F+G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2N & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2M \end{pmatrix} \quad (8.4)$$

Le vecteur de contrainte  $\sigma'$  contient 6 composantes (formule (8.5)). Les axes X, Y, Z sont les axes d'orthotropie du matériau. Dans le cas du BLC, ce sont donc respectivement la direction des fibres, la direction perpendiculaire aux fibres et la direction selon l'épaisseur.

$$\sigma' = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{pmatrix} \quad (8.5)$$

Le vecteur "back stress"  $X$  contient aussi six composantes (formule (8.6)). Pour le modèle numérique étudié en état plan de contraintes,  $\sigma_{0zz}$ ,  $\sigma_{0xz}$  et  $\sigma_{0yz}$  sont évidemment nuls. Vu que l'effet de cisaillement a peu d'influence sur le comportement élastique de la composante d'"embedding" (§8.2.3),  $\sigma_{0xy}$  peut également être considéré comme nul. Il ne reste donc que 2 termes,  $\sigma_{0xx}$ ,  $\sigma_{0yy}$ , qui sont des constantes ( $\dot{X} = 0$ ).

$$X = \begin{pmatrix} \sigma_{0xx} \\ \sigma_{0yy} \\ \sigma_{0zz} \\ \sigma_{0xy} \\ \sigma_{0xz} \\ \sigma_{0yz} \end{pmatrix} \quad (8.6)$$

Le BLC étant ici supposé avoir un comportement élastique parfaitement plastique,  $\sigma_F$  est donc une constante ( $\dot{\sigma}_F = 0$ ).

En résumé, la surface d'élasticité du modèle numérique (état plan de contraintes) peut être exprimée de façon simplifiée, comme suit:

$$F = \frac{1}{2}(H+G)(\sigma_{xx} - \sigma_{0xx})^2 + \frac{1}{2}(H+F)(\sigma_{yy} - \sigma_{0yy})^2 - H(\sigma_{xx} - \sigma_{0xx})(\sigma_{yy} - \sigma_{0yy}) + N\sigma_{xy}^2 - \sigma_F^2 \quad (8.7)$$

Puisqu'une description d'anisotropie 2D à la fois pour l'élasticité et pour la plasticité de matériau n'est pas disponible dans le code Lagamine, une modélisation 3D a dû être utilisée à la place. Les paramètres supplémentaires de matériau pour la troisième dimension (axe Z) ont été pris égaux à ceux relatifs à la deuxième dimension (axe Y).

Si  $\sigma_F$  est calibré d'après  $\sigma_{xx}$  ( $\sigma_F = \sigma_{xx} - \sigma_{0xx}$ ),  $H+G$  doit être égal à 2. Donc,  $H = G = 1$ , car  $H$  et  $G$  sont des paramètres équivalents respectivement pour les axes Y et Z. Les 4 constantes  $F$ ,  $\sigma_{0xx}$ ,  $\sigma_{0yy}$  et  $\sigma_F$  peuvent être identifiées par 4 points de plasticité uni-axiaux,  $f_{c,0}$ ,  $f_{c,90}$ ,  $f_{t,0}$ ,  $f_{t,90}$ . La Figure 8-18 montre un exemple de surface de plasticité de Hill "décalé" qui couvre les quatre points de plasticité uni-axiaux.

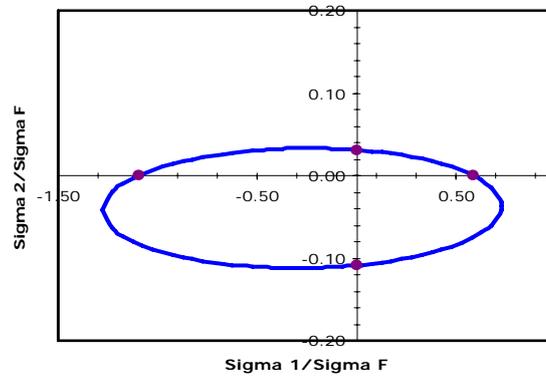


Figure 8-18 Critère de plasticité HILL "décalé" pour le modèle numérique.

#### 8.4.1.4 Allure bilinéaire du comportement 2D de la composante d'"embedding" dans le plan perpendiculaire à l'axe de la broche

Le comportement 2D de la composante d'"embedding" dans le plan perpendiculaire à l'axe de la broche reproduit à la Figure 8-19 a été obtenu numériquement grâce au modèle 2D de la Figure 8-16. Les observations sur les courbes numériques permettent de conclure qu'il s'agit d'un type de comportement bilinéaire. Ceci est aussi observé sur les courbes expérimentales obtenues via les essais.

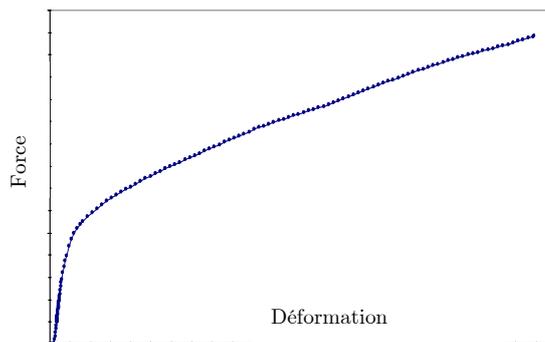


Figure 8-19 Allure bilinéaire du comportement 2D de la composante d'"embedding".

#### 8.4.2 Modèle 2D dans le plan parallèle à l'axe de la broche - comportement "broche-bois"

Ce modèle permet de reconstruire numériquement le comportement "broche-bois" des éprouvettes relevé lors des essais de portance locale.

### 8.4.2.1 Modélisation

La modélisation aux éléments finis retenue est illustrée à la Figure 8-20: les couches d'épaisseur de bois, soumises à l'effet d'"embedding", sont représentées par des ressorts qui agissent comme une fondation pour la broche en flexion et cisaillement qui, elle, est représentée par des éléments "poutres".

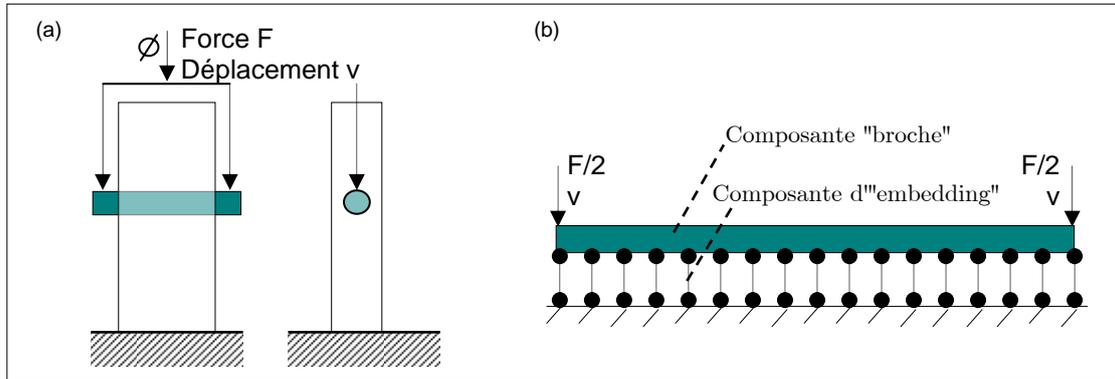


Figure 8-20 (a) Schéma de calcul de l'essai de portance locale; (b) Modèle 2D numérique du comportement "broche-bois".

### 8.4.2.2 Intégration du comportement des composantes

- Composante d'"embedding":

Le comportement de la composante d'"embedding" est obtenu numériquement via le modèle 2D numérique de la Figure 8-16.

- Composante "broche":

La composante "broche" en acier est modélisée par des éléments de type poutre constitués d'un matériau idéalisé élastique-parfaitement plastique:  $E_a = 0.21 \cdot 10^6 \text{ N/mm}^2$  et  $f_y = 500 \text{ N/mm}^2$ . La limite élastique  $f_y$  peut un peu différer de la réalité, mais une valeur moyenne est satisfaisante, car elle n'influence pas beaucoup le comportement "broche-bois". En effet, sous un chargement quelconque, le bois travaille en général en régime élasto-plastique, tandis que la broche reste souvent en régime élastique.

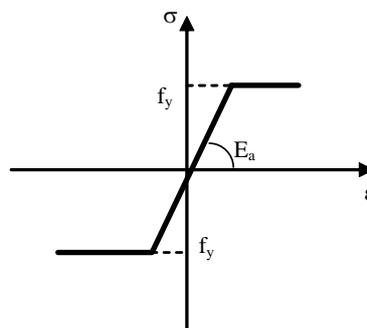


Figure 8-21 Matériau élastique parfaitement plastique pour la composante broche.

De plus, l'objectif de la thèse est limité à l'étude du comportement élastique des assemblages.

### 8.4.2.3 Estimation de la déformation due aux efforts tranchants

Sur base de la connaissance de la composante d'"embedding" du bois étudié et de la composante "broche", le modèle de calcul de la Figure 8-20b permet d'évaluer le déplacement aux deux extrémités de la broche.

Comme la broche étudiée est apparemment courte (longueur au maximum égale à 4 fois son diamètre pour les éprouvettes de portance locale), il est impératif d'estimer l'importance de la déformation due à l'effort tranchant. La contribution de la déformation due à l'effort tranchant à la déformation totale est traduite par le dernier terme de l'équation différentielle ci-dessous:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{M}{E_a I_a} + \frac{1}{G_a A'} \frac{d^2M}{dx^2} \quad (8.8)$$

Des simulations numériques dont le but était d'estimer l'importance de la déformation due à l'effort tranchant ont été réalisées avec une broche de diamètre D20 (20 mm) et de longueur 4D (80 mm), appuyée sur une fondation élastique de rigidité de 375 N/mm.mm (valeur moyenne du module d'"embedding" obtenue à partir des essais). Les résultats sont retranscrits dans le Tableau 8-2 qui donne le rapport entre la force appliquée et le déplacement aux deux extrémités de la broche (une forme de rigidité, N/mm). Ces résultats permettent de conclure que la déformation due aux efforts tranchants est négligeable par rapport à celle due à la flexion, entre 0.6% (Finelg<sup>(1)</sup>) et 0.8%(Ossa2D<sup>(2)</sup>).

FINELG		OSSA2D	
pris en compte de la déformation due aux efforts tranchants			
Oui	Non	Oui	Non
27707.19	27883.56	28598.66	28846.15

Tableau 8-2 Valeurs de rigidité d'"embedding" - importance négligeable de la déformation de la broche à l'effort tranchant.

<sup>(1)</sup>FINELG est un programme non linéaire aux éléments finis développé à l'Université de Liège (Département M&S). Il permet de réaliser les analyses non linéaires des structures composées d'éléments poutres, plaques ou coques pour des problèmes statiques, de stabilité, ou dynamiques.

<sup>(2)</sup>OSSA2D est un programme développé à l'Université de Liège (Département M&S). Il permet de réaliser des analyses des structures planes au premier ordre et au second ordre.

Le nombre des simulations mentionnées ci-dessus n'est pas suffisant pour couvrir toutes les configurations possibles "broche-bois" et prouver le caractère négligeable de la déformation en cisaillement des broches. Cependant, elles confirment les observations faites lors d'essais selon lesquelles la broche se déforme principalement en flexion. De plus, les résultats numériques obtenus sans prise en compte de la déformation en cisaillement des broches se montrent assez proches de ceux résultant des essais expérimentaux (voir §8.6).

Dès lors, la déformation en cisaillement des broches ne sera pas prise en compte dans les modèles numériques et analytiques.

### 8.4.3 Traitement des simulations numériques

En combinant la composante d'"embedding", dont les caractéristiques de comportement sont issus du modèle 2D de la Figure 8-16, et la composante "broche" qui résulte de l'utilisation du modèle 2D de la Figure 8-20, la réponse "broche-bois" des éprouvettes d'"embedding" peut être prédite numériquement. Ceci permet ensuite de comparer les courbes de comportement "broche-bois" d'origine numérique et les courbes de comportement "broche-bois" expérimentales relevées lors des essais de portance locale et, le cas échéant, de valider les modèles numériques proposés.

Il a été démontré que la rigidité de la composante d'"embedding" dépend de l'angle d'inclinaison des fibres du bois et que cette rigidité peut être définie sur base de la connaissance préalable des rigidités à  $0^\circ$  et à  $90^\circ$  (formule(8.1)). C'est pour cette raison que seuls les essais de portance locale de types  $\alpha = 0^\circ$  et  $\alpha = 90^\circ$  seront traités pour la validation des modèles numériques.

## 8.5 Travaux à caractère analytique

Tout comme pour les travaux à caractère numérique, le comportement 3D "broche-bois" dû à l'effet d'"embedding" peut être étudié au travers du couplage de deux comportements 2D, dans deux plans perpendiculaires.

### 8.5.1 Modèle 2D dans le plan perpendiculaire à l'axe de la broche

Dans ce plan, la broche est supposée être infiniment rigide. La barre s'enfonce dans le matériau bois, fortement anisotrope, ce qui entraîne une déformation locale dite d'"embedding". La courbe qui met en relation la force appliquée et l'enfoncement de la broche met en évidence le comportement de la **composante bois à l'"embedding"**. Un modèle analytique pour la prédiction du comportement élastique de la composante d'"embedding" a été développé dans le cadre de la présente recherche; il est décrit à l'**Annexe A**.

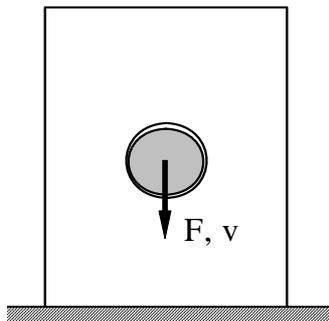


Figure 8-22 Modèle 2D analytique de la composante d'"embedding".

Grâce à ce modèle, la rigidité de la composante d'"embedding" pour  $0^\circ$  et  $90^\circ$  (angles de compression des fibres) peut être estimée en fonction des caractéristiques mécaniques du bois:

$$k_{i(90^\circ)} = F(E_1, E_2, \nu_{12}, G_{12}) \quad (8.9)$$

Le diamètre de la broche n'est pas présent dans la formule, ce qui démontre de nouveau son absence d'influence sur le comportement élastique de la composante d'"embedding". Cette remarque a déjà formulée à l'occasion de l'analyse des résultats expérimentaux, au §8.3.4.

Lorsque  $k_{0^\circ}$  et  $k_{90^\circ}$  sont connues, la rigidité  $k_\alpha$  de la composante d'"embedding" pour un angle de compression des fibres  $\alpha$  peut être obtenue par la formule (8.1).

## 8.5.2 Sensibilité de la rigidité d'"embedding" à la variation des propriétés mécaniques du matériau

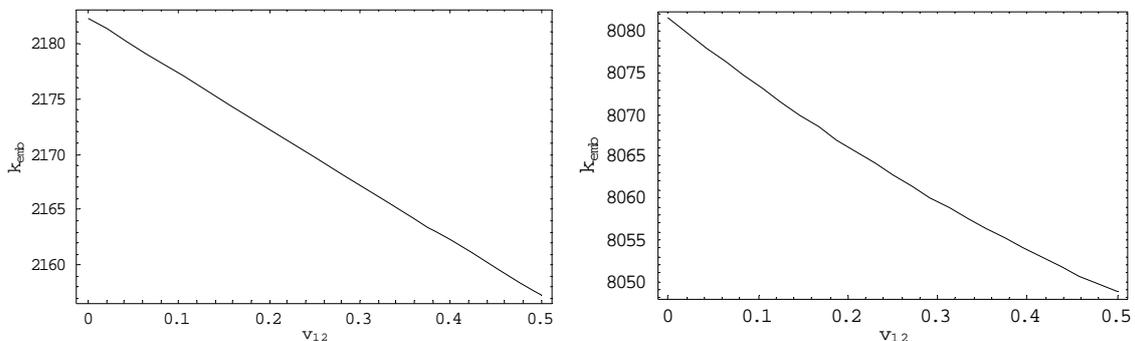
Cette étude a été menée avant la réalisation des mesures des propriétés mécaniques réelles du matériau. Les valeurs recommandées par l'EC5 ont donc été utilisées pour  $E_1$  et  $E_2$  (Tableau 8-1). Mais elles sont suffisantes pour montrer analytiquement l'influence négligeable du coefficient de Poisson  $\nu_{12}$  et du module de cisaillement  $G_{12}$  sur la rigidité d'"embedding", confirmant ainsi ce qui a déjà été constaté avec les simulations numériques au §8.2.

### 8.5.2.1 Influence du coefficient de Poisson ( $\nu_{12}$ )

Les graphiques de la Figure 8-23 mettent en évidence l'influence du coefficient de Poisson  $\nu_{12}$  ( $\nu_{12}$  entre 0 et 0.5 ou bien  $\nu_{21}$  entre 0 et 0.017) sur le module d'"embedding"  $k_{emb}$ . Les diagrammes d'évolution sont tracés pour deux valeurs du module de cisaillement  $G_{12}$  jugées extrêmes, soit  $G_{min} = 150 \text{ N/mm}^2$  et  $G_{max} = 4000 \text{ N/mm}^2$  et ce, pour deux valeurs de l'angle d'inclinaison des fibres du bois par rapport à la force appliquée ( $\alpha = 0^\circ$  et  $90^\circ$ ).

En dépit de la variation importante de  $\nu_{12}$ , la variation de la rigidité d'"embedding" reste négligeable.

#### Angle d'inclinaison des fibres égal à $0^\circ$



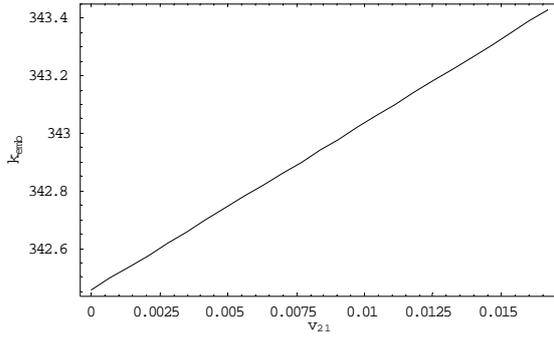
$$0^\circ - E_1 = 12000, E_2 = 400, G_{min} = 150$$

$$a. G_{min} = 150 \text{ N/mm}^2$$

$$0^\circ - E_1 = 12000, E_2 = 400, G_{max} = 4000$$

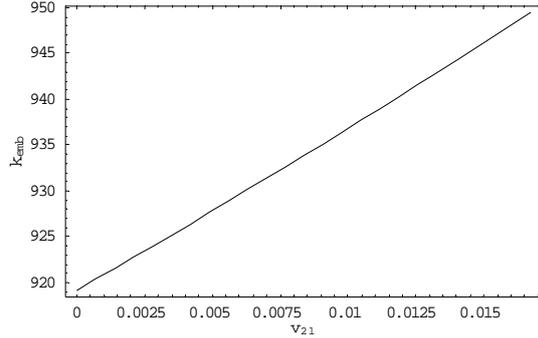
$$b. G_{max} = 4000 \text{ N/mm}^2$$

Angle d'inclinaison des fibres égal à 90°



$90^\circ - E_1 = 12000, E_2 = 400, G_{min} = 150$

**c.  $G_{min} = 150 \text{ N/mm}^2$**



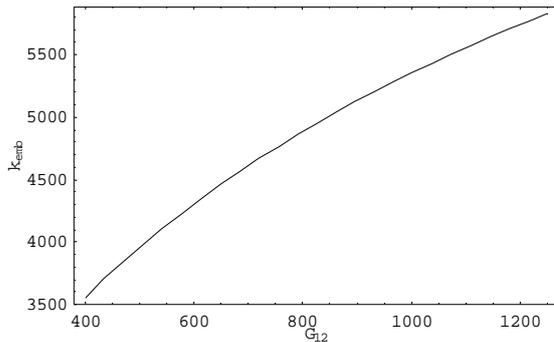
$90^\circ - E_1 = 12000, E_2 = 400, G_{max} = 4000$

**d.  $G_{max} = 4000 \text{ N/mm}^2$**

Figure 8-23 Influence du coefficient de Poisson sur le module d'"embedding"

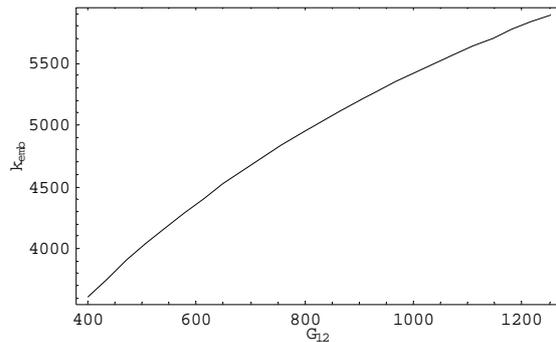
8.5.2.2 Influence du module de cisaillement ( $G_{12}$ )

Angle d'inclinaison des fibres égal à 0°



$0^\circ - E_1 = 12000, E_2 = 400, v_{12} = 0.5$

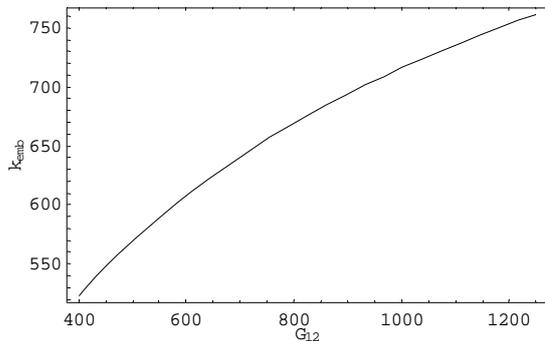
**a.  $v_{max} = 0,5$**



$0^\circ - E_1 = 12000, E_2 = 400, v_{12} = 0$

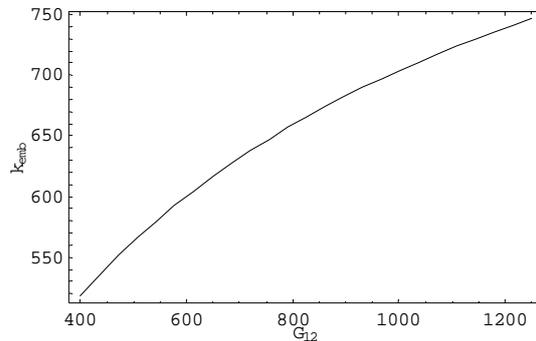
**b.  $v_{min} = 0$**

Angle d'inclinaison des fibres égal à 90°



$90^\circ - E_1 = 12000, E_2 = 400, v_{21} = 0.0167$

**c.  $v_{max} = 0,0.0167$**



$90^\circ - E_1 = 12000, E_2 = 400, v_{21} = 0$

**d.  $v_{min} = 0$**

Figure 8-24 Influence du module de cisaillement sur le module d'"embedding".

Les graphiques de la Figure 8-24 illustrent l'influence du module de cisaillement  $G_{12}$  sur le module d'"embedding". Dans ce cas, deux valeurs extrêmes du coefficient  $\nu_{12}$  sont choisies:  $\nu_{min} = 0$  et  $\nu_{max} = 0,5$  ( $\nu_{21}$  entre 0 et 0.017). Le domaine de variation de  $G_{12}$  va de 400 N/mm<sup>2</sup> à 1250 N/mm<sup>2</sup>, conformément à l'EC5.

L'influence de  $G_{12}$  sur le module d'"embedding"  $k_{emb}$  peut être prédite via la formule (8.10) ( $k'_{emb}$  est la dérivée de  $k_{emb}$ , qui est une fonction de  $G_{12}$ ). Une erreur de 10% sur la valeur  $G_{12}$  entraîne une erreur de 5% (4%) sur la valeur de  $k_{emb}$  pour un angle d'inclinaison de la compression par rapport aux fibres 0° (90°).

$$\Delta = \frac{1}{1 + \frac{k'_{emb} \Delta G_{12}}{k_{emb}}} \quad (8.10)$$

Comme pour le coefficient du Poisson, l'effet d'une variation du module de cisaillement sur la valeur du module d'"embedding" est négligeable.

### 8.5.2.3 Conclusions

En conclusion de cette étude de sensibilité, il s'avère que la détermination précise des propriétés mécaniques  $\nu_{12}$  et  $G_{12}$  du bois constituant les éprouvettes de laboratoire n'est pas nécessaire vu que leur influence sur la rigidité d'"embedding" est relativement négligeable.

De même, dans le cadre du développement d'une approche analytique, il suffira de considérer une valeur raisonnable, fournie dans l'EC5, pour la caractérisation de ces deux paramètres.

### 8.5.3 Modèle 2D dans le plan parallèle à l'axe de la broche - comportement "broche-bois"

En fait, la broche n'est pas infiniment rigide et, sur sa longueur (Figure 8-25), elle se déforme tout en s'appuyant sur une fondation élastique caractérisé par la rigidité de la composante d'"embedding".

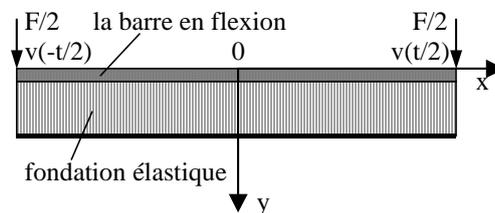


Figure 8-25 Modèle 2D analytique du comportement "broche-bois".

#### 8.5.3.1 Lois du comportement

Dans le cadre de la thèse, seule l'évaluation de la rigidité initiale de l'assemblage est considérée. Des lois de comportement linéaire sont dès lors adoptées pour le bois et pour la broche

en acier. La Figure 8-26a illustre le comportement linéaire du bois en compression (module d'"embedding"  $k$ ) et la Figure 8-26b, le comportement linéaire de l'acier (module de Young  $E_a$ ).

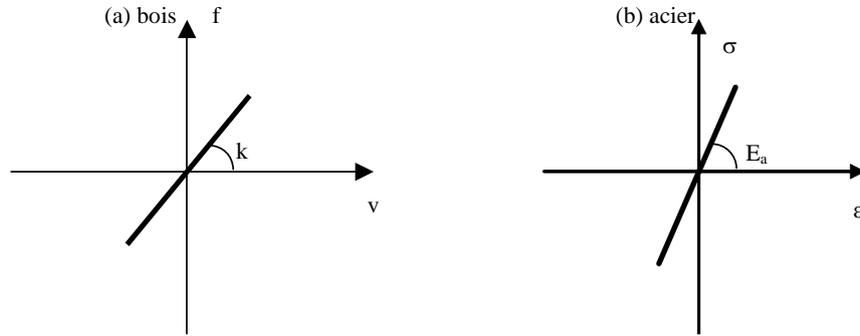


Figure 8-26 (a) Loi de comportement linéaire de la composante d'"embedding"; (b) Loi de comportement linéaire de l'acier.

### 8.5.3.2 Formule analytique pour une poutre en flexion

La déformation due aux efforts tranchants étant négligeable, le terme concernant le cisaillement relatif dans la formule (8.8) peut être supprimé. On obtient donc une équation différentielle simplifiée pour la déformation de la broche:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{M}{E_a I_a} \quad (8.11)$$

Vu que la broche s'appuie sur la fondation élastique dont la rigidité est celle d'"embedding" ( $k$ ), l'équation différentielle exprimant la relation entre le tassement de la fondation et les sollicitations peut être écrite sous la forme:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{d^2M}{dx^2} = vk \quad (8.12)$$

De (8.11) et (8.12), on déduit donc:

$$\frac{d^4M}{dx^4} = -k \frac{M}{E_a I_a} \quad (8.13)$$

Si l'on pose:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4E_a I_a}} \quad (8.14)$$

La racine de l'équation (8.13) s'exprime sous la forme générale:

$$M(x) = A \cos \beta x \cosh \beta x + B \sin \beta x \sinh \beta x + C \cos \beta x \sinh \beta x + D \sin \beta x \cosh \beta x \quad (8.15)$$

Grâce à la symétrie du modèle,  $M(x) = M(-x)$ :

$$C = 0; D = 0 \quad (8.16)$$

Et donc:

$$M(x) = A \cos \beta x \cosh \beta x + B \sin \beta x \sinh \beta x \quad (8.17)$$

$$T(x) = \beta(B - A) \sin \beta x \cosh \beta x + \beta(B + A) \cos \beta x \sinh \beta x \quad (8.18)$$

$$v(x) = \frac{2\beta^2}{k} (B \cos \beta x \cosh \beta x - A \sin \beta x \sinh \beta x) \quad (8.19)$$

Les moments, efforts tranchants et déformations de la broche peuvent être déduits des formules (8.17), (8.18) et (8.19). Les deux paramètres A et B, quant à eux, sont définis en exprimant les deux conditions de bord suivantes (au bout de la broche, le moment s'annule et l'effort tranchant est en équilibre avec la charge appliquée):

$$\left. \begin{aligned} M\left(\frac{t}{2}\right) &= 0 \\ T\left(\frac{t}{2}\right) &= \frac{F}{2} \end{aligned} \right\} \quad (8.20)$$

Soit:

$$A = -B \tan \frac{\beta t}{2} \tanh \frac{\beta t}{2} \quad (8.21)$$

La force appliquée, F, vaut dès lors:

$$F = 2\beta B \cos \frac{\beta t}{2} \sinh \frac{\beta t}{2} \left[ \left(1 + \tan \frac{\beta t}{2} \tanh \frac{\beta t}{2}\right) \frac{\tan \frac{\beta t}{2}}{\tanh \frac{\beta t}{2}} + \left(1 - \tan \frac{\beta t}{2} \tanh \frac{\beta t}{2}\right) \right] \quad (8.22)$$

Le déplacement au bout de la barre,  $v_0$ , est égal à:

$$v_0 = \frac{2\beta^2}{k} B \cos \frac{\beta t}{2} \cosh \frac{\beta t}{2} \left(1 + \tan^2 \frac{\beta t}{2} \tanh^2 \frac{\beta t}{2}\right) \quad (8.23)$$

Le rapport entre la force appliquée et le déplacement au bout de la barre,  $K_0$ , s'exprime:

$$\frac{F}{v_0} = \frac{kt \tanh \xi \left[ \left(1 + \tan \xi \tanh \xi\right) \frac{\tan \xi}{\tanh \xi} + 1 - \tan \xi \tanh \xi \right]}{2\xi \left(1 + \tan^2 \xi \tanh^2 \xi\right)} \quad (8.24)$$

Si on définit:

$$k_0 = \frac{F}{tv_0} = \frac{K_0}{t} \quad (8.25)$$

$$\xi = \frac{\beta t}{2} = \frac{t}{2} \sqrt[4]{\frac{k}{4E_a J_a}} \quad (8.26)$$

$$\xi_0 = \frac{\beta_0 t}{2} = \frac{t}{2} \sqrt[4]{\frac{k_0}{4E_a I_a}} \quad (8.27)$$

$$\frac{\xi_0^4}{\xi^4} = \frac{k_0}{k} \quad (8.28)$$

on obtient:

$$\frac{k_0}{k} = \frac{\tanh \xi [(1 + \tan \xi \tanh \xi) \frac{\tan \xi}{\tanh \xi} + 1 - \tan \xi \tanh \xi]}{2\xi(1 + \tan^2 \xi \tanh^2 \xi)} \quad (8.29)$$

ou encore:

$$\xi_0^4 = \frac{\xi^3 \tanh \xi [(1 + \tan \xi \tanh \xi) \frac{\tan \xi}{\tanh \xi} + 1 - \tan \xi \tanh \xi]}{2(1 + \tan^2 \xi \tanh^2 \xi)} \quad (8.30)$$

Le déplacement aux deux bouts d'une broche peut donc être calculé par la formule (8.24) et être comparé aux valeurs expérimentales et numériques en vue de la validation des modèles analytiques au §8.6.

Il est à noter que dans les tests expérimentaux, on ne peut que mesurer les valeurs de la force appliquée et les déplacements aux deux bouts de la broche  $v_b$ . Si on suppose que la barre est infiniment rigide ou que la flexibilité de la barre est négligeable, le module d'"embedding" du bois soit calculé selon la formule (8.25). En réalité,  $k_0$  reflète la rigidité du comportement "broche-bois" de l'éprouvette. La rigidité de la composante d'"embedding"  $k$  peut être estimée au travers de  $k_0$  grâce à une correction présentée à la formule (8.29). C'est cette dernière qui, utilisée à l'envers, permis de déduire les valeurs expérimentales  $k_\alpha$  à la Figure 8-15, au §8.3.4.

## 8.6 Validation des modèles numérique et analytique

Dans les travaux de validation présentés ci-après, les courbes auxquelles nous nous référons expriment la relation entre la force appliquée et le déplacement aux extrémités de la broche.

Les modèles 2D proposés aux paragraphes précédents permettent bien de reconstruire le comportement 3D "broche-bois" des éprouvettes en "embedding", respectivement par voies numérique et analytique. En effet, par voie numérique, l'introduction du comportement complet de la composante d'"embedding" (modèle 2D numérique de la Figure 8-16) et de la composante "broche" (Figure 8-21) dans le modèle 2D numérique de la Figure 8-20b permet d'obtenir numériquement le comportement complet de l'éprouvette de portance locale. Quant à la voie analytique, l'introduction du comportement élastique de la composante d'"embedding" (modèle 2D analytique de la Figure 8-22) et de la composante "broche" dans de modèle 2D analytique de la Figure 8-25 permet d'obtenir analytiquement le comportement élastique de l'éprouvette de portance locale.

Vu que le comportement "broche-bois" est constitué de deux composantes constitutives: composante "broche" et composante d'"embedding" et que son allure non linéaire provient du caractère non linéaire de la composante d'"embedding", il doit avoir aussi 5 phases de comportement (Figure 8-27).

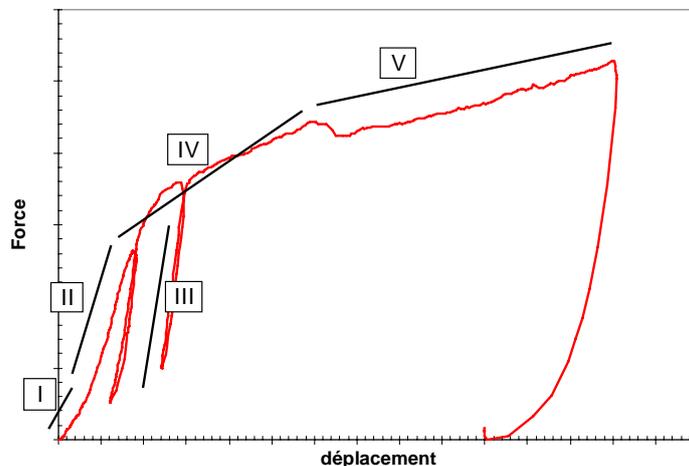


Figure 8-27 Phases caractéristiques du comportement "broche-bois": phase I (mise en place), phase II (1<sup>er</sup> chargement), phase III (déchargement-rechargement), phase IV (élasto-plastique), phase V (amorces de ruine).

Dans les faits, le bois sera soumis souvent au déchargement-rechargement, ce qui correspond à la phase III de la courbe de comportement. C'est dans cette phase que la rigidité "élastique" des éprouvettes doit être mesurée et comparée à celle des modèles proposés. Pour le modèle numérique, quant à ses résultats non linéaires, ces derniers seront vérifiés par l'ensemble des phases III, IV et V des courbes expérimentales.

### 8.6.1 Comparaison des résultats obtenus par les modèles numérique et analytique avec ceux obtenus expérimentalement au CITB

Dans les diagrammes comparatifs présentés de §8.6.1.1 à §8.6.1.3, quatre types de courbe peuvent être distingués:

- les courbes expérimentales obtenues via les essais de portance locale réalisés à CTIB sont notées "emb-i, i=1, 2, 3...";
- la courbe "simu-Old" présente le comportement complet "broche-bois" obtenu par voie numérique, avec les caractéristiques mécaniques issues de l'EC5 pour le bois étudié (Tableau 8-1);
- la courbe "simu-New" présente le comportement complet "broche-bois" obtenu par voie numérique, avec les vraies caractéristiques mécaniques du bois étudié (Tableau 8-1);
- la courbe "Ana" présente le comportement élastique "broche-bois" obtenu par voie analytique, avec les vraies caractéristiques mécaniques du bois étudié (comme pour la "simu-New").

### 8.6.1.1 Eprouvettes de diamètre D10

- Interaction entre broche d'acier et composante d'"embedding" à  $90^\circ$

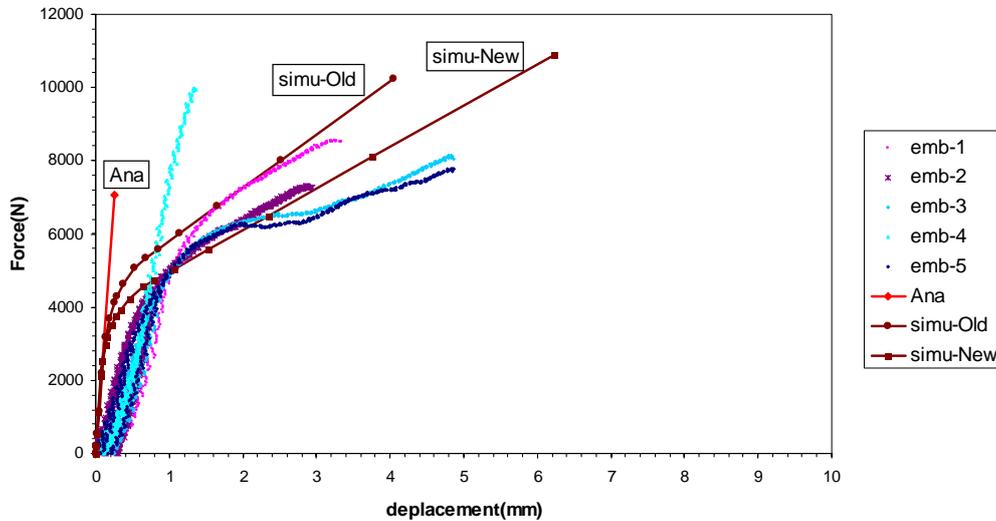


Figure 8-28 Courbes de comportement "broche-bois" obtenues expérimentalement, numériquement et analytiquement; éprouvettes "diamètre D10 - angle de compression des fibres  $90^\circ$ ".

La Figure 8-28 couvre les éprouvettes "diamètre D10 – angle de compression des fibres  $90^\circ$ ". Les rigidités élastiques évaluées numériquement et analytiquement sont en bon accord. Les courbes numériques ("simu-Old" et "simu-New") représentent assez bien l'allure du comportement "broche-bois". Elles ne diffèrent qu'à partir de la partie post-élastique. Cela résulte des lois de matériau adoptées pour le bois dans les simulations numériques de la composante d'"embedding": les valeurs correspondantes pour les modules élastiques utilisées dans deux simulations sont assez proches (donc pas de grande différence de rigidité entre deux courbes), tandis que les valeurs correspondantes pour les limites élastiques utilisées dans ces simulations sont très différentes (donc une divergence observée pour la partie post-élastique entre deux courbes).

En dépit du bon accord entre les résultats analytique et numérique, la cohérence de ceux-ci avec les essais expérimentaux est pauvre: la rigidité élastique des courbes expérimentales est plus faible que celle obtenue par voies numérique et analytique.

- Interaction entre broche d'acier et composante d'"embedding" à  $0^\circ$

La Figure 8-29 couvre les éprouvettes "diamètre D10 – angle de compression des fibres  $0^\circ$ ". De nouveau, les rigidités élastiques évaluées par voies numérique et analytique sont semblables, mais plus élevées que celles relevées expérimentalement. Les courbes numériques ("simu-Old" et "simu-New") ont la même allure que les courbes expérimentales. Elles ont la même raideur élastique et diffèrent dans la zone post-élastique.

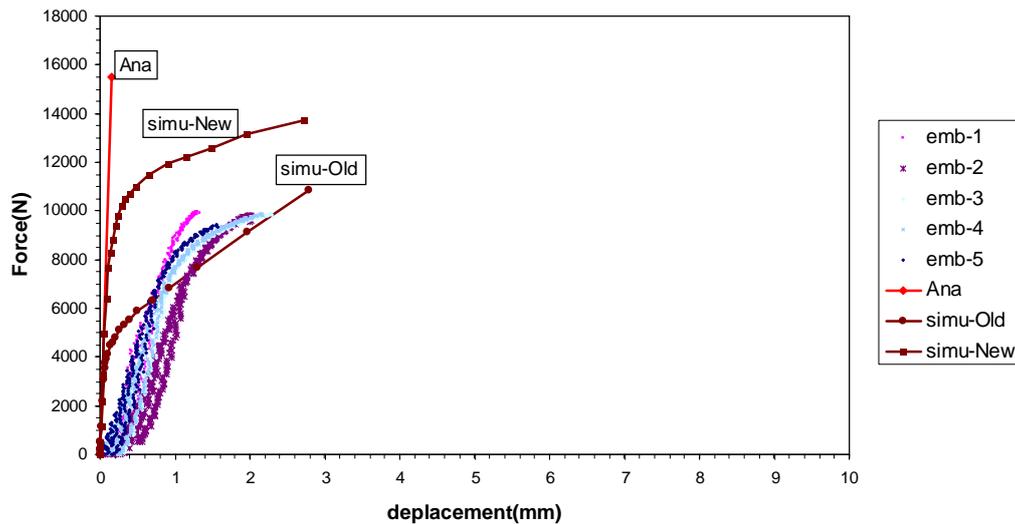


Figure 8-29 Courbes de comportement "broche-bois" obtenues expérimentalement, numériquement et analytiquement; éprouvettes "diamètre D10 - angle de compression des fibres  $0^{\circ}$ ".

### 8.6.1.2 Eprouvettes de diamètre D16

- Interaction entre broche d'acier et composante d'"embedding" à  $90^{\circ}$

La Figure 8-30 est relative aux éprouvettes "diamètre D16 – angle de compression des fibres  $90^{\circ}$ ". Les rigidités élastiques des courbes numérique et analytique sont relativement en bon accord, mais elles sont supérieures aux valeurs expérimentales. Les courbes numériques représentent assez bien l'allure des courbes expérimentales.

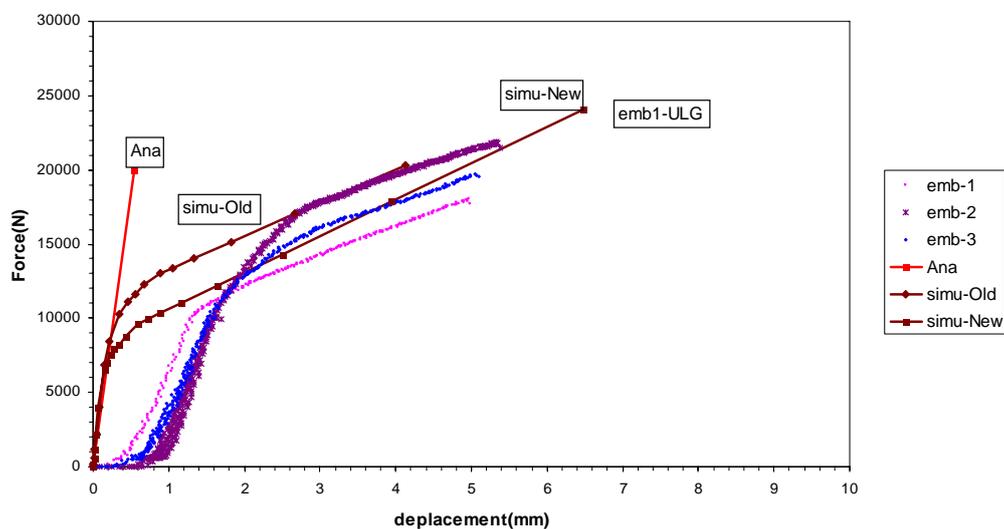


Figure 8-30 Courbes de comportement "broche-bois" obtenues expérimentalement, numériquement et analytiquement; éprouvettes "diamètre D16 - angle de compression des fibres  $90^{\circ}$ ".

- Interaction entre broche d'acier et composante d'"embedding" à  $0^\circ$

La Figure 8-31 couvre les éprouvettes "diamètre D16 – angle de compression des fibres  $0^\circ$ ". Les conclusions sont semblables à celles tirées ci-dessus, dans le cas des fibres en compression à  $90^\circ$ .

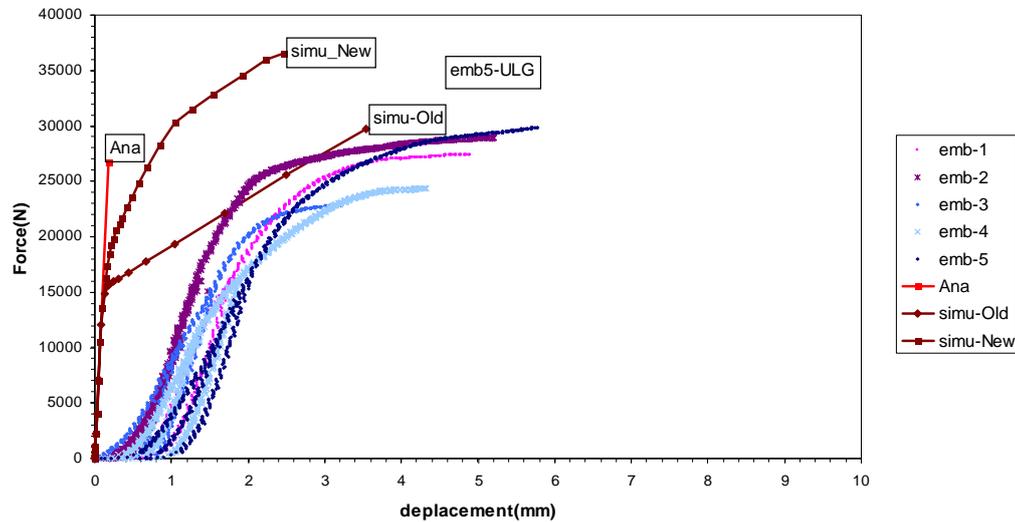


Figure 8-31 Courbes de comportement "broche-bois" obtenues expérimentalement, numériquement et analytiquement; éprouvettes "diamètre D16 - angle de compression des fibres  $0^\circ$ ".

### 8.6.1.3 Eprouvettes de diamètre D20

- Interaction entre broche d'acier et composante d'"embedding" à  $90^\circ$

Les résultats relatifs aux éprouvettes "diamètre D20 – angle de compression des fibres  $90^\circ$ " sont reportés à la Figure 8-32. Les rigidités initiales numérique et analytique sont en bon accord, mais elles sont supérieures aux valeurs expérimentales. L'allure du comportement "broche-bois" est bien représentée par les simulations numériques.

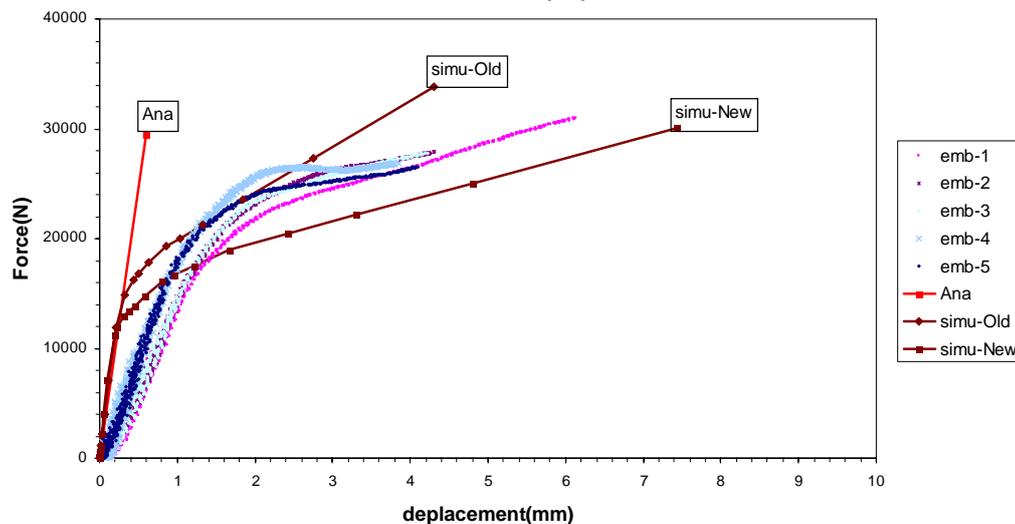


Figure 8-32 Courbes de comportement "broche-bois" obtenues expérimentalement, numériquement et analytiquement; éprouvettes "diamètre D20 - angle de compression des fibres  $90^\circ$ ".

- Interaction entre broche d'acier et composante d'"embedding" à 0°

La Figure 8-33 couvre les éprouvettes "diamètre D20 – angle de compression des fibres 0°". Les conclusions sont semblables à celles tirées ci-dessus, dans le cas des fibres en compression à 90°.

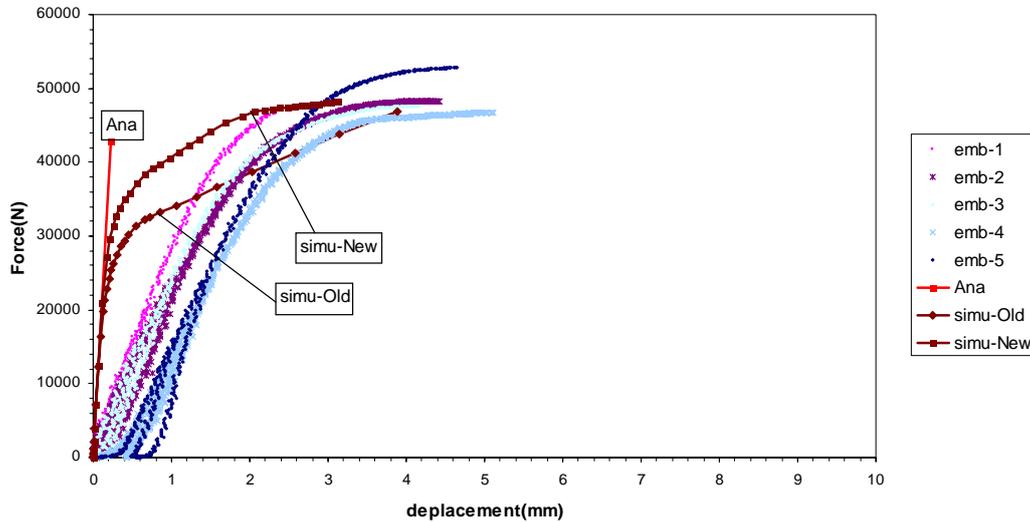


Figure 8-33 Courbes de comportement "broche-bois" obtenues expérimentalement, numériquement et analytiquement; éprouvettes "diamètre D20 - angle de compression des fibres 0°".

#### 8.6.1.4 Discussion des résultats

Au départ de cette recherche, en raison du manque de données sur le matériau, les modèles numériques et analytiques ont été utilisés avec des caractéristiques mécaniques de matériau estimées. Ces dernières ont été obtenues par l'intermédiaire de normes européennes (EC5), à partir de la classe du bois étudié.

Un bon accord a été constaté entre les résultats donnés par les modèles numérique et analytique; de plus, l'allure générale des courbes numériques ("simu-Old") est conforme aux résultats expérimentaux. Mais, la faible cohérence entre la rigidité élastique du comportement "broche-bois" obtenue par voies numérique et analytique et celle relevée expérimentalement a fini par mettre en doute la validité des modèles numérique et analytique proposés. Nous nous sommes alors dit que la méconnaissance des caractéristiques mécaniques du bois pouvait être la cause de ce manque de cohérence.

Des essais de matériau ont donc été réalisés ([LY-2004]); ils ont permis d'évaluer les vraies caractéristiques mécaniques du bois étudié. Ces nouvelles caractéristiques ont alors été réintroduites dans les modèles numérique et analytique.

Les courbes reportées aux Figure 8-28 à Figure 8-33 montrent que l'introduction des caractéristiques mesurés du bois étudié dans les modèles numérique et analytique améliore le com-

portement "broche-bois" en domaine post-élastique, mais pas en domaine élastique. On en conclut donc que:

- les valeurs des modules élastiques ( $E_0$  et  $E_{g0}$ ) proposées par l'EC5 semblent suffisamment correctes pour être introduites, tant qu'il s'agit de déterminer le comportement élastique "broche-bois";
- les nouvelles simulations "simu-New", avec prise en compte des caractéristiques mécaniques mesurés du bois étudié, n'ont pas donc beaucoup amélioré le problème rencontré avec les simulations "simu-Old": la rigidité élastique évaluée numériquement reste trop importante par rapport à celle relevée expérimentalement. Les modèles numérique et analytique proposés ne peuvent donc pas être validés. Donc, nous allons essayer d'en trouver la cause dans les paragraphes qui suivent.

### 8.6.2 Consultation des essais de portance locale dans la bibliographie

Avant de nous lancer une modélisation numérique encore plus complexe des essais de portance locale, nous avons décidé de tout d'abord comparer notre modélisation actuelle à d'autres essais issus de la littérature.

#### 8.6.2.1 Essais de Bocquet et d'Iroko [BOC-1997]

Quelques essais expérimentaux retrouvés dans [BOC-1997] sont choisis pour la vérification de la validité des modèles.

Les simulations numériques reprennent exactement la même configuration géométrique que celle des éprouvettes réelles. La modélisation (Figure 8-34) est tout à fait similaire à celle du modèle 2D (Figure 8-16) proposé au §8.4.1.

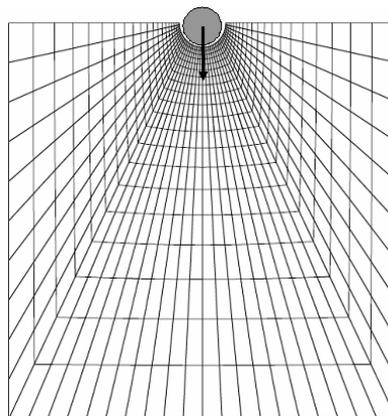


Figure 8-34 Modélisation 2D du comportement de la composante d'"embedding" pour les éprouvettes de Bocquet et d'Iroko.

Deux séries de simulations avec deux essences de bois différentes sont réalisées: l'une avec du bois Sapin Douglas (éprouvettes de Bocquet) et l'autre avec du bois "Iroko" (éprouvettes

d'Iroko). Les caractéristiques mécaniques de ces deux bois sont reportées ci-dessous, au Tableau 8-3.

Essence	E0	E90	G	ft,0(*)	fc,0	ft,90	fc,90	fv
	N/mm <sup>2</sup>							
Sapin Douglas	14000.00	1168.00	800.00	29.20	64.10	2.50	10.50	10.00
Iroko	16000.00	1412.00	990.00	27.70	83.10	3.40	13.60	13.30

Tableau 8-3 Caractéristiques mécaniques introduites dans les modèles numérique [BOC-1997]. (\*) valeurs interpolées afin de pouvoir réaliser les simulations.

Une fois la composante d'"embedding" caractérisée numériquement, l'introduction de son comportement et de celui de la composante "broche" dans le modèle 2D numérique de la Figure 8-20 permet de reconstruire numériquement le comportement complet "broche-bois" des éprouvettes.

### 8.6.2.1.1 Essais d'Iroko

Dans les diagrammes comparatifs présentés à la Figure 8-35, trois types de courbes peuvent être identifiés:

- la courbe "Eprouvette" présente le comportement expérimental "broche-bois" avec angle de compression des fibres à 90°;
- la courbe "Iroko\*" représente la courbe "Eprouvette", après élimination d'un saut dans la courbe d'origine;
- la courbe "ULG" présente le comportement numérique "broche-bois", avec angle de compression des fibres à 90°, obtenue par voie numérique avec le matériau de bois correspondant au Tableau 8-3.

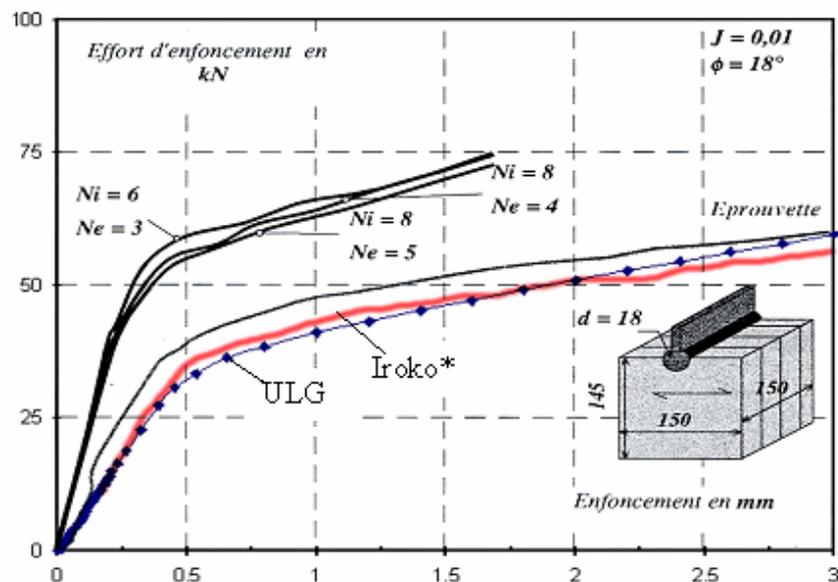


Figure 8-35 Courbes de comportement "broche-bois" obtenues expérimentalement et numériquement; éprouvette d'Iroko avec angle de compression des fibres à 90°.

Quel que soit le niveau de chargement, élastique ou post-élastique, une parfaite cohérence est observée entre la courbe numérique et la courbe expérimentale. Le modèle numérique semble correct dans ce cas de comparaison.

### 8.6.2.1.2 Essais de Bocquet

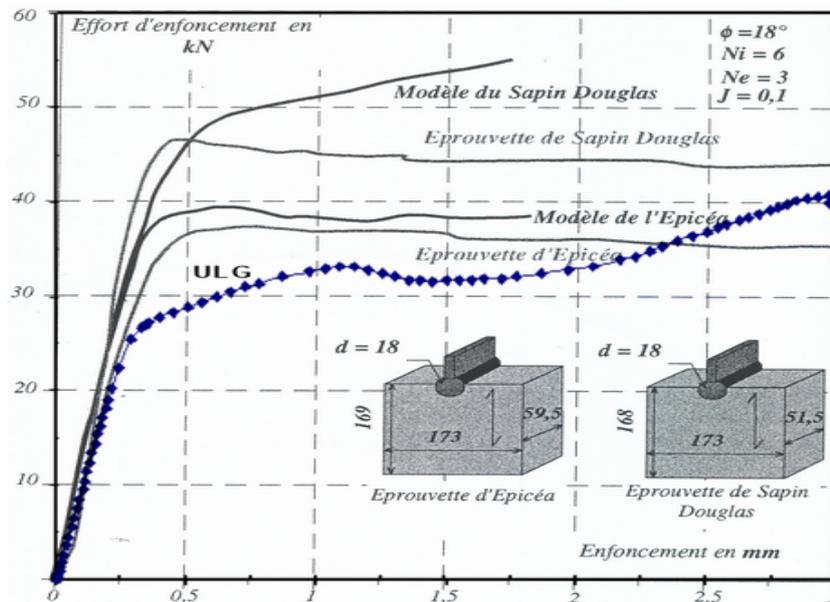


Figure 8-36 Courbes de comportement "broche-bois" obtenues expérimentalement et numériquement; éprouvette de Sapin Douglas avec angle de compression des fibres à  $0^\circ$  (de Bocquet).

Dans les diagrammes comparatifs présentés à la Figure 8-36, deux types de courbes sont reportés:

- la courbe "Eprouvette de Sapin Douglas" présente le comportement expérimental "broche-bois", avec angle de compression des fibres à  $0^\circ$ ;
- la courbe "ULG" présente le comportement numérique "broche-bois", avec angle de compression des fibres à  $0^\circ$ , obtenue par voie numérique avec le matériau de bois correspondant au Tableau 8-3.

De nouveau, il y a une bonne correspondance de rigidité entre la courbe numérique et la courbe expérimentale. La résistance associée à la courbe numérique est plus faible que celle relevée expérimentalement. Cela provient peut-être de la description non complète de la plasticité dans le modèle 2D numérique de la composante d'"embedding". Mais de toute façon, l'objectif de la thèse est de trouver une approche pour la prédiction de la rigidité du comportement "broche-bois". Sur ce point, le couplage des deux modèles 2D numériques proposés permet à nouveau de présenter correctement le comportement élastique "broche-bois" des éprouvettes.

### 8.6.2.2 Essais de portance locale de l'Université de Naples [CAL-2005]

Une série d'essais de portance locale dont les caractéristiques sont similaires à celles des essais CTIB a été réalisée à l'Université de Naples.

Comme au §8.6.2.1, la simulation numérique permettant la caractérisation du comportement de la composante d'"embedding" est menée en respectant les dimensions exactes des éprouvettes d'essais. La modélisation (Figure 8-37) est tout à fait similaire à celle du modèle 2D numérique (Figure 8-16) proposé au §8.4.1.

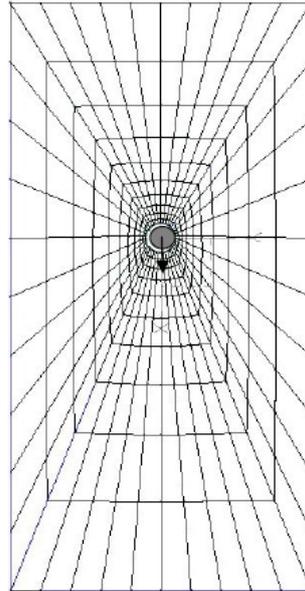


Figure 8-37 Modélisation 2D du comportement de la composante d'"embedding" pour les éprouvettes de l'Université de Naples.

D'après [CAL-2005], le bois utilisé pour les éprouvettes est une espèce de châtaignier. Sa classe, selon l'EC5, est comprise entre C16 et C18; les caractéristiques s'établissent comme suit:

Essence	E0 N/mm <sup>2</sup>	E90 N/mm <sup>2</sup>	G N/mm <sup>2</sup>	ft,0 N/mm <sup>2</sup>	fc,0 N/mm <sup>2</sup>	ft,90 N/mm <sup>2</sup>	fc,90 N/mm <sup>2</sup>	v
Chataigner	9000.00	300.00	560.00	11.00	18.00	1.00	3.00	0.30

Tableau 8-4 Caractéristiques de matériau pour les essais de Naples.

Une fois la composante d'"embedding" caractérisée numériquement, l'introduction de son comportement et de celui de la composante "broche" dans le modèle 2D numérique de la Figure 8-20 permet de reconstruire numériquement le comportement "broche-bois" des éprouvettes.

Les résultats comparatifs entre les courbes expérimentales de comportement "broche-bois" et celle obtenue numériquement sont présentés ci-dessous, à la Figure 8-38. Deux types de courbe obtenus y sont reportés:

- la courbe "ULG" présente le comportement numérique "broche-bois", avec angle de compression des fibres à  $0^\circ$ , obtenue par voie numérique avec le matériau de bois correspondant au Tableau 8-4;
- les autres présentent le comportement expérimentale "broche-bois", avec angle de compression des fibres à  $0^\circ$ , obtenues expérimentalement.

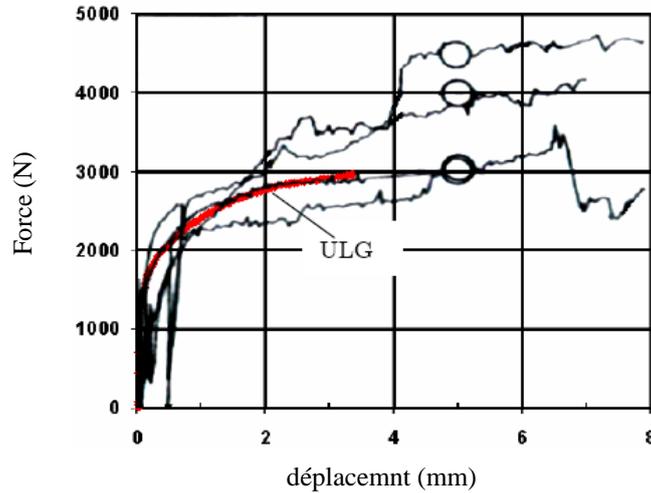


Figure 8-38 Courbes de comportement "broche-bois" obtenues expérimentalement (à Naples) et numériquement; éprouvettes de Châtaigner soumises à compression (angle de compression des fibres à  $0^\circ$ ).

Les diagrammes comparatifs montrent de nouveau une bonne cohérence entre les résultats expérimentaux et numériques, aussi bien en domaine élastique qu'en domaine post-élastique.

### 8.6.2.3 Discussion des résultats

Les trois résultats comparatifs entre le modèle numérique et les essais expérimentaux trouvés dans différentes sources bibliographiques montrent que le modèle numérique proposé représente assez correctement le comportement "broche-bois" des éprouvettes. Mais cette conclusion ne semble être confirmée par les comparaisons réalisées avec les essais de portance locale réalisés au CTIB, comme nous l'avons vu au §8.6.1.

Essayons de remettre les courbes expérimentales obtenues au CTIB et à Naples sur un même diagramme (Figure 8-39). Trois types de courbes y apparaissent:

- les courbes "Naples" présentent le comportement expérimental "broche-bois" avec angle de compression des fibres à  $0^\circ$ , obtenues via les essais de Naples;
- la courbe "ULG" présente le comportement expérimentale "broche-bois" avec angle de compression des fibres à  $0^\circ$ , obtenue via un essai de CTIB;
- la courbe "Simu" présente le comportement numérique "broche-bois" avec angle de compression des fibres à  $0^\circ$ , obtenue par le modèle numérique avec le matériau bois de la courbe "CTIB".

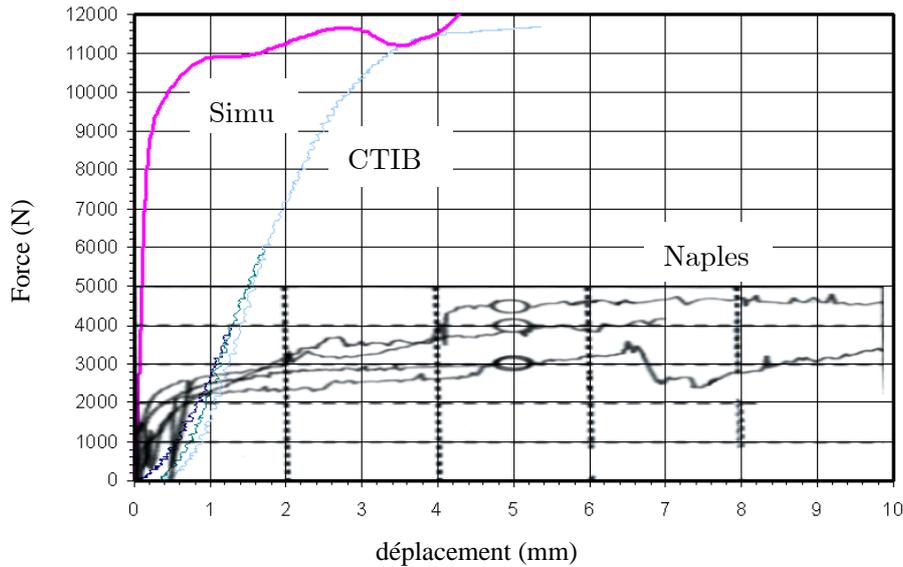


Figure 8-39 Courbes de comportement "broche-bois" obtenues expérimentalement (Naples et CTIB) et numériquement à  $0^\circ$  (angle de compression des fibres).

Il faut rappeler que le bois utilisé pour les éprouvettes de CTIB est de classe C27 (la classe des lamelles) selon l'EC5. Ce bois est donc beaucoup plus rigide et plus résistant que le bois utilisé à Naples (sa classe selon l'EC5 varie entre C16 et C18); ceci est bien confirmé, à la Figure 8-39, tant que l'on s'intéresse à la résistance, mais, par contre, la même logique ne s'applique pas à la rigidité. Quant à la courbe numérique "Simu", elle semble, elle, correcte tant en rigidité qu'en résistance.

En résumé, sur base des diagrammes comparatifs entre les résultats expérimentaux repris de la bibliographie (de Bouquet, d'Iroko et de l'Université de Naples) et des résultats obtenus par les modèles numériques proposés, on peut conclure que:

- Les modèles numériques représentent assez correctement le comportement "broche-bois" de l'ensemble des éprouvettes, surtout en régime élastique.
- Les essais expérimentaux du CTIB semblent être affectés d'erreurs de mesures qui rendent la réponse des éprouvettes plus souple. Ce fait se doit évidemment d'être confirmé.

### 8.6.3 Nouveaux essais de portance locale réalisés à l'ULG

L'étude comparative mentionnée au §8.6.2 a démontré la valeur des modèles numériques proposés mais, cependant, a remis en question la validité des résultats d'essais réalisés au CTIB. Cela nous a conduit à refaire un certain nombre d'essais sur les éprouvettes déjà testées et ce, afin de vérifier les données fournies par le CTIB.

Les éprouvettes ont cette fois été testées au laboratoire M&S de l'Université de Liège. Elles étaient déjà "abîmées" à une extrémité par les essais de portance locale précédents, mais

étaient encore en bon état à l'autre extrémité (Figure 8-40). Les nouveaux essais ont dès lors été réalisés sur les éprouvettes, mais du côté non abîmé, ce qui permet une comparaison de résultats CTIB et ULG sur les mêmes éprouvettes.



Figure 8-40 Récupération d'une éprouvette pour un essai de portance locale à ULG.

Six éprouvettes représentatives ont été choisies selon le diamètre de la broche (D10, D16 et D20) et l'angle de compression des fibres ( $0^\circ$  et  $90^\circ$ ) et testées au laboratoire M&S à l'ULG. Sur base des nouveaux résultats obtenus, de nouvelles comparaisons de validation des modèles numérique et analytique ont été effectuées. Dans les diagrammes comparatifs repris aux paragraphes de §8.6.3.1 à §8.6.3.3, cinq types de courbes de comportement sont présentés :

- les courbes expérimentales obtenues via les essais de portance locale réalisés au CTIB sont notées "emb-i, i=1, 2, 3...";
- la courbe "simu-Old" présente le comportement complet "broche-bois" obtenu par voie numérique, avec les caractéristiques mécaniques données de l'EC5 pour le bois étudié (Tableau 8-1);
- la courbe "simu-New" présente le comportement complet "broche-bois" obtenu par voie numérique, avec les caractéristiques mécaniques mesurées du bois étudié (Tableau 8-1);
- la courbe "Ana" présente le comportement élastique "broche-bois" obtenu par voie analytique, avec les caractéristiques mécaniques mesurées du bois étudié (comme pour la "simu-New").
- la courbe "emb<sub>T</sub>-ULG" présente le comportement expérimental "broche-bois" obtenu via les essais réalisés à l'ULG.

### 8.6.3.1 Eprouvettes de diamètre D10

- **Interaction entre broche d'acier et composante d'"embedding" à  $90^\circ$**

La courbe expérimentale "emb1-ULG" et la courbe numérique "simu-New" sont manifestement en bon accord aussi bien en régime élastique qu'en régime post-élastique (Figure 8-41).

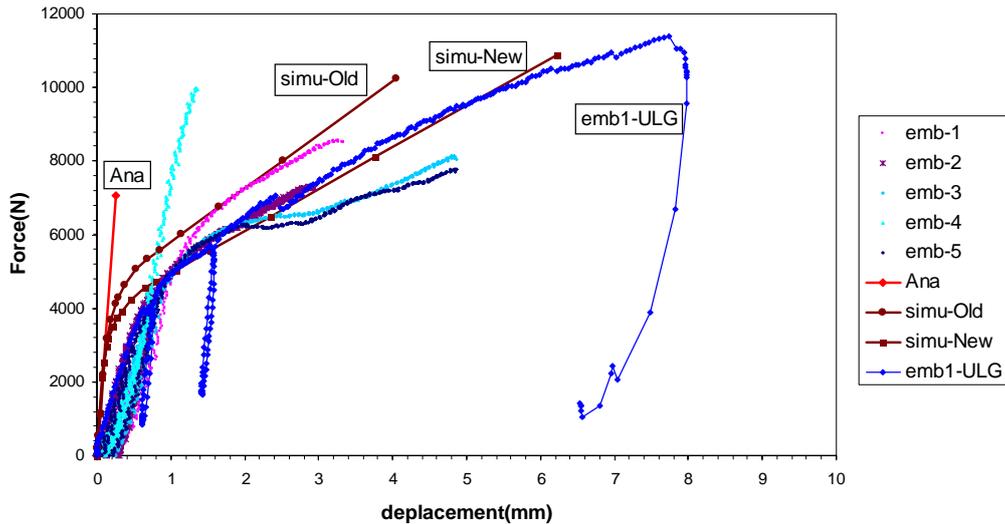


Figure 8-41 Courbes de comportement "broche-bois" obtenues expérimentalement, numériquement et analytiquement; éprouvettes "diamètre D10 - angle de compression des fibres 90°".

- Interaction entre broche d'acier et composante d'"embedding" à 0°

Les rigidités des courbes numérique "simu-New" et expérimentale "emb2-ULG" sont en bon accord. La courbe "simu-New" a une allure conforme à la réalité et le niveau de résistance maximale prédit est proche de celui de la courbe expérimentale "emb2-ULG" (Figure 8-42).

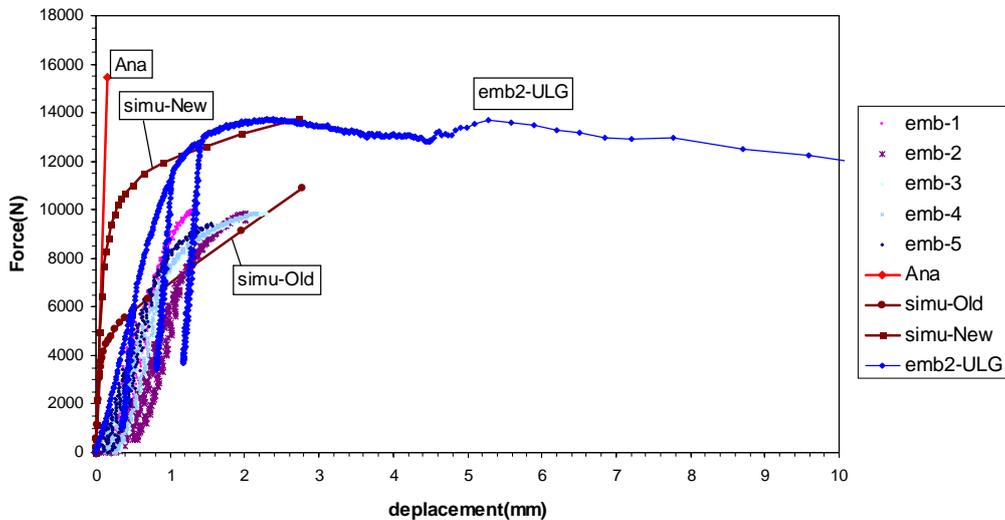


Figure 8-42 Courbes de comportement "broche-bois" obtenues expérimentalement, numériquement et analytiquement; éprouvettes "diamètre D10 - angle de compression des fibres 0°".

### 8.6.3.2 Eprouvettes de diamètre D16

- Interaction entre broche d'acier et composante d'"embedding" à 90°

Comme au §8.6.3.1, la courbe expérimentale "emb1-ULG" et la courbe numérique "simu-New" sont en bon accord aussi bien en régime élastique qu'en régime post-élastique (Figure 8-43).

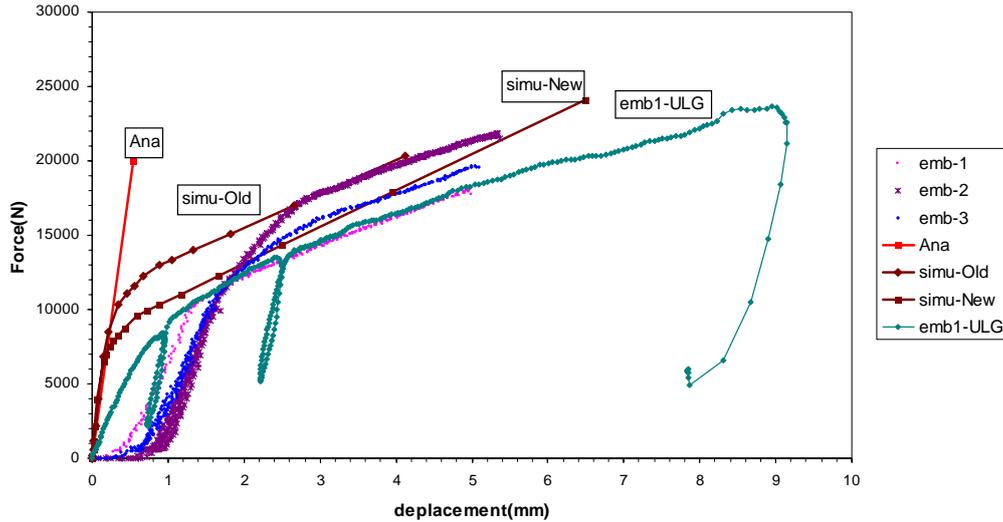


Figure 8-43 Courbes de comportement "broche-bois" obtenues expérimentalement, numériquement et analytiquement; éprouvettes "diamètre D16 – angle de compression des fibres  $90^\circ$ ".

- Interaction entre broche d'acier et composante d'"embedding" à  $0^\circ$

Les rigidités des courbes numérique "simu-New" et expérimentale "emb5-ULG" sont très proches. La courbe numérique "simu-New" a la même forme que la courbe expérimentale et la prédiction de la résistance maximale est très bonne (Figure 8-44).

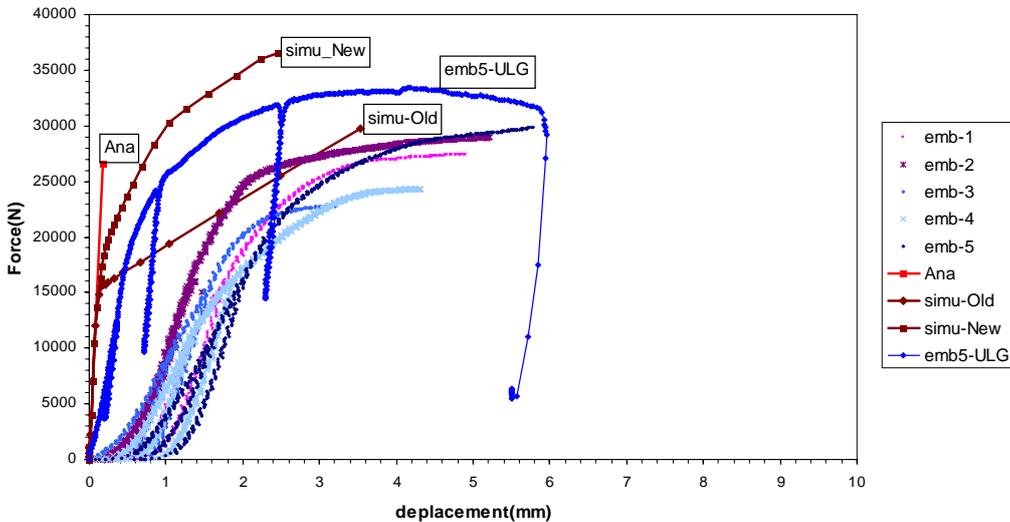


Figure 8-44 Courbes de comportement "broche-bois" obtenues expérimentalement, numériquement et analytiquement; éprouvettes "diamètre D16 – angle de compression des fibres  $0^\circ$ ".

### 8.6.3.3 Eprouvettes de diamètre D20

- Interaction entre broche d'acier et composante d'"embedding" à  $90^\circ$

Comme aux §8.6.3.1 et §8.6.3.2, la courbe expérimentale "emb2-ULG" et la courbe numérique "simu-New" sont en bon accord aussi bien en régime élastique qu'en régime post-élastique (Figure 8-45).

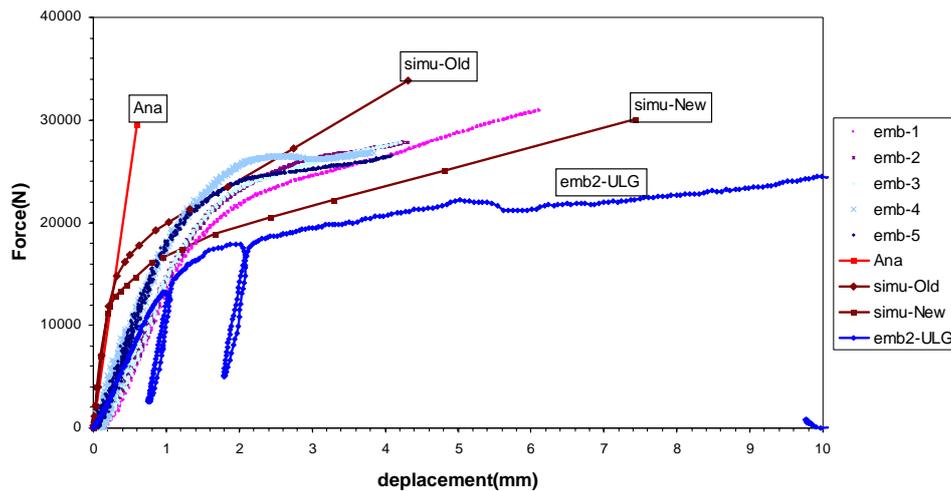


Figure 8-45 Courbes de comportement "broche-bois" obtenues expérimentalement, numériquement et analytiquement; éprouvettes "diamètre D20 – angle de compression des fibres 90°".

- **Interaction entre broche d'acier et composante d'"embedding" à 0°**

Les rigidités des courbes numérique "simu-New" et expérimentale "emb5-ULG" sont similaires. Les courbes "simu-New" et "emb5-ULG" sont très proches (Figure 8-46).

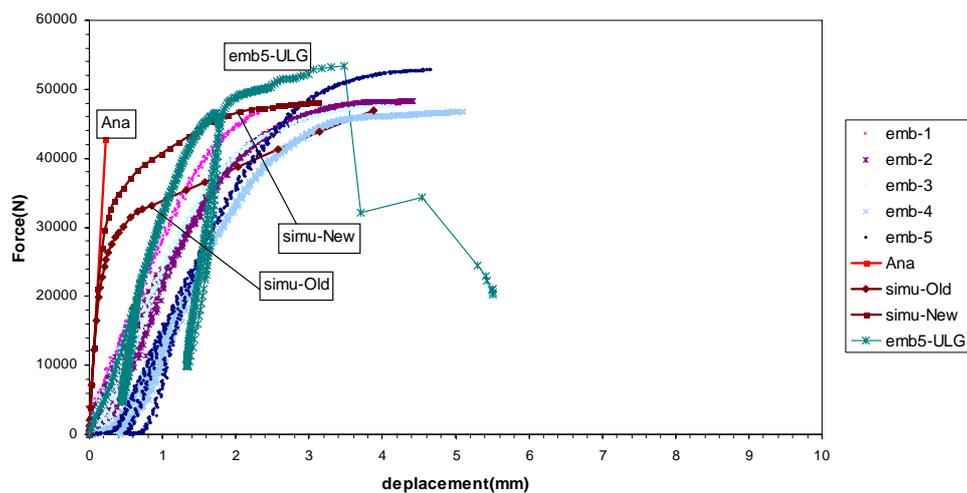
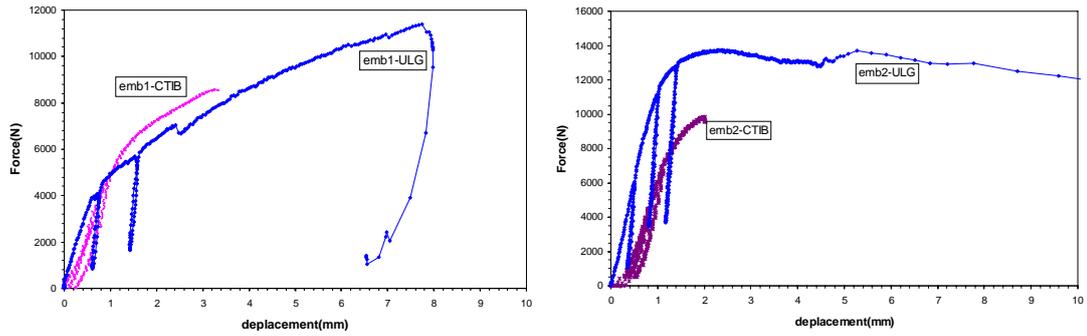


Figure 8-46 Courbes de comportement "broche-bois" obtenues expérimentalement, numériquement et analytiquement; éprouvettes "diamètre D20 – angle de compression des fibres 0°".

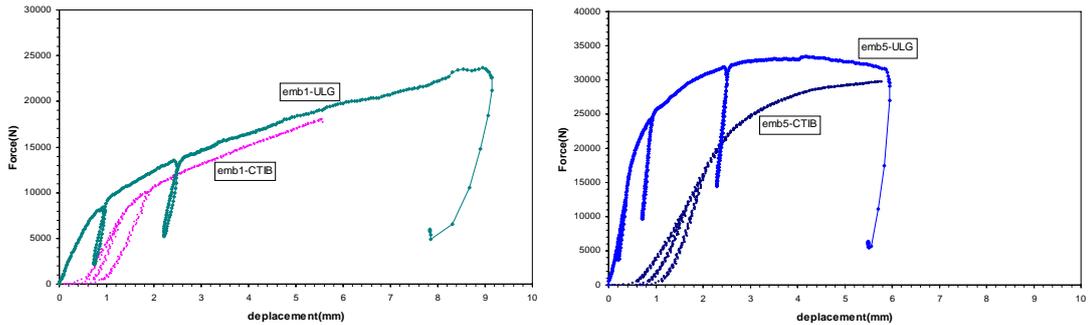
### 8.6.3.4 Discussion des résultats

Les courbes expérimentales "ULG", les courbes numériques et les courbes analytiques constituent un ensemble des données en très bon accord. Ceci, combiné aux résultats du paragraphe précédent (voir §8.6.2.3), permet de valider les modèles numériques et analytiques.

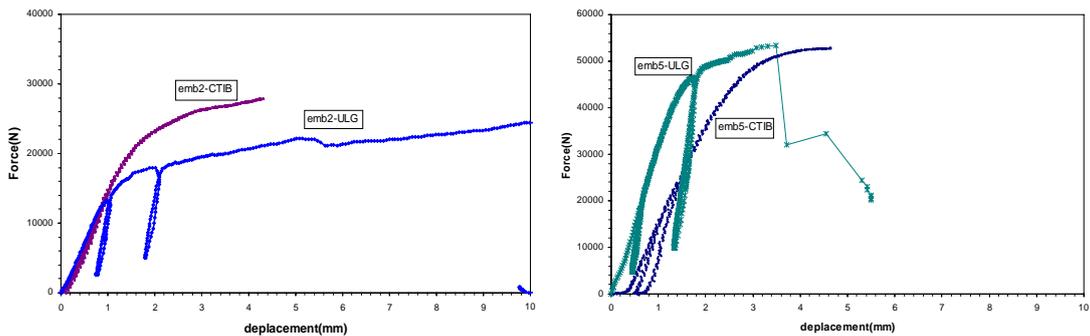
Il est aussi montré que les essais réalisés au CTIB étaient sans doute entachés d'erreurs, mais on peut néanmoins se poser la question de la nature des erreurs et du degré de différence entre ceux-ci et ceux réalisés à l'ULG. Pour cela, des diagrammes comparatifs entre "anciens" et "nouveaux" essais sont reproduits ci-après.



(a) Epreuve D10-compression des fibres à  $90^\circ$  (b) Epreuve D10-compression des fibres à  $0^\circ$



(c) Epreuve D16-compression des fibres à  $90^\circ$  (d) Epreuve D16-compression des fibres à  $0^\circ$



(e) Epreuve D20-compression des fibres à  $90^\circ$  (f) Epreuve D20-compression des fibres à  $0^\circ$

Figure 8-47 Courbes de comportement "broche-bois" obtenues via les essais de CTIB et de ULG.

Ces diagrammes montrent que les courbes, CTIB et ULG, sont visiblement similaires, sauf en phase "pseudo-élastique"; la rigidité de cette dernière, dans les courbes "ULG", est plus élevée que celle relevée dans les courbes "CTIB". Aucune explication n'a pu être trouvée permettant d'expliquer cette différence.

Par ailleurs, les essais expérimentaux réalisés sur des éprouvettes similaires sont souvent, entre eux, en très bon accord dans le domaine élastique, mais beaucoup moins dans le domaine post-élastique. Cela peut être expliqué par le caractère "global" ou "local" du comportement de la composante d'"embedding" en fonction du niveau de sollicitation. En effet, le comportement élastique de la composante d'"embedding" concerne un ensemble de plusieurs lamelles constitutives de la pièce en BLC; on parle alors de caractère "global"; le comportement y est assez uniforme, car il est associé à la réponse élastique moyenne de plusieurs lamelles. Quant au comportement post-élastique de la composante d'"embedding", il concerne seulement à la

lamelle qui est soumise directement à la sollicitation (caractère "local"); le comportement relevé est moins uniforme, car il est associé sensiblement à la réponse post-élastique d'une seule lamelle.

## 8.7 Conclusions

L'ovalisation des trous dans lesquels sont placées les broches d'assemblage, sous l'effet de pression diamétrale "broche contre bois" est l'un des éléments les plus importants de déformation des assemblages mécaniques en bois. C'est pourquoi, dans le cadre de cette thèse, le développement des modèles analytiques portant sur la prédiction de ce type de déformation a été d'une importance capitale.

Ce type de déformation résulte de l'interaction "broche-bois". Cette interaction, tridimensionnelle par nature, est influencée par les caractéristiques géométriques et matérielles de l'éprouvette, dans les trois directions de l'espace. Mais une approche simplifiée permet de "scinder" ce comportement 3D "broche-bois" en deux comportements 2D, dans deux plans perpendiculaires:

- **Dans le plan perpendiculaire à l'axe de la broche**

Il s'agit de la réponse de chaque couche d'épaisseur de la pièce de bois soumis à "embedding". On parle de **composante d'"embedding"**.

- **Dans le plan parallèle à l'axe de la broche**

Il s'agit de la réponse de plusieurs couches d'épaisseur de bois en interaction avec la broche en flexion et *en cisaillement (négligeable)*. Dans la modélisation adoptée, l'effet de cisaillement entre les couches d'épaisseur de bois a été négligé par hypothèse. Il ne reste alors que **la composante "broche"**. L'interaction "broche-bois" peut dès lors être considérée comme la réponse d'un système composé de deux composantes: une poutre caractérisée par le comportement de la composante "broche" s'appuie sur une fondation déformable caractérisée par le comportement de la composante d'"embedding".

Le comportement 3D "broche-bois" est à présent fondé sur deux composantes: la composante "broche" en flexion et la composante d'"embedding". La composante "broche" travaille souvent en régime élastique, tandis que la composante d'"embedding", plus faible, rentre d'avantage en régime non linéaire. L'allure non linéaire du comportement 3D "broche-bois" est dès lors souvent associée au caractère non linéaire de la composante d'"embedding". Cette remarque est confirmée par les simulations numériques.

La similitude de la rigidité élastique du comportement "broche-bois" obtenu via les modèles numérique et analytique et celle résultant des essais expérimentaux du CTIB s'est relevée peu optimale, ce qui nous a amené à rechercher d'autres résultats expérimentaux dans la bibliographie et à réaliser des essais de portance locale complémentaires à l'ULG afin d'identifier les sources d'erreur et d'estimer également la validité des modèles développés par rapport aux essais de CTIB. Au final, les comparaisons de rigidité entre les modèles numérique et analytique et les essais expérimentaux trouvés dans la bibliographie et réalisés à l'ULG ont donné de très bons résultats. En définitive, **les modèles numériques et analytiques ont aussi pu être validés.**

- **Pour les modèles numériques**

En régime élastique, le couplage de deux modèles 2D numériques a donné des résultats qui sont en bon accord avec les essais expérimentaux.

En régime post-élastique, bien que les modèles ne soient pas censés décrire le comportement complet non linéaire "broche-bois", que les paramètres mécaniques (frottement "acier-bois", coefficient de Poisson du bois, module de cisaillement, ...) n'aient pas été mesurés précisément, la description non linéaire des comportements "broche-bois" et d'"embedding" par les modèles est assez correcte. Cela veut dire que ces modèles peuvent éventuellement être utilisés pour étudier également le comportement non linéaire "broche-bois". Dans ce cas-ci, une loi de matériau bois élastique parfaitement plastique suffit probablement.

- **Pour les modèles analytiques**

Le couplage de deux modèles 2D analytiques permet de prédire la rigidité élastique de la composante d'"embedding", et puis la rigidité élastique du couple "broche-bois".

L'utilisation du modèle numérique et du modèle analytique a permis de confirmer que le frottement "acier-bois", le coefficient de Poisson et le module de cisaillement influencent peu la composante d'"embedding" et donc la rigidité de l'ensemble "broche-bois".

Le diamètre de la broche n'a pas d'influence sur la rigidité d'"embedding" prédite par le modèle analytique. Les résultats numériques, eux, sont légèrement influencés par ce paramètre. Cette différence trouve son explication dans les hypothèses de calcul qui sont à la base du modèle analytique (plaque de dimensions infinies).

Dans une étape ultérieure, une simplification de la formulation analytique du modèle théorique devrait être envisagée afin d'en permettre une application aisée par les praticiens.

## **Partie 6 Etude des assemblages**

---

## Partie 6 Etude des assemblages

### Chapitre 9 Assemblages en cisaillement

9.1	Introduction.....	123
9.1.1	Assemblages à une broche en cisaillement.....	123
9.1.2	Assemblages à plusieurs broches en cisaillement.....	123
9.2	Travaux à caractère expérimental.....	124
9.2.1	Définition du programme expérimental en collaboration avec le CTIB.....	124
9.2.1.1	Essais de compression d'un assemblage moisé constitué d'une broche (série d'essais C2 et C3).....	125
9.2.1.2	Essais de compression d'un assemblage moisé constitué de deux broches (séries d'essais C4, C5 et C6).....	126
9.2.2	Application des forces et instrumentation.....	127
9.2.3	Traitement des essais.....	128
9.3	Travaux à caractère numérique.....	129
9.3.1	Modèle numérique 2D.....	129
9.3.2	Intégration du comportement des composantes.....	130
9.3.2.1	Composante "broche".....	130
9.3.2.2	Composante d'"embedding".....	131
9.3.3	Traitement des résultats numériques.....	131
9.4	Travaux à caractère analytique.....	132
9.4.1	Assemblages à une broche en cisaillement.....	132
9.4.2	Assemblages à plusieurs broches en cisaillement, moisés à 0°-0°.....	133
9.4.2.1	Modèle à "poutres".....	133
9.4.2.2	Quelques cas pratiques.....	137
9.4.3	Assemblages à plusieurs broches en cisaillement, moisés à 0°-α°.....	137
9.4.3.1	Modèle à "poutres".....	138
9.4.3.2	Quelques cas pratiques.....	139
9.5	Validation des modèles numérique et analytique.....	139
9.5.1	Assemblages à une seule broche en cisaillement.....	140
9.5.1.1	Assemblages à une broche, moisés à 0°-0° (C2).....	141
9.5.1.1.1	Assemblages à une broche D10, moisés à 0°-0°.....	141
9.5.1.1.2	Assemblages à une broche D16, moisés 0°-0°.....	142
9.5.1.1.3	Assemblages à une broche D20, moisés 0°-0°.....	144
9.5.1.2	Assemblages à une broche, moisés 0°-90° (C3).....	145
9.5.1.2.1	Assemblages à une broche D10, moisés 0°-90°.....	145

9.5.1.2.2	Assemblages à une broche D16, moisés 0°-90° .....	147
9.5.1.2.3	Assemblages à une broche D20, moisés 0°-90° .....	148
9.5.1.3	Discussion des résultats.....	150
9.5.2	Assemblages à plusieurs rangées de broches en cisaillement.....	150
9.5.2.1	Assemblages à plusieurs broches, moisés à 0°-0°, en cisaillement (C4) ....	150
9.5.2.2	Assemblages à plusieurs broches, moisés à 0°-90°, en cisaillement (C5) ..	152
9.5.2.3	Assemblages à plusieurs broches, moisés à 0°-90°, en cisaillement (C6) ..	153
9.5.2.4	Discussion des résultats.....	154
9.6	Conclusions .....	155

## **Chapitre 10 Assemblages en flexion**

10.1	Introduction.....	157
10.2	Travaux à caractère expérimental .....	158
10.2.1	Assemblages en flexion [CAL-2005] .....	158
10.2.2	Assemblages en flexion [MER-1995] .....	159
10.3	Travaux à caractère analytique .....	160
10.3.1	Modèle analytique général.....	160
10.3.2	Modèle analytique pour un cas simplifié .....	161
10.4	Validation du modèle analytique.....	162
10.4.1	Assemblages en flexion [CAL-2005] .....	163
10.4.1.1	Modélisation et solution du problème.....	163
10.4.1.2	Comparaison avec les résultats expérimentaux.....	164
10.4.2	Assemblages en flexion [MER-1995] .....	166
10.4.2.1	Cas 1, broches disposées avec un angle de 0° .....	166
10.4.2.2	Cas 2, broches disposées à 45° de compression aux fibres.....	167
10.5	Conclusions .....	167



# Chapitre 9 Assemblages en cisaillement

## 9.1 Introduction

La méthode des composantes permet d'étudier le comportement d'un assemblage sur base de la connaissance préliminaire du comportement de ses composantes constitutives. Dans le cas des assemblages en bois étudiés, deux composantes principales ont été analysées: la composante "broche" et la composante d'"embedding". Il convient ici de les "assembler" de manière à en déduire la loi du comportement de l'assemblage tout entier.

Le comportement d'un assemblage en cisaillement a été traité par plusieurs auteurs. Mais, au regard de la méthode des composantes, il est le résultat de l'interaction d'un ensemble de couples "broche acier en interaction avec le bois" (comportement "broche-bois"). Une fois la loi de comportement "broche-bois" connue, le comportement global de l'assemblage peut alors être établie.

### 9.1.1 Assemblages à une broche en cisaillement

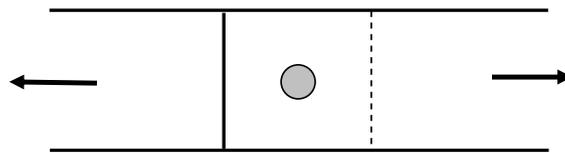


Figure 9-1 Un Assemblage à une broche.

Ce type d'assemblage (Figure 9-1) n'existe pratiquement pas dans la réalité. Mais il permet d'étudier le comportement "broche-bois" dans un assemblage. Une fois que les modèles de prédiction du comportement "broche-bois" sont établis et validés par les essais expérimentaux, le comportement de tout assemblage plus complexe peut être déterminé, soit en cisaillement avec plusieurs connecteurs, soit en flexion simple, soit à la fois en cisaillement et en flexion.

### 9.1.2 Assemblages à plusieurs broches en cisaillement

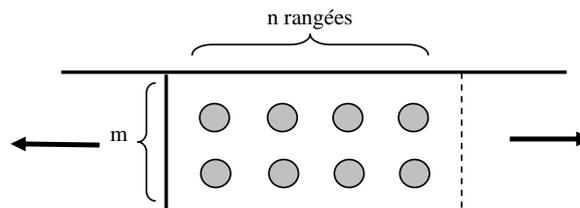


Figure 9-2 Un assemblage à plusieurs broches en cisaillement.

Un assemblage mécanique de construction en bois contient en général un groupe de plusieurs connecteurs. Même dans le cas où la charge appliquée est bien centrée sur la section, la distribution des efforts entre les rangées de connecteurs n'est pas uniforme. La distribution est telle que l'effort diminue de la rangée extérieure à la rangée intérieure de l'assemblage. En proportion avec les efforts auxquels ils sont soumis, les connecteurs de la rangée extérieure sont beaucoup plus déformés que ceux à la rangée intérieure. Cela permet les observations suivantes sur le comportement en groupe des connecteurs d'un assemblage:

- **Une rigidité plus faible en groupe**

La participation de la matière bois "déformable", dans un assemblage, au transfert des efforts entre les rangées de broches, ce qui cause la non uniformité de distribution des efforts entre ces dernières, entraîne que la rigidité nette de l'assemblage est plus faible que la somme des rigidités de chaque couple "broche-bois".

- **Une résistance ultime plus faible en groupe**

La résistance ultime d'un assemblage peut atteindre la somme de résistance des couples "broche-bois" (résistance plastique) à condition que ceux-ci soient assez ductiles dans les rangées extérieures. Dans un assemblage, le bois est souvent écrasé avant que les connecteurs ne se plastifient. Par conséquent, le couple "broche-bois" le plus extérieur de l'assemblage atteint la ruine avant que les autres, à l'intérieur, ne développent leur capacité portante. La résistance ultime du groupe de connecteurs ne peut évidemment plus augmenter dès que la ruine est atteinte dans des rangées extérieures.

L'EC5 et plusieurs autres codes proposent un coefficient réducteur ( $n_{ef} < 1$  à appliquer à la pleine résistance "plastique") pour la prise en compte de la résistance en groupe des connecteurs d'un assemblage. Mais peu d'entre eux proposent un coefficient équivalent pour la rigidité en groupe des connecteurs d'un assemblage, car peu d'information relative au comportement semi-rigide des assemblages en bois est actuellement disponible dans les codes. L'étude de la rigidité élastique d'un assemblage en cisaillement avec plusieurs rangées de connecteurs est donc le sujet de ce chapitre.

## 9.2 Travaux à caractère expérimental

### 9.2.1 Définition du programme expérimental en collaboration avec le CTIB

Une série d'essais a été réalisée dans le cadre de cette étude. Elle constitue une étape intermédiaire entre les essais sur la composante d'"embedding" et les essais sur les assemblages ré-

els. Les assemblages en cisaillement simple sont ici composés d'une ou deux broches. Les fibres sont sollicitées selon un angle de  $0^\circ$  ou de  $90^\circ$ , l'influence des angles intermédiaires ayant été étudiée dans la partie dédiée aux composantes. L'expérimentation est menée avec des broches de même diamètre que celles utilisées lors des essais de portance locale, à savoir 10, 16 ou 20 mm. La longueur des broches est choisie telle qu'elles traversent l'assemblage moisé.

Les épaisseurs des membrures valent 4 fois ou 8 fois le diamètre  $D$  de la broche. Trois variantes d'épaisseur et de rapports d'épaisseur sont étudiées:

- les trois membrures sont de même épaisseur, égale à  $4 \times D$ : 4D-4D-4D;
- les membrures extérieures ont une épaisseur de  $4 \times D$  et la membrure intérieure a une épaisseur de  $8 \times D$ : 4D-8D-4D;
- les trois membrures sont de même épaisseur, égale à  $8 \times D$ : 8D-8D-8D.

### 9.2.1.1 Essais de compression d'un assemblage moisé constitué d'une broche (série d'essais C2 et C3)

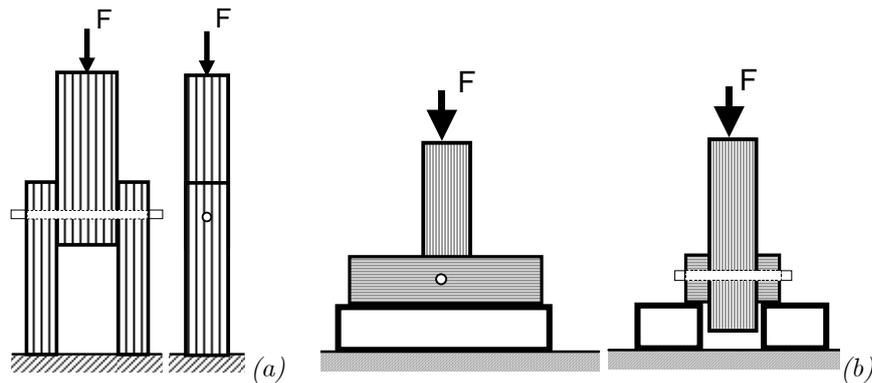


Figure 9-3 Schémas des essais de compression d'un assemblage moisé constitué d'une broche: (a) Compression dans le sens des fibres; (b) Compression des fibres à  $0^\circ$  et à  $90^\circ$ .

- **Fibres sollicitées selon un angle de  $0^\circ$ - $0^\circ$  (Annexe C.2)**

Ces essais, illustrés à la Figure 9-3a, permettent une analyse du comportement d'un assemblage simple composé seulement d'une broche (de diamètre 10, 16 ou 20 mm) assemblant les membrures et comprimant les fibres du bois selon la longueur de son fil. Les épaisseurs des membrures varient de 4 fois le diamètre à 8 fois le diamètre. Les épaisseurs des membrures intérieure et extérieure varient dans un rapport de 1 à 2.

- **Fibres sollicitées selon un angle de  $0^\circ$ - $90^\circ$  (Annexe C.3)**

Ces essais sont inscrits dans la même logique que les essais décrits dans le point précédent mais, dans ce cas, comme le montre la Figure 9-3b, les fibres du bois des membrures extérieures de l'assemblage sont sollicitées selon un angle de  $90^\circ$ , alors que les fibres de la membrure intérieure restent sollicitées selon un angle de  $0^\circ$ .

### 9.2.1.2 Essais de compression d'un assemblage moisé constitué de deux broches (séries d'essais C4, C5 et C6)

Outre l'étude du comportement d'une broche sollicitant les fibres du bois selon un angle déterminé et l'étude d'une broche assemblant trois membrures, des essais sont programmés pour étudier le comportement d'un assemblage constitué de deux broches. Comme le montre la Figure 9-4, trois familles d'essais sont consacrées à cette étude.

Ici, toutes les broches utilisées ont un diamètre de 16 mm. La distance des broches aux bords (dans le sens des fibres ou perpendiculaire aux fibres) est constante dans tous les essais. Toutes les sections de bois sont de la même épaisseur, à savoir 4 fois le diamètre de la broche.

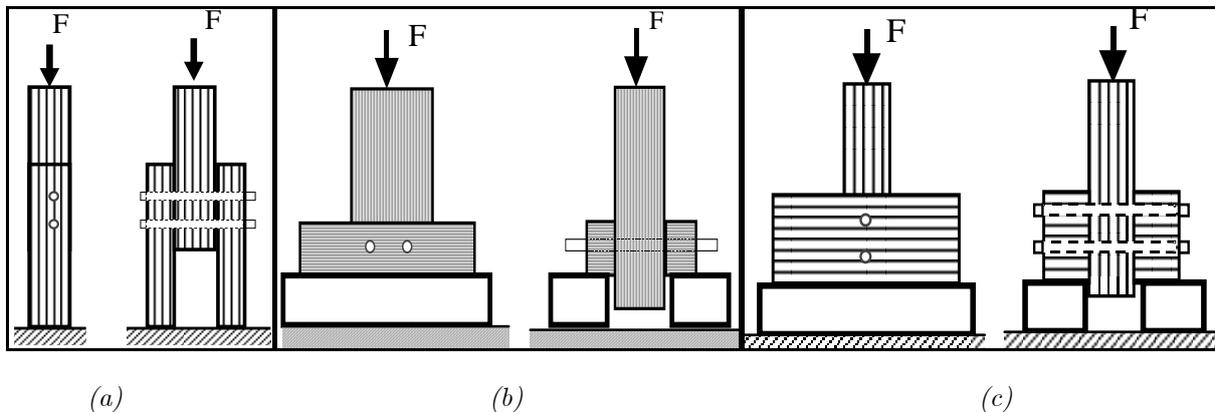


Figure 9-4 Schémas des essais de compression d'un assemblage moisé constitué de deux broches: (a) Compression dans le sens des fibres; (b) Compression des fibres à  $0^\circ$  et à  $90^\circ$ , les broches étant disposées perpendiculairement à la direction de la force; (c) Compression des fibres à  $0^\circ$  et à  $90^\circ$ , les broches étant disposées parallèlement à la direction de la force.

- **Fibres sollicitées selon un angle de  $0^\circ$ - $0^\circ$  (Annexe C.4):**

Dans le premier volet (Figure 9-4a), les membrures sont sollicitées dans le sens des fibres (compression à  $0^\circ$ ). Les deux broches sont alignées parallèlement à la direction de la charge. La distance entre les deux broches varie de 7 fois le diamètre à 10 fois le diamètre de la broche.

- **Fibres sollicitées selon un angle de  $0^\circ$ - $90^\circ$ , broches positionnées perpendiculairement à la direction de l'effort (Annexe C.5):**

Dans le volet suivant (Figure 9-4b), les fibres sont comprimées respectivement à  $0^\circ$  et  $90^\circ$ . Les broches sont alignées perpendiculairement à la direction de la charge et la distance entre les deux broches varie de 7 fois le diamètre à 10 fois le diamètre de la broche. Leur distance au bord dans le sens des fibres est nettement supérieure à leur distance au bord dans le sens perpendiculaire aux fibres, ce qui impose de poser l'élément horizontalement sur des rehausSES.

- **Fibres sollicitées selon un angle de  $0^\circ$ - $90^\circ$ , broches positionnées parallèlement à la direction de l'effort (Annexe C.6):**

Dans le troisième volet (Figure 9-4c), les fibres sont également comprimées à  $0^\circ$  et  $90^\circ$ , mais les broches sont alignées parallèlement à la direction de la charge.

## 9.2.2 Application des forces et instrumentation

Comme le montre le dispositif d'essai illustré à la Figure 9-5, la charge est appliquée à l'assemblage en comprimant la partie supérieure de la membrure centrale. Des éléments métalliques ont été ajoutés au dispositif pour contraindre les pièces à se déplacer verticalement et à garantir ainsi la sécurité de l'opérateur au cours des essais.

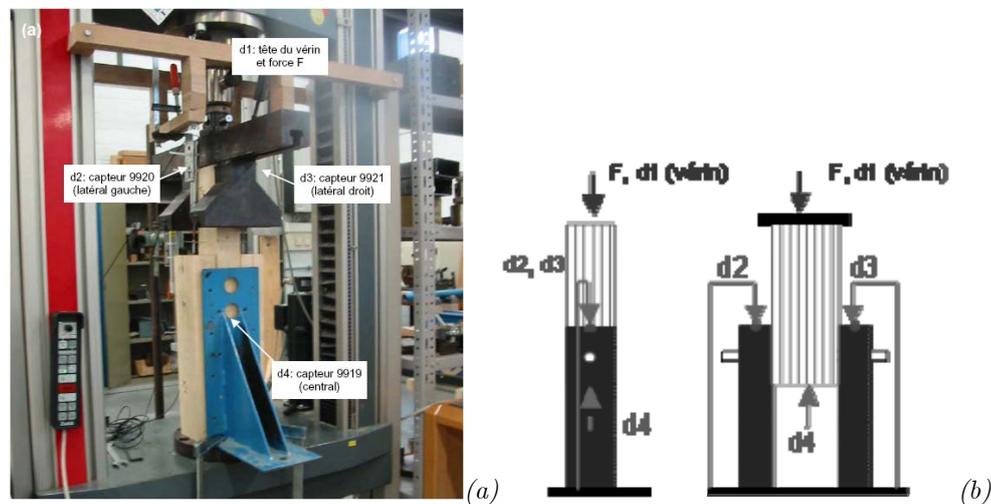


Figure 9-5 (a) Vue générale du dispositif d'essai pour les essais de type "assemblages simples" et (b) Repérage des capteurs.

La force  $F$  appliquée par la presse Zwick et les 4 déplacements ( $d1$ , le déplacement de la tête du vérin;  $d2$  et  $d3$ , aux points C et D des membrures latérales;  $d4$  au point B de la membrure centrale) sont mesurés en continu. La Figure 9-5b montre le montage retenu pour les capteurs  $d2$ ,  $d3$  et  $d4$ .

La charge est appliquée à vitesse constante de déplacement de la tête du vérin (1 mm/min), en 3 cycles de charge-décharge plafonnés à:

- (1) 4 dixièmes de la charge maximale estimée;
- (2) 6 dixièmes de la charge maximale estimée;
- (3) la rupture.

### 9.2.3 Traitement des essais

Comme pour les essais de portance locale, les résultats bruts des essais d'assemblages simples doivent être traités afin d'obtenir les courbes expérimentales désirées utiles et exploitables pour les étapes ultérieures de la recherche.

Au cours d'un essai d'assemblage, quatre courbes caractéristiques principales sont relevées (Figure 9-6):

- la première "def. Structure" correspond à la déformation totale de l'éprouvette,  $d_1$ ;
- la deuxième "def. membre A" correspond à la déformation en compression de la membrure A,  $(d_2+d_3)/2$ ;
- la troisième "def. membre B" correspond à la déformation en compression de la membrure B,  $d_1-d_4$ ;
- la quatrième "def. joint AB" correspond à la déformation locale de l'assemblage due à l'interaction "broche-bois",  $d_4-(d_2+d_3)/2$ .

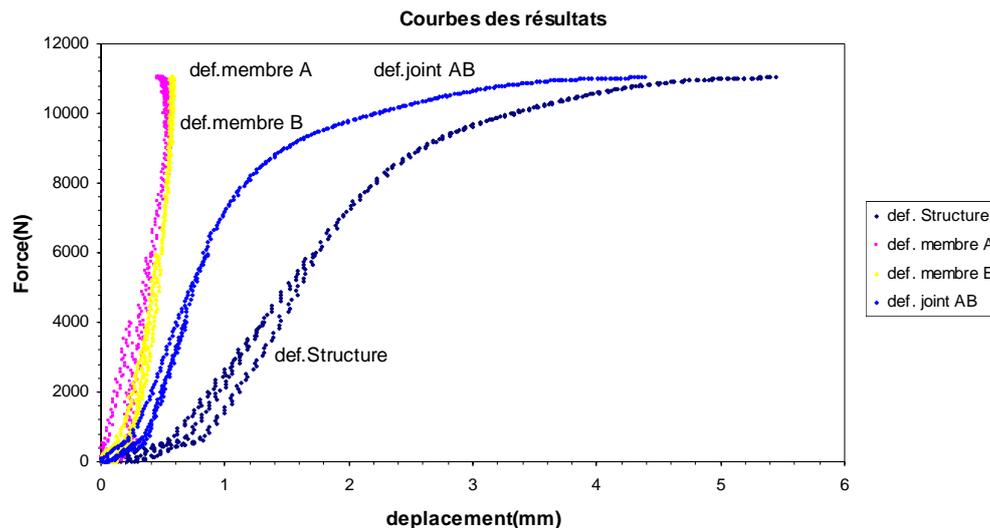


Figure 9-6 Courbes caractéristiques traitées de l'essai mené jusqu'à la ruine

Après avoir effectué le traitement individuel de chacun des essais, une seconde étape consiste à comparer entre eux les essais d'une même série afin de juger de la dispersion des essais, mais aussi d'éventuellement éliminer, après examen détaillé, une courbe "hors-normes" dont, manifestement, l'allure s'éloignerait trop de celle des autres courbes du même groupe.

L'ensemble des résultats de ces différents traitements "post-essais" sont regroupés dans l'Annexe C: §C.2, §C.3, §C.4, §C.5 et §C.6 de la thèse.

La même remarque que pour les essais de portance locale peut être émise: une courbe expérimentale de comportement d'assemblage se compose de cinq phases différentes, de la mise en charge jusqu'à la ruine (Figure 7-6).

### 9.3 Travaux à caractère numérique

Comme nous l'avons mentionné en introduction, le comportement d'un assemblage à plusieurs broches en cisaillement doit être étudié, selon la méthode des composantes, sur base du comportement local de chaque couple "broche-bois" au sein de l'assemblage.

Ainsi qu'expliqué au §8.4 pour les travaux numériques relatifs à la détermination du comportement "broche-bois" des éprouvettes de portance locale, le comportement d'un assemblage à une seule broche est également fondé sur le couplage entre deux comportements 2D dans deux plans perpendiculaires: l'un perpendiculaire à l'axe de la broche et l'autre parallèle à l'axe de la broche. Et à nouveau, deux composantes sont identifiées: la composante "broche" et la composante d'"embedding". La composante "broche" travaille le plus souvent en régime élastique, tandis que la composante d'"embedding" peut travailler même en domaine post-élastique. L'allure non linéaire du comportement "broche-bois" résulte donc souvent du caractère non linéaire de la composante d'"embedding".

#### 9.3.1 Modèle numérique 2D

La Figure 9-7 présente, physiquement, le mode de fonctionnement d'un assemblage simple à une seule broche:

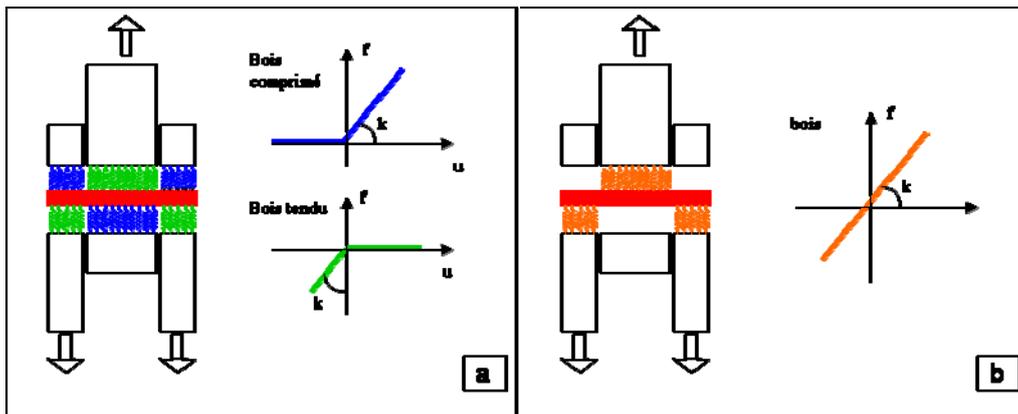


Figure 9-7 Les ressorts peuvent être modélisés: (a) comme agissant uniquement lorsque le bois est comprimé et (b) seulement un ressort d'un côté mais agissant soit en compression, soit en traction.

- Le bois en pression diamétrale (composante d'"embedding") est représenté par des ressorts dont la rigidité a déjà été étudiée dans le chapitre précédent.
- La broche d'acier (composante "broche") est représentée par des éléments "poutre" en interaction avec les ressorts. Comme démontré à §8.5.4.2, la déformation de la broche

à l'effort tranchant est négligeable. La broche est donc uniquement modélisée en flexion.

La Figure 9-7a a proposé un modèle proche de la réalité dans la mesure où des efforts ne se développent dans les ressorts que s'il est physiquement associé à la compression du bois. Pour des raisons de facilité lors des simulations numériques, un modèle simplifié lui est substitué (Figure 9-7b) dans lequel des ressorts sont disposés d'un seul côté de la broche et travaillent aussi bien en traction qu'en compression. Les conditions de bord du modèle sont décrites en détail à la Figure 9-8.

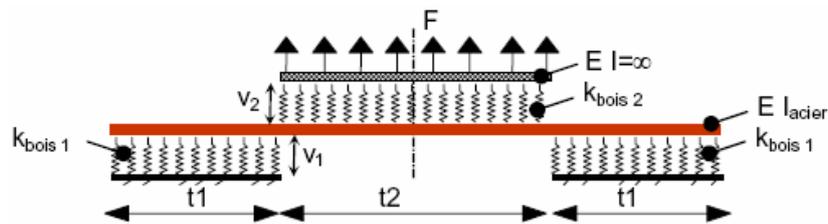


Figure 9-8 Modèle 2D numérique d'un assemblage à une seule broche simplement cisailé

## 9.3.2 Intégration du comportement des composantes

### 9.3.2.1 Composante "broche"

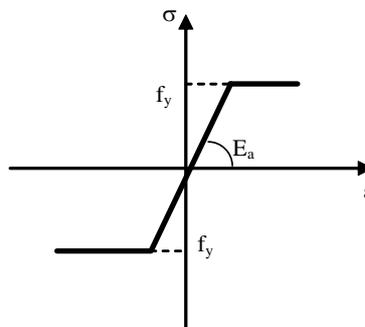


Figure 9-9 Matériau élastique parfaitement plastique.

La composante "broche" en acier est supposée être constituée d'un matériau à comportement élastique-parfaitement plastique dont les caractéristiques sont:  $E_a = 0.21 \times 10^6 \text{ N/mm}^2$  et  $f_y = 500 \text{ N/mm}^2$ . La limite élastique  $f_y$  peut légèrement varier dans la réalité, mais une valeur moyenne est satisfaisante, car elle n'influence pas beaucoup le comportement "broche-bois". En effet, sous un chargement quelconque, le bois travaille en général en régime élasto-plastique, tandis que la broche reste souvent en régime élastique. De toute façon, l'objectif de la thèse est limité à l'étude du comportement élastique d'un assemblage.

### 9.3.2.2 Composante d'"embedding"

Dans le chapitre précédent, le comportement de la composante d'"embedding", surtout son comportement élastique, a pu être déterminé par le modèle numérique proposé (au §8.4.1). Ce dernier a été validé au travers de comparaisons avec les essais expérimentaux. Lorsque le comportement bilinéaire des composantes d'"embedding" est déterminé sur base des caractéristiques mécaniques des bois étudiés, il est ensuite introduit dans les éléments de ressorts " $k_{\text{bois } 1}$ " et " $k_{\text{bois } 2}$ " du modèle de la Figure 9-8 pour la prédiction du comportement de l'assemblage étudié.

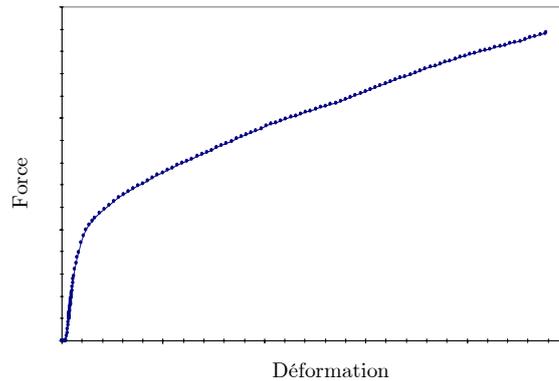


Figure 9-10 Comportement numérique fortement bilinéaire d'une composante d'"embedding" généré par le modèle numérique.

Puisque le bois utilisé pour les éprouvettes d'assemblage est identique à celui utilisé pour les éprouvettes de portance locale, tous les résultats relatifs au comportement d'"embedding" obtenus à partir du modèle numérique peuvent être réutilisés et introduits dans le modèle numérique d'assemblage.

### 9.3.3 Traitement des résultats numériques

Sur base du modèle proposé à la Figure 9-8, les simulations numériques sont générées pour les différentes configurations d'assemblage, qui dépendent du diamètre de la broche (D10, D16 et D20), des épaisseurs des membrures (4D-4D-4D, 4D-8D-4D et 8D-8D-8D) et de la position des membrures moisées ( $0^\circ-0^\circ$  et  $0^\circ-90^\circ$ ). Ces configurations ont aussi été choisies pour les éprouvettes d'assemblage C2 et C3 présentées au §9.2.1.

Les résultats des simulations numériques sont traités et comparés au §9.5 avec les essais expérimentaux afin de valider le modèle numérique 2D proposé.

## 9.4 Travaux à caractère analytique

### 9.4.1 Assemblages à une broche en cisaillement

L'approche analytique adoptée pour l'étude du comportement d'un assemblage simple à une broche est tout à fait similaire à l'approche numérique. Si ce n'est que, ici, le caractère continu du bois est modélisé. Dans les simulations numériques, le bois est discrétisé par un ensemble de ressorts équivalents; quant à l'approche analytique basée sur la théorie des milieux continus, elle ne nécessite pas telle discrétisation. Dans le modèle analytique (Figure 9-11), le bois est donc modélisé de manière continue pour représenter le comportement de la composante d'"embedding".

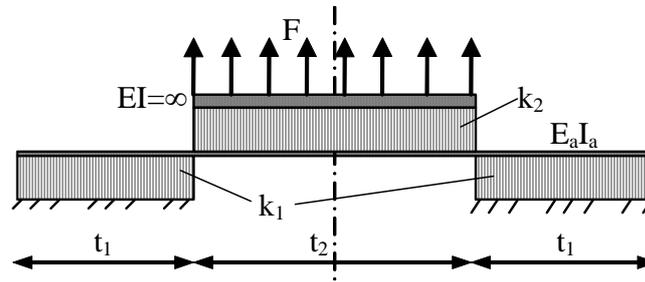


Figure 9-11 Modèle 2D analytique d'un assemblage à une seule broche simplement cisailé

A partir du modèle proposé, une formule analytique (9.1) pour la prédiction de la rigidité élastique d'un assemblage à une broche est établie. La théorie pour l'établissement de cette formule est expliquée dans l'annexe B.

$$\begin{aligned}
 K_{lc} = & 4k_1k_2 \{ [\sin(2t_1\beta_1) + \sinh(2t_1\beta_1)][\sin(t_2\beta_2) + \sinh(t_2\beta_2)]k_2\beta_1^3 \\
 & - [-2 + \cos(2t_1\beta_1) + \cosh(2t_1\beta_1)][\cos(t_2\beta_2) - \cosh(t_2\beta_2)]k_1\beta_2^3 \} / \\
 & \{ 2[-2 + \cos(2t_1\beta_1) + \cosh(2t_1\beta_1)][\sin(t_2\beta_2) + \sinh(t_2\beta_2)]k_2^2\beta_1^4 + \\
 & 2[-2 + \cos(2t_1\beta_1) + \cosh(2t_1\beta_1)][\sin(t_2\beta_2) + \sinh(t_2\beta_2)]k_1^2\beta_2^4 + \\
 & 4k_1k_2\beta_1\beta_2 [(\cos(t_2\beta_2) + \cosh(t_2\beta_2))(\sin(2t_1\beta_1) + \sinh(2t_1\beta_1))\beta_1^2 + \\
 & (\cos(2t_1\beta_1) - \cosh(2t_1\beta_1))(\sin(t_2\beta_2) - \sinh(t_2\beta_2))\beta_1\beta_2 + \\
 & (\cos(t_2\beta_2) - \cosh(t_2\beta_2))(\sin(2t_1\beta_1) - \sinh(2t_1\beta_1))\beta_2^2 \} \}
 \end{aligned} \tag{9.1}$$

où:

$$\beta_i = \sqrt[4]{\frac{k_i}{4E_a I_a}} \tag{9.2}$$

La rigidité linéaire d'un assemblage constitué d'une seule broche est exprimée en fonction des paramètres:  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  et  $E_a I_a$ . Ces derniers sont la rigidité en flexion de la broche, les épaisseurs des membrures intérieure et extérieure et les modules d'"embedding" de ces dernières.

Pour un assemblage dont les membrures, souvent de même classe de bois, sont assemblées parallèlement aux fibres,  $k_i$  est égale à  $k_2$ , par conséquent,  $\beta_1 = \beta_2$ . Si, comme cela peut souvent être le cas,  $t_1 = 0.5t_2$ , l'expression de la rigidité élastique de l'assemblage donnée par la formule (9.1) se simplifie comme suit:

$$K_{1c} = \frac{(2 \cos(2t_1\beta_1) - \cos(4t_1\beta_1) - 2 \cosh(2t_1\beta_1) + \cosh(4t_1\beta_1) + 2 \sin(2t_1\beta_1) \sinh(2t_1\beta_1))k_1}{2(\sin(4t_1\beta_1) + \sinh(4t_1\beta_1))\beta_1} \quad (9.3)$$

### 9.4.2 Assemblages à plusieurs broches en cisaillement, moisés à 0°-0°

Soit un assemblage en cisaillement dont les rangées de broches sont disposées sur une ligne parallèle à la direction d'application des forces, Figure 9-12:

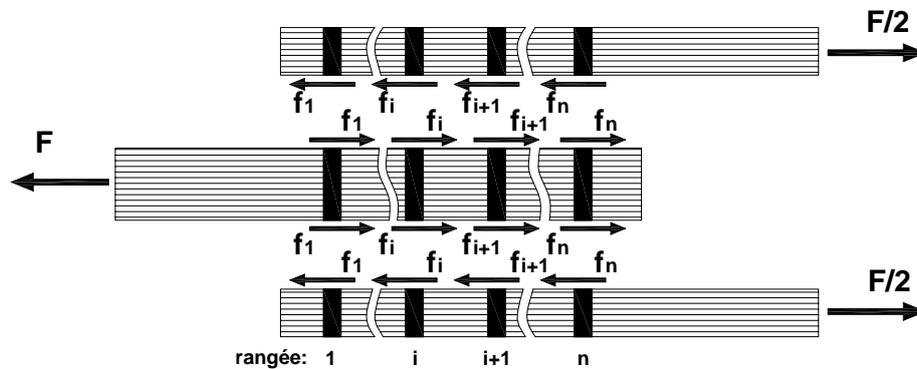


Figure 9-12 Assemblage en cisaillement simple constitué de plusieurs rangées de broches disposées sur une ligne parallèle à la force appliquée.

Plusieurs études sur la distribution des efforts entre les rangées de connecteurs (dont les broches) d'un assemblage mécanique ont été développées antérieurement par [LAN-1969], [CRA-1968], [WIL-1986]...afin de prédire sa résistance en cisaillement. Dans le cadre de cette thèse, l'article [WIL-1986] est modifié et adapté en vue du développement d'un modèle analytique portant sur le comportement élastique d'un assemblage à plusieurs broches en cisaillement; les éléments suivants sont pris en compte:

- la déformation locale due à l'interaction "broche-bois" (l'estimation de ce type de déformation a déjà été étudiée analytiquement au §9.4.1);
- la déformation des membrures relative entre les rangées de broches.

#### 9.4.2.1 Modèle à "poutres"

Dans un assemblage mécanique, les efforts sont transmis de la membrure centrale aux deux membrures latérales grâce aux broches. Ces dernières sont supposées être initialement en contact parfait avec le bois. Le comportement d'un tronçon  $i$  de l'assemblage, entre la rangée  $i$  et la rangée  $i+1$ , peut être traduit par le modèle analytique présenté à la Figure 9-13:

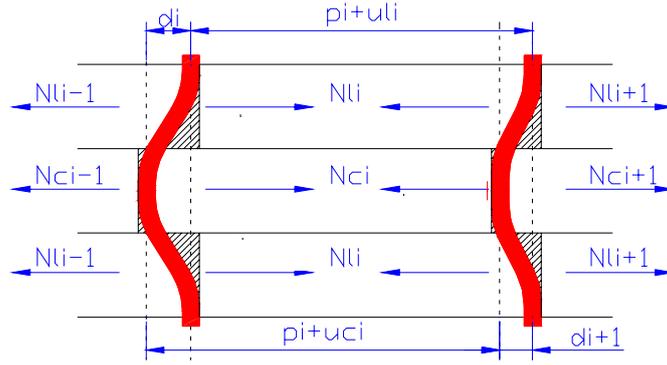


Figure 9-13 La déformation d'un tronçon  $i$  de l'assemblage entre deux rangées  $i$  et  $i+1$ .

En réalité, la pression transmise d'une rangée de broches à la section d'une membrure n'est pas tout à fait uniforme. Dans le modèle proposé, cette pression est pourtant supposée comme uniformément répartie sur l'épaisseur des membrures. Ceci permet en fait de considérer que la déformation d'une membrure relative entre les rangées de broches provient simplement d'une traction ou compression simple.

La Figure 9-13 présente la membrure centrale, dont la rigidité en traction (compression) de la section vaut  $E_c A_c$ , et les deux membrures latérales, dont la rigidité en traction (compression) de la section de chacune vaut  $E_l A_l$ . La rigidité élastique  $K_i$  du comportement "broche-bois" de la rangée  $i$  constituée de  $m_i$  broches peut être estimée par la formule (9.1) ( $K_i = m_i K_{lc}$ ). La distance entre deux rangées  $i$  et  $i+1$  est  $p_i$ . Après la déformation de l'assemblage, elle devient  $p_i + u_{ci}$  pour la membrure centrale et  $p_i + u_{li}$  pour la membrure latérale. Les broches de la rangée  $i$  (resp.  $i+1$ ) se déforment d'une quantité  $d_i$  (resp.  $d_{i+1}$ ). La compatibilité de déformation d'un tronçon  $i$  de l'assemblage peut être exprimée par l'équation suivante:

$$p_i + u_{li} + d_i = p_i + u_{ci} + d_{i+1} \quad (9.4)$$

ou:

$$u_{li} + d_i = u_{ci} + d_{i+1} \quad (9.5)$$

Supposons que la force extérieure est appelée  $F$ , l'effort tranchant transmis à la broche  $i$ ,  $f_i$ , et l'effort normal agissant sur le tronçon  $i$  entre deux rangées  $i$  et  $i+1$  de la membrure centrale (resp. latérale),  $N_{ci}$  (resp.  $N_{li}$ ). Par la condition d'équilibre statique, on a donc:

$$N_{ci} = F - 2 \sum_{j=1}^i f_j \quad (9.6)$$

et:

$$N_{li} = \sum_{j=1}^i f_j \quad (9.7)$$

De (9.6) et (9.7), on tire:

$$N_{ci} = F - 2N_{li} \quad (9.8)$$

Il est également conseillé de minimiser la taille des assemblages autant que possible par rapport aux dimensions des éléments structuraux. Ceci nous conduit à disposer le maximum de connecteurs possible sur une rangée afin de réduire la longueur des assemblages. Mais la distance entre les connecteurs et entre les connecteurs et le bord des éléments structuraux doit également respecter des valeurs minimales (Tableau 8-5 de l'EC5) pour éviter des problèmes de fendage excessif. De plus, il est également conseillé de disposer les connecteurs répartis régulièrement, et d'éviter de grands espacements entre connecteurs ou entre les connecteurs et le bord des éléments structuraux. Si tout cela est bien respecté, nous pouvons supposer que les efforts transmis des connecteurs d'une rangée à la section d'une membrure sont répartis de manière assez "uniforme". Alors, la déformation longitudinale d'une plage  $i$  de la membrure centrale (resp. latérale) située entre deux rangées  $i$  et  $i+1$  et soumise à  $N_{ci}$  (resp.  $N_{li}$ ) sera calculée d'après (9.9) (resp. (9.10)):

$$u_{ci} = \frac{N_{ci} p_i}{E_c A_c} \quad (9.9)$$

$$u_{li} = \frac{N_{li} p_i}{E_l A_l} \quad (9.10)$$

La déformation locale "broche-bois" de chaque rangée  $i$  peut être déterminée par la formule (9.11) ou (9.12), (à voir §9.4.1).

$$d_i = \frac{N_{c\ i-1} - N_{ci}}{K_i} \quad (9.11)$$

et:

$$d_{i+1} = \frac{N_{ci} - N_{c\ i+1}}{K_{i+1}} \quad (9.12)$$

En introduisant les expressions (9.9), (9.10), (9.11) et (9.12) dans l'équation (9.5), on obtient alors:

$$\frac{N_{li} p_i}{E_l A_l} + \frac{N_{c\ i-1} - N_{ci}}{K_i} = \frac{N_{ci} p_i}{E_c A_c} + \frac{N_{ci} - N_{c\ i+1}}{K_{i+1}} \quad (9.13)$$

et en introduisant (9.8) dans (9.13), l'équation de base fournissant la rigidité élastique d'un assemblage en cisaillement peut être écrite:

$$-\frac{1}{K_i}N_{c\ i-1} + \left(\frac{P_i}{E_c A_c} + \frac{P_i}{2E_l A_l} + \frac{1}{K_i} + \frac{1}{K_{i+1}}\right)N_{ci} - \frac{1}{K_{i+1}}N_{c\ i+1} = \frac{Fp_i}{2E_l A_l} \quad (i = 1, n-1) \quad (9.14)$$

Il faut noter que  $N_{c0} = F$  et  $N_{cn} = 0$ .

A partir de l'équation (9.14), les valeurs  $N_{ci}$  ( $i = 1, n$ ) peuvent être déterminées. Si la déformation globale de l'assemblage est appelée  $\Delta$ , l'équation (9.15) donne:

$$\Delta = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{N_{ci} P_i}{E_c A_c} + \frac{N_{c\ n-1}}{K_n} \quad (\text{d'après les } N_{ci}, i = 1, n) \quad (9.15)$$

ou:

$$\Delta = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{N_{li} P_i}{E_l A_l} + \frac{2N_{l1}}{K_1} \quad (\text{d'après les } N_{li}, i = 1, n) \quad (9.16)$$

Dans le cas de la charge unitaire ( $F = 1$ ), la déformation globale de l'assemblage  $[\Delta]$  devient une valeur qui caractérise la souplesse de l'assemblage:

$$[\Delta] = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{N_{ci}^* P_i}{E_c A_c} + \frac{N_{c\ n-1}^*}{K_n} \quad (9.17)$$

Alors que l'inverse de  $[\Delta]$  nous fournit la rigidité élastique de l'assemblage en cisaillement:

$$K_{ac} = \frac{1}{[\Delta]} \quad (9.18)$$

L'équation (9.14) peut être développée sous une autre forme en utilisant les variables  $\varepsilon_{ci}$  qui représente la déformation d'un tronçon  $i$  de la membrure centrale relative entre deux rangées  $i$  et  $i+1$ :

$$\varepsilon_{ci} = \frac{N_{ci}}{E_c A_c} \quad (9.19)$$

Dans ce cas ci, l'équation (9.14) s'écrit comme suit:

$$-\frac{E_c A_c}{K_i P_i} \varepsilon_{c\ i-1} + \left(1 + \frac{E_c A_c}{2E_l A_l} + \frac{E_c A_c}{K_i P_i} + \frac{E_c A_c}{K_{i+1} P_i}\right) \varepsilon_{ci} - \frac{E_c A_c}{K_{i+1} P_i} \varepsilon_{c\ i+1} = \frac{F}{2E_l A_l} \quad (9.20)$$

La déformation de l'assemblage sous application d'une force  $F$  devient donc:

$$\Delta = \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{ci} P_i + \frac{E_c A_c}{K_n} \varepsilon_{c\ n-1} \quad (9.21)$$

Et la caractéristique de souplesse de l'assemblage s'écrit alors:

$$[\Delta] = \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_{ci}^* p_i + \frac{E_c A_c}{K_n} \varepsilon_{c\ n-1}^* \tag{9.22}$$

### 9.4.2.2 Quelques cas pratiques

Dans la pratique, on cherche normalement à garder la section des éléments assemblés (de même classe de bois) constante, donc  $E_l A_l = 0.5 E_c A_c$ , la distance entre les rangées constante, donc  $p_i = p$ , et le nombre de connecteurs de chaque rangée constant, donc  $m_i = m$  (c-à-d  $K_i = m K_{Ic} = K_{mc}$ ). En utilisant l'équation (9.18) proposée, la rigidité élastique d'un assemblage est alors estimée, selon le nombre de rangées, comme indiqué au Tableau 9-1:

Nombre des rangées	Rigidité de l'assemblage
2	$\frac{2}{1 + \frac{K_{mc} p}{E_c A_c}} K_{mc}$
3	$\frac{3 + 2 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c}}{1 + 4 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + 2 \left( \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} \right)^2} K_{mc}$
4	$\frac{4 \left( 1 + \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} \right)}{1 + 8 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + 6 \left( \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} \right)^2} K_{mc}$
5	$\frac{5 + 10 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + 4 \left( \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} \right)^2}{1 + 14 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + 22 \left( \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} \right)^2 + 8 \left( \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} \right)^3} K_{mc}$

Tableau 9-1 Rigidité d'un assemblage en cisaillement, moisé à 0°-0°.

### 9.4.3 Assemblages à plusieurs broches en cisaillement, moisés à 0°-α°

Un assemblage moisé à 0°-α° se rencontre souvent dans une structure. Cela permet de changer de direction d'un élément structural à l'autre, afin de former une ossature complète, Figure 9-14:

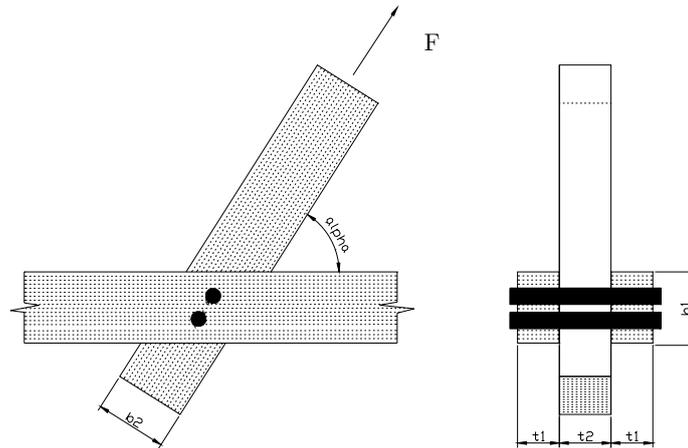


Figure 9-14 Un assemblage en cisaillement simple constitué de plusieurs rangées de broches, moisé à  $0^\circ$ - $\alpha^\circ$ .

### 9.4.3.1 Modèle à "poutres"

Sous l'application d'une force extérieure, la membrure centrale soumise à traction transmet les efforts aux deux membrures extérieures par l'intermédiaire des broches. La description mécanique de la répartition des efforts entre les membrures sous l'application d'une charge extérieure est manifestement similaire à ce qui est mentionné au §9.4.2. Mais dans ce cas-ci, les membrures latérales reprennent les efforts avec un angle de compression  $\alpha$  par rapport à leurs fibres. La déformation des deux membrures latérales relative entre deux rangées successives est plus difficile à évaluer.

Normalement, pour un assemblage, soit  $\alpha$  est nul, soit la valeur de  $\alpha$  est effectivement importante. La deuxième possibilité est le cas traité dans cette thèse. Dans ce contexte, la déformation des membrures latérales, entre deux rangées successives, due à la traction (compression) est très faible et peut donc être négligée par rapport à la déformation locale, due à l'interaction "broche-bois". En effet, d'un côté, la section fictive perpendiculaire et soumise à traction (compression) augmente en fonction de  $\alpha$  et donc la déformation des membrures latérales entre les rangées diminue; d'un autre côté, la déformation locale "broche-bois" augmente lorsque l'angle augmente de  $0^\circ$  vers  $90^\circ$ .

Alors, l'équation de la compatibilité de déformation (9.5) peut être réécrite comme suit:

$$d_i = u_{ci} + d_{i+1} \quad (9.23)$$

De la même manière que le cas précédent, on arrive aux équations de base pour la détermination de la rigidité élastique d'un assemblage en cisaillement moisé à  $0^\circ$ - $\alpha^\circ$ :

$$-\frac{1}{K_i} N_{c\ i-1} + \left( \frac{p_i}{E_c A_c} + \frac{1}{K_i} + \frac{1}{K_{i+1}} \right) N_{ci} - \frac{1}{K_{i+1}} N_{c\ i+1} = 0 \quad (d'après\ N_{ci},\ i = 1, n-1) \quad (9.24)$$

et:

$$-\frac{E_c A_c}{K_i p_i} \varepsilon_{c\ i-1} + \left(1 + \frac{E_c A_c}{K_i p_i} + \frac{E_c A_c}{K_{i+1} p_i}\right) \varepsilon_{ci} - \frac{E_c A_c}{K_{i+1} p_i} \varepsilon_{c\ i+1} = 0 \quad (\text{d'après } \varepsilon_{ci}, i = 1, n-1) \quad (9.25)$$

### 9.4.3.2 Quelques cas pratiques

Dans la pratique, on cherche normalement à garder la section des éléments assemblés (de même classe de bois) constante, donc  $E_l A_l = 0.5 E_c A_c$ , la distance entre les rangées constante, donc  $p_i = p$ , et le nombre de connecteurs de chaque rangée constant, donc  $m_i = m$  (c-à-d  $K_i = m K_{1c} = K_{mc}$ ). En utilisant l'équation (9.24) proposée, la rigidité élastique d'un assemblage peut alors être estimée, selon le nombre de rangées, comme indiqué au Tableau 9-2.

Nombre de rangées	Rigidité de l'assemblage
2	$2 + \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} K_{mc}$
3	$\frac{\left(1 + \frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right) \left(3 + \frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)}{1 + 3 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + \left(\frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)^2} K_{mc}$
4	$\frac{\left(2 + \frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right) \left(2 + 4 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + \left(\frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)^2\right)}{1 + 6 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + 5 \left(\frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)^2 + \left(\frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)^3} K_{mc}$
5	$\frac{\left(1 + 3 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + \left(\frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)^2\right) \left(5 + 5 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + \left(\frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)^2\right)}{1 + 10 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + 15 \left(\frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)^2 + 7 \left(\frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)^3 + \left(\frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)^4} K_{mc}$

Tableau 9-2 Rigidité d'un assemblage en cisaillement, moisé à  $0^\circ$ - $\alpha^\circ$ .

## 9.5 Validation des modèles numérique et analytique

Dans les travaux de validation présentés ci-après, le comportement des assemblages est traduit par des courbes "force-déplacement". Ces courbes expriment la relation entre la force appliquée et le déplacement correspondant.

Il est constaté que le comportement semi-rigide des assemblages en bois résulte principalement d'interactions "broche-bois" constitués de deux composantes: composante "broche" et composante d'"embedding" et que son allure non linéaire provient du caractère non linéaire de la composante d'"embedding". Le comportement de cette dernière, caractérisé par 5 phases de

chargement (voir §7.3.1.2.3), peut expliquer que les phases de chargement du comportement des assemblages sont eux aussi identiques (Figure 9-15).

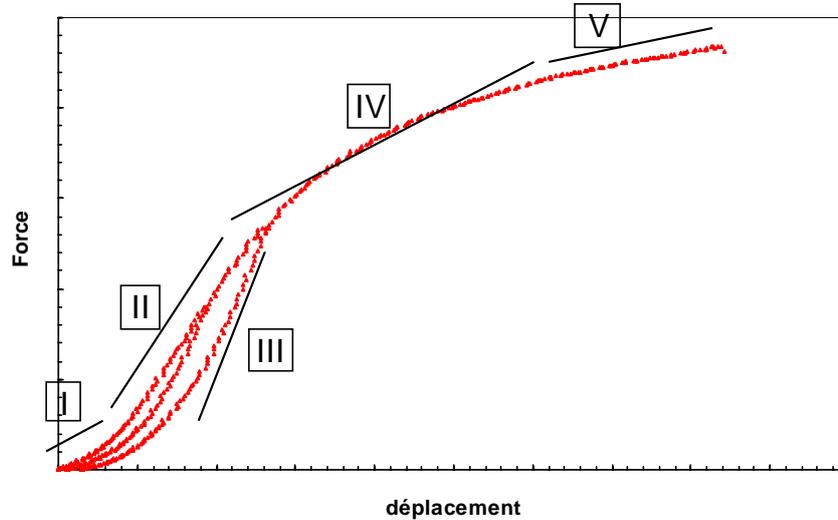


Figure 9-15 Phases caractéristiques du comportement des assemblages: phase I (mise en place), phase II (1<sup>er</sup> chargement), phase III (déchargement-rechargement), phase IV (élasto-plastique), phase V (amorces de ruine).

Dans les faits, le bois sera soumis souvent au déchargement-rechargement, ce qui correspond à la phase III de la courbe de comportement. C'est dans cette phase que la rigidité "élastique" des assemblages doit être mesurée et comparée à celle des modèles proposés. Pour le modèle numérique, quant à ses résultats non linéaires, ces derniers seront vérifiés par l'ensemble des phases III, IV et V des courbes expérimentales.

### 9.5.1 Assemblages à une seule broche en cisaillement

Les modèles 2D proposés aux paragraphes relatifs aux travaux à caractères numérique et analytique permettent de "reconstruire" le comportement des assemblages en cisaillement testés en laboratoire. Par voie numérique (§9.3), l'introduction du comportement complet des composantes d'"embedding" (modèle 2D numérique proposé au §8.4.1) et de la composante "broche" dans le modèle 2D numérique de la Figure 9-8 permet d'obtenir numériquement le comportement semi-rigide des éprouvettes d'assemblage en cisaillement. Analytiquement, l'introduction du comportement élastique des composantes d'"embedding" (modèle 2D analytique proposé au §8.5.1) et de la composante "broche" dans le modèle 2D analytique de la Figure 9-11 permet d'obtenir le comportement élastique de ces mêmes éprouvettes d'assemblage.

Dans les diagrammes comparatifs présentés de §9.5.1.1 à §9.5.1.2, trois types de courbes peuvent être identifiés:

- les courbes expérimentales sont notées "(i)def. jointAB, i=1, 2, 3...";

- la courbe "simu." présente le comportement des éprouvettes d'assemblage obtenu par voie numérique;
- la courbe "Ana." présente le comportement élastique des éprouvettes d'assemblage obtenu par voie analytique.

### 9.5.1.1 Assemblages à une broche, moisés à 0°-0° (C2)

#### 9.5.1.1.1 Assemblages à une broche D10, moisés à 0°-0°

- Assemblages à une broche D10, membrures 4D-4D-4D, moisés à 0°-0°:

La Figure 9-16 présente les résultats pour les éprouvettes d'assemblage à une broche D10 avec des membrures 4D-4D-4D moisés à 0°-0°. Les rigidités initiales numérique et analytique sont en bon accord, mais légèrement plus grandes que les rigidités initiales des courbes expérimentales. La courbe numérique représente bien le comportement de l'assemblage.

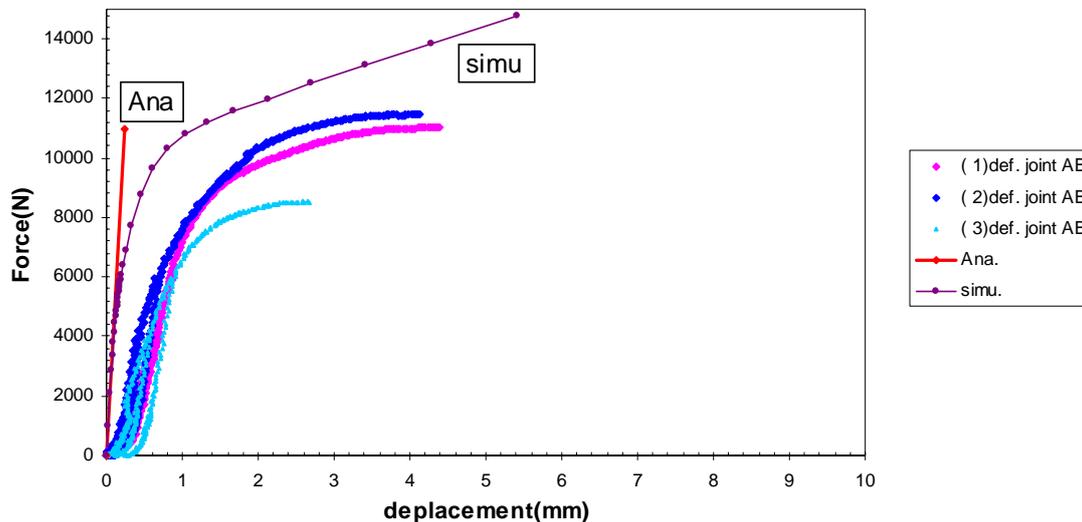


Figure 9-16 Courbes de comportement d'assemblage "force-déformation" expérimentales, numérique et analytique, éprouvettes d'assemblage à une broche D10, membrures 4D-4D-4D moisés à 0°-0°.

La Figure 9-17 présente les résultats pour les éprouvettes d'assemblage à une broche D10 avec les membrures 4D-8D-4D moisés à 0°-0°. Les rigidités initiales numérique et analytique sont semblables à une courbe expérimentale, la "(1)def. jointAB", mais légèrement plus grandes que la rigidité des autres. La courbe numérique représente assez bien le comportement de l'assemblage.

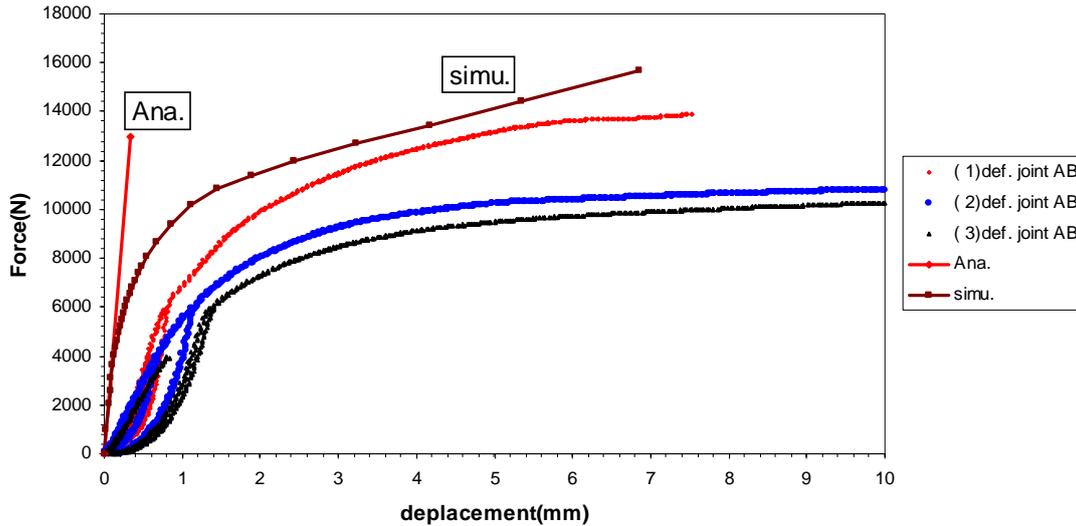


Figure 9-17 Courbes de comportement d'assemblage "force-déformation" expérimentales, numérique et analytique, éprouvettes d'assemblage à une broche D10, membrures 4D-8D-4D moisées à 0°-0°.

- Assemblages à une broche D10, membrures 8D-8D-8D moisées à 0°-0°:

La Figure 9-17 présente les résultats pour les éprouvettes d'assemblage à une broche D10 avec les membrures 8D-8D-8D moisées à 0°-0°. Les rigidités initiales numérique et analytique sont très similaires aux courbes expérimentales. La courbe numérique représente presque parfaitement le comportement de l'assemblage.

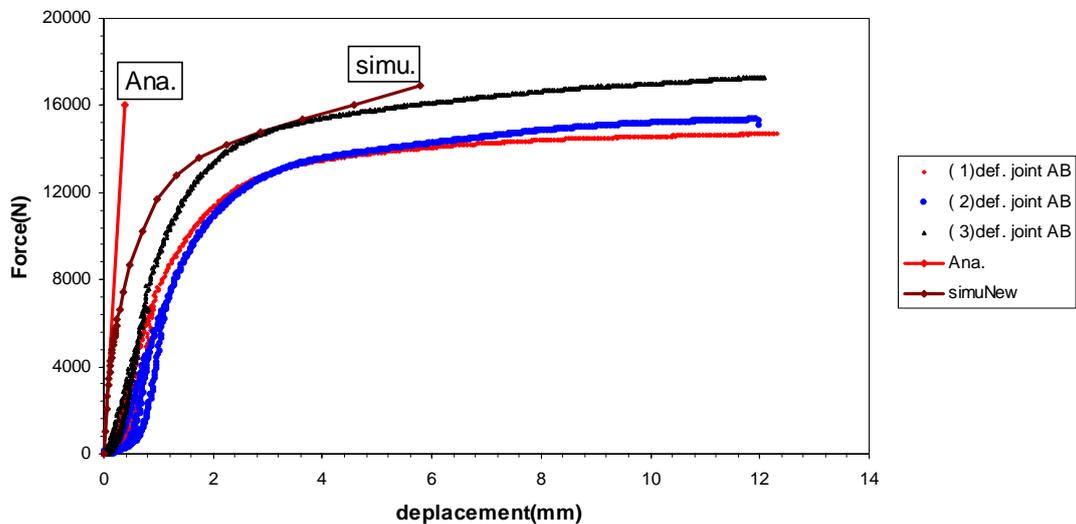


Figure 9-18 Courbes de comportement d'assemblage "force-déformation" expérimentales, numérique et analytique, éprouvettes d'assemblage à une broche D10, membrures 8D-8D-8D moisées à 0°-0°.

### 9.5.1.1.2 Assemblages à une broche D16, moisés 0°-0°

- Assemblages à une broche D16, membrures 4D-4D-4D moisées à 0°-0°:

La Figure 9-19 présente les résultats pour les éprouvettes d'assemblage à une broche D16 avec les membrures 4D-4D-4D moisées à 0°-0°. Les rigidités initiales numérique et analytique

sont semblables aux courbes expérimentales. La courbe numérique représente bien le comportement de l'assemblage.

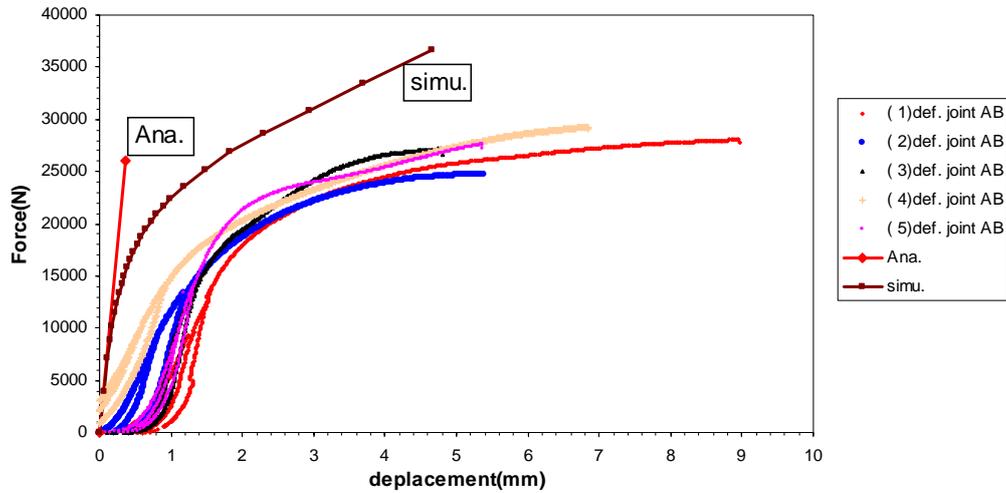


Figure 9-19 Courbes de comportement d'assemblage "force-déformation" expérimentales, numérique et analytique, éprouvettes d'assemblage à une broche D16, membrures 4D-4D-4D moisées à 0°-0°.

- Assemblages à une broche D16, membrures 4D-8D-4D moisées à 0°-0°:

La Figure 9-20 présente les résultats pour les éprouvettes d'assemblage à une broche D16 avec les membrures 4D-8D-4D moisées à 0°-0°. Les rigidités initiales numérique et analytique sont en bon accord et assez semblables à celles des courbes expérimentales. La courbe numérique montre une résistance supérieure à celle des courbes expérimentales.

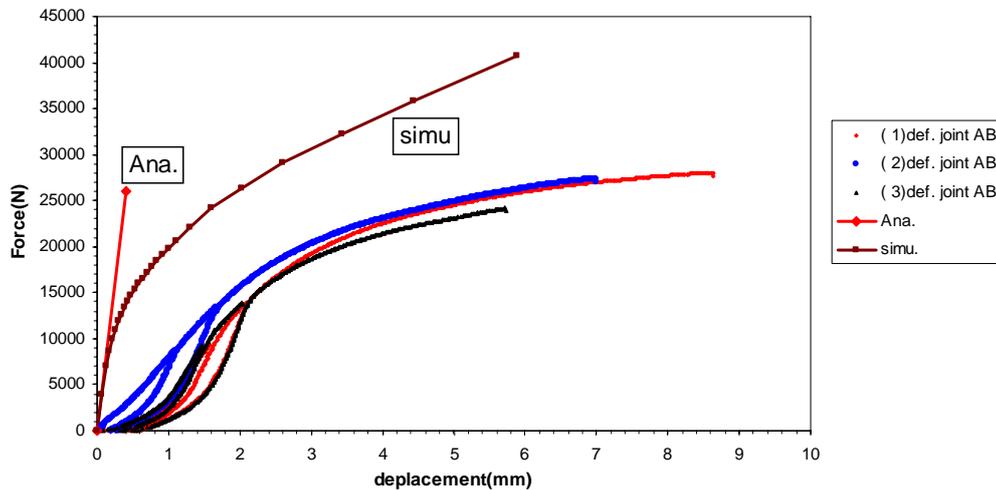


Figure 9-20 Courbes de comportement d'assemblage "force-déformation" expérimentales, numérique et analytique, éprouvettes d'assemblage à une broche D16, membrures 4D-8D-4D moisées à 0°-0°.

- Assemblages à une broche D16, membrures 8D-8D-8D moisées à 0°-0°:

La Figure 9-21 présente les résultats pour les éprouvettes d'assemblage à une broche D16 avec les membrures 8D-8D-8D moisées à 0°-0°. Les rigidités initiales numérique et analytique

sont semblables avec celles des courbes expérimentales. La courbe numérique représente bien le comportement de l'assemblage.

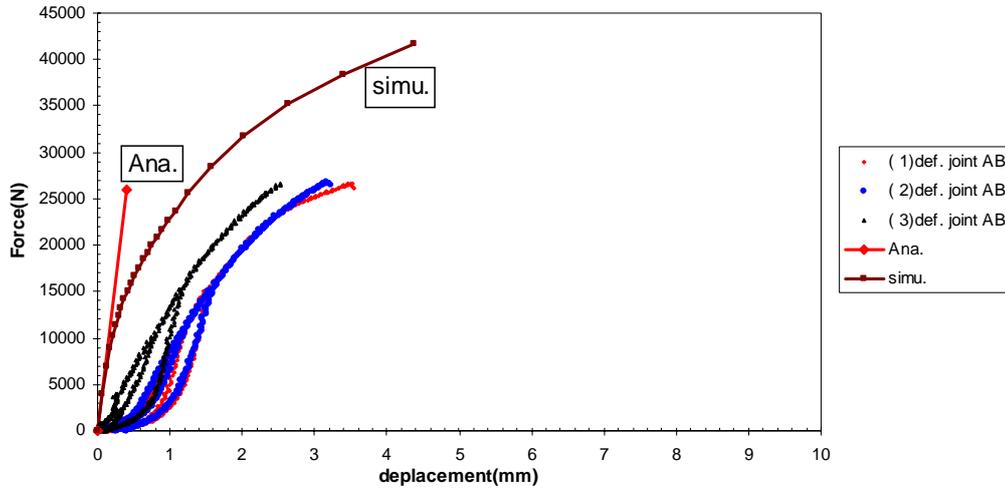


Figure 9-21 Courbes de comportement d'assemblage "force-déformation" expérimentales, numérique et analytique, éprouvettes d'assemblage à une broche D16, membrures 8D-8D-8D moisées à 0°-0°.

### 9.5.1.1.3 Assemblages à une broche D20, moisés 0°-0°

- Assemblages à une broche D20, membrures 4D-4D-4D moisées à 0°-0°:

La Figure 9-22 présente les résultats pour les éprouvettes d'assemblage à une broche D20 avec les membrures 4D-4D-4D moisées à 0°-0°. Les rigidités initiales numérique et analytique sont semblables à celles des courbes expérimentales. La courbe numérique représente bien le comportement de l'assemblage.

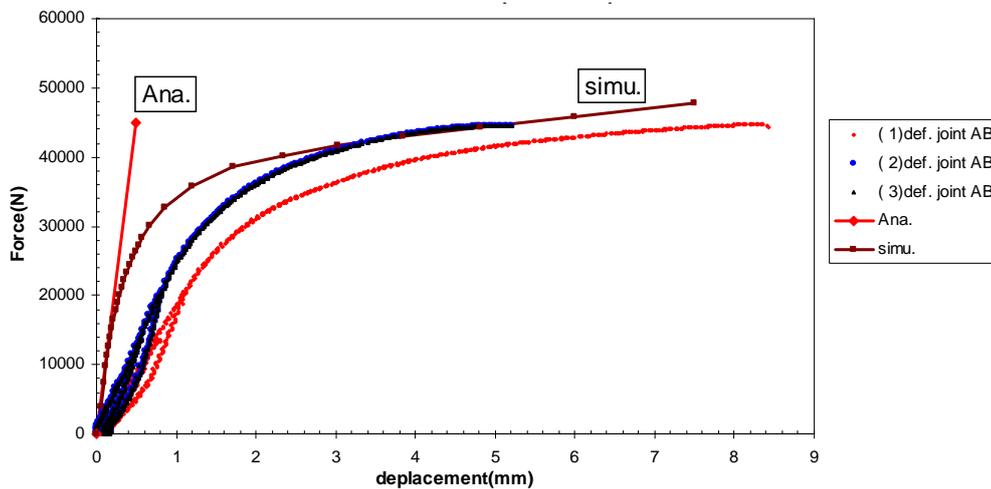


Figure 9-22 Courbes de comportement d'assemblage "force-déformation" expérimentales, numérique et analytique, éprouvettes d'assemblage à une broche D20, membrures 4D-4D-4D moisées à 0°-0°.

- Assemblages à une broche D20, membrures 8D-8D-8D moisées à 0°-0°:

Les rigidités initiales numérique et analytique sont similaires à celles des courbes expérimentales. La courbe numérique représente très bien le comportement de l'assemblage (Figure 9-23).

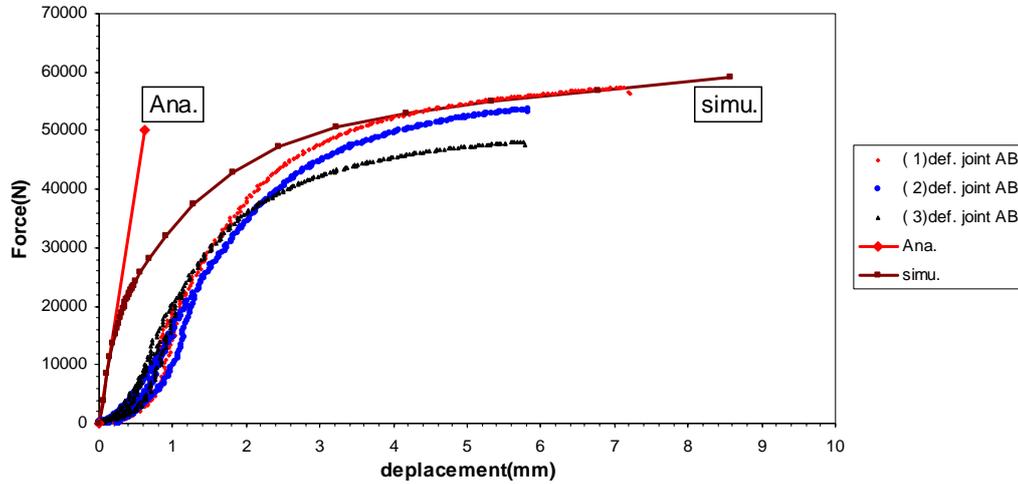


Figure 9-23 Courbes de comportement d'assemblage "force-déformation" expérimentales, numérique et analytique, éprouvettes d'assemblage à une broche D20, membrures 8D-8D-8D moisées à 0°-0°.

### 9.5.1.2 Assemblages à une broche, moisés 0°-90° (C3)

#### 9.5.1.2.1 Assemblages à une broche D10, moisés 0°-90°

- Assemblages à une broche D10, membrures 4D-4D-4D moisées à 0°-90°:

La Figure 9-24 présente les résultats pour les éprouvettes à une broche D10 avec les membrures 4D-4D-4D moisées à 0°-90°. Les rigidités initiales numérique et analytique sont similaires à celles des courbes expérimentales. La courbe numérique simule bien le comportement de l'assemblage.

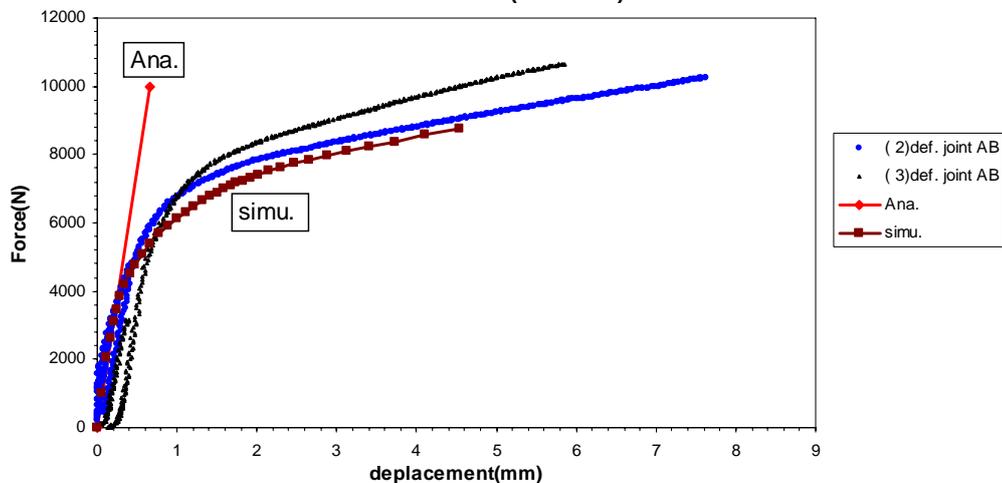


Figure 9-24 Courbes de comportement d'assemblage "force-déformation" expérimentales, numérique et analytique, éprouvettes d'assemblage à une broche D10, membrures 4D-4D-4D moisées à 0°-90°.

- Assemblages à une broche D10, membrures 4D-8D-4D moisées à 0°-90°:

La Figure 9-25 présente les résultats pour les éprouvettes à une broche D10 avec les membrures 4D-8D-4D moisées à 0°-90°. Les rigidités initiales numérique et analytique sont similaires à celles des courbes expérimentales. La courbe numérique simule bien le comportement de l'assemblage.

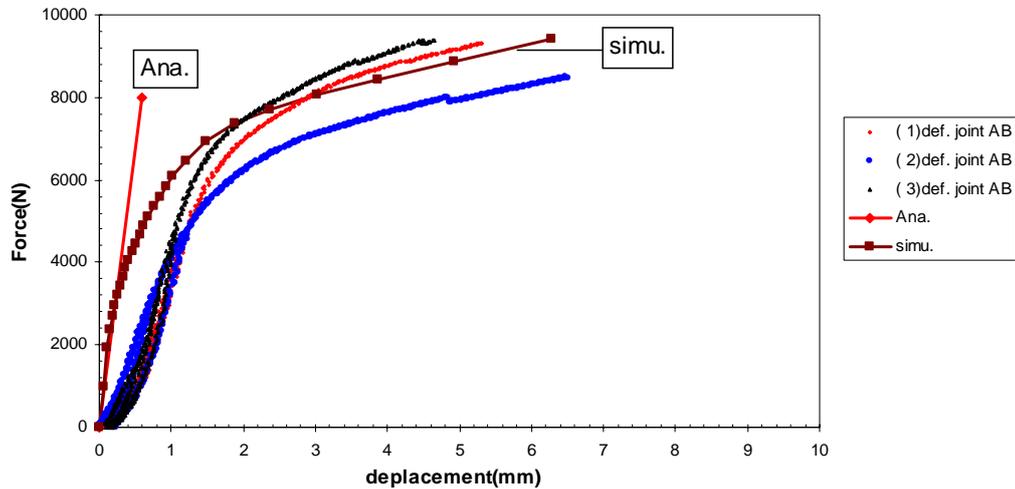


Figure 9-25 Courbes de comportement d'assemblage "force-déformation" expérimentales, numérique et analytique, éprouvettes d'assemblage à une broche D10, membrures 4D-8D-4D moisées à 0°-90°.

- Assemblages à une broche D10, membrures 8D-8D-8D moisées à 0°-90°:

La Figure 9-26 présente les résultats pour les éprouvettes à une broche D10 avec les membrures 8D-8D-8D moisées à 0°-90°. Les rigidités initiales numérique et analytique sont en bon accord mais légèrement plus grandes que celles des courbes expérimentales. La courbe numérique représente assez bien l'allure du comportement de l'assemblage.

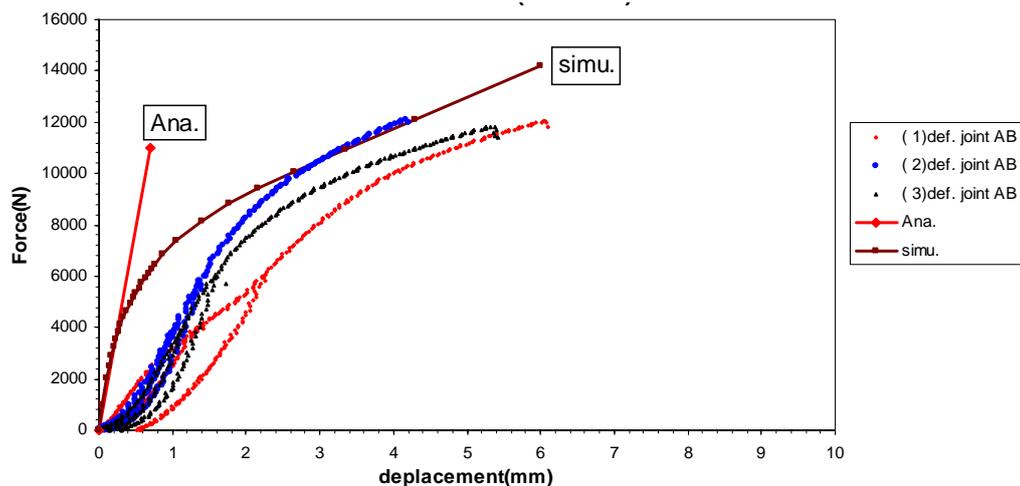


Figure 9-26 Courbes de comportement d'assemblage "force-déformation" expérimentales, numérique et analytique, éprouvettes d'assemblage à une broche D10, membrures 8D-8D-8D moisées à 0°-90°.

### 9.5.1.2.2 Assemblages à une broche D16, moisés 0°-90°

- Assemblages à une broche D16, membrures 4D-4D-4D moisées à 0°-90°:

La Figure 9-27 présente les résultats pour les éprouvettes à une broche D16 avec les membrures 4D-4D-4D moisées à 0°-90°. Les rigidités initiales numérique et analytique sont semblables à celles des courbes expérimentales. La courbe numérique simule bien le comportement de l'assemblage.

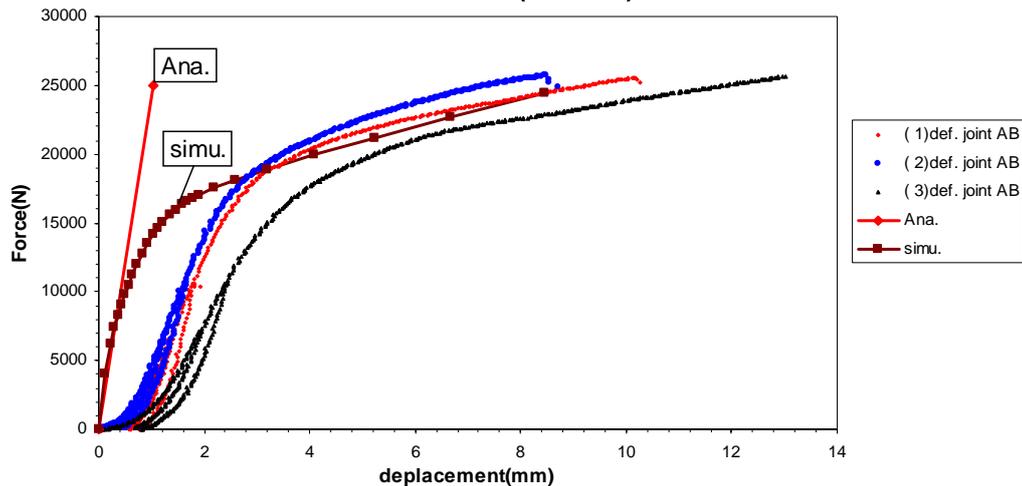


Figure 9-27 Courbes de comportement d'assemblage "force-déformation" expérimentales, numérique et analytique, éprouvettes à une broche D16, membrures 4D-4D-4D moisées à 0°-90°.

- Assemblages à une broche D16, membrures 4D-8D-4D moisées à 0°-90°:

La Figure 9-28 présente les résultats pour les éprouvettes à une broche D16 avec les membrures 4D-8D-4D moisées à 0°-90°. Les rigidités initiales numérique et analytique sont similaires à celles des courbes expérimentales. La courbe numérique représente très bien le comportement de l'assemblage.

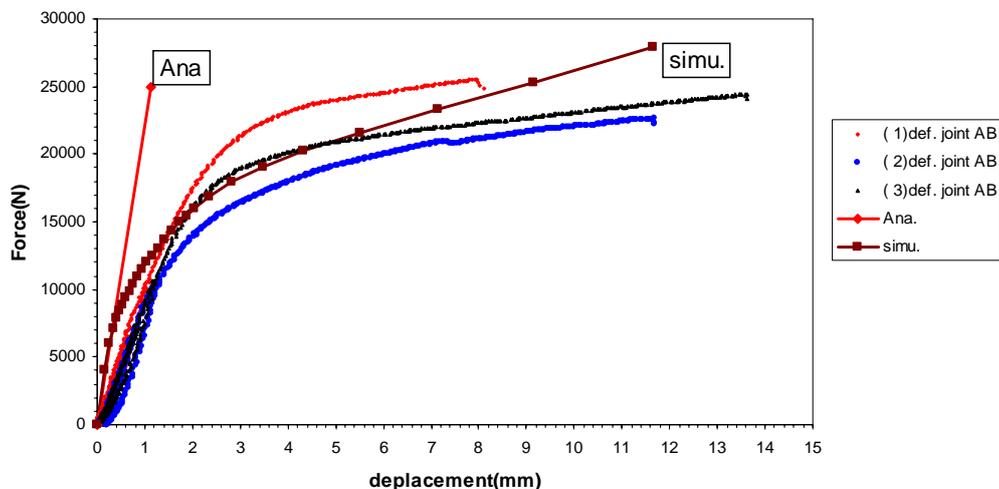


Figure 9-28 Courbes de comportement d'assemblage "force-déformation" expérimentales, numérique et analytique, éprouvettes d'assemblage à une broche D16 membrures 4D-8D-4D moisées à 0°-90°.

- Assemblages à une broche D16, membrures 8D-8D-8D moisées à 0°-90°:

La Figure 9-29 présente les résultats pour les éprouvettes à une broche D16 avec les membrures 8D-8D-8D moisées à 0°-90°. Les rigidités initiales numérique et analytique sont en bon accord mais légèrement plus grandes que celles des courbes expérimentales. La courbe numérique représente assez bien l'allure du comportement de l'assemblage.

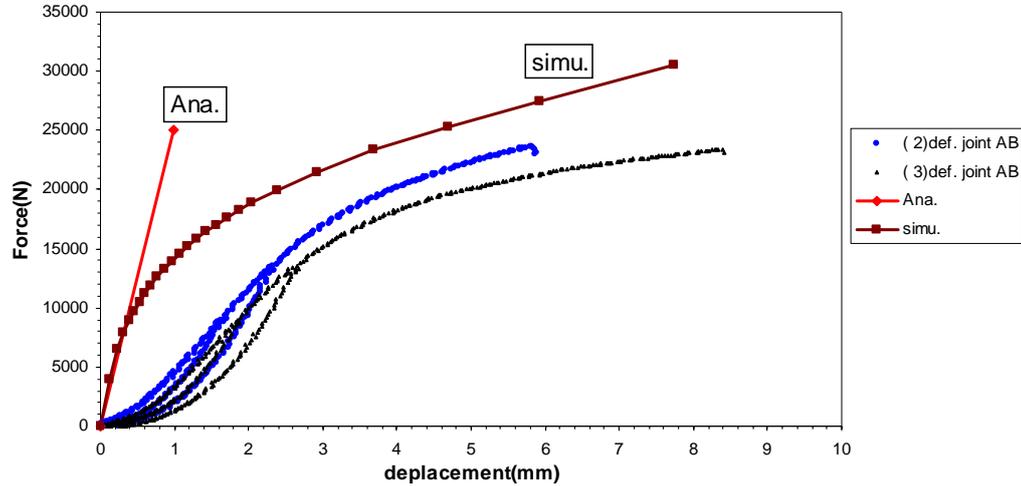


Figure 9-29 Courbes de comportement d'assemblage "force-déformation" expérimentales, numérique et analytique, éprouvettes d'assemblage à une broche D16, membrures 8D-8D-8D moisées à 0°-90°.

### 9.5.1.2.3 Assemblages à une broche D20, moisés 0°-90°

- Assemblages à une broche D20, membrures 4D-4D-4D moisées à 0°-90°:

La Figure 9-30 présente les résultats pour les éprouvettes à une broche D20 avec les membrures 4D-4D-4D moisées à 0°-90°. Les rigidités initiales numérique et analytique sont similaires à celles des courbes expérimentales. La courbe numérique simule bien le comportement de l'assemblage.

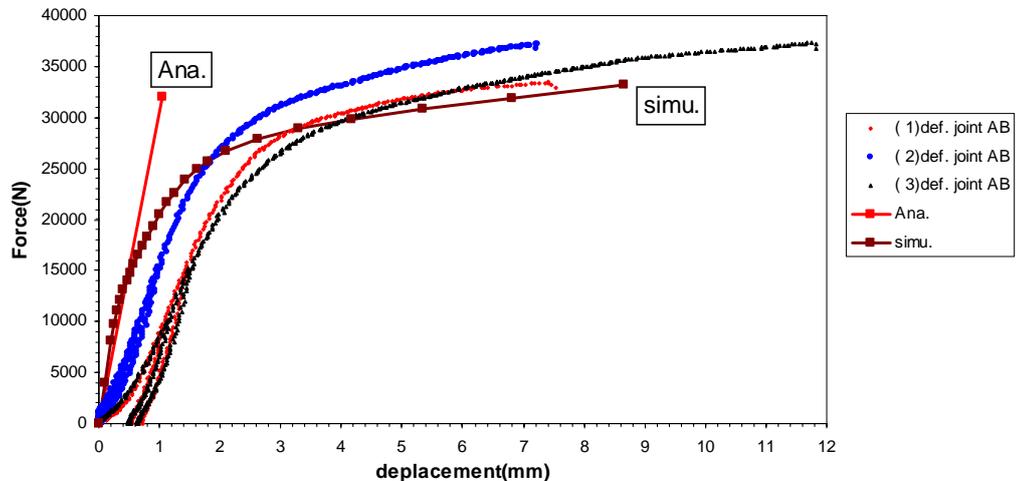


Figure 9-30 Courbes de comportement d'assemblage "force-déformation" expérimentales, numérique et analytique, éprouvettes d'assemblage à une broche D20, membrures 4D-4D-4D moisées à 0°-90°.

- Assemblages à une broche D20, membrures 4D-8D-4D moisées à 0°-90°:

La Figure 9-31 présente les résultats pour les éprouvettes à une broche D20, membrures 4D-8D-4D moisées à 0°-90°. Les rigidités initiales numérique et analytique sont similaires à celles des courbes expérimentales. La courbe numérique simule bien le comportement de l'assemblage.

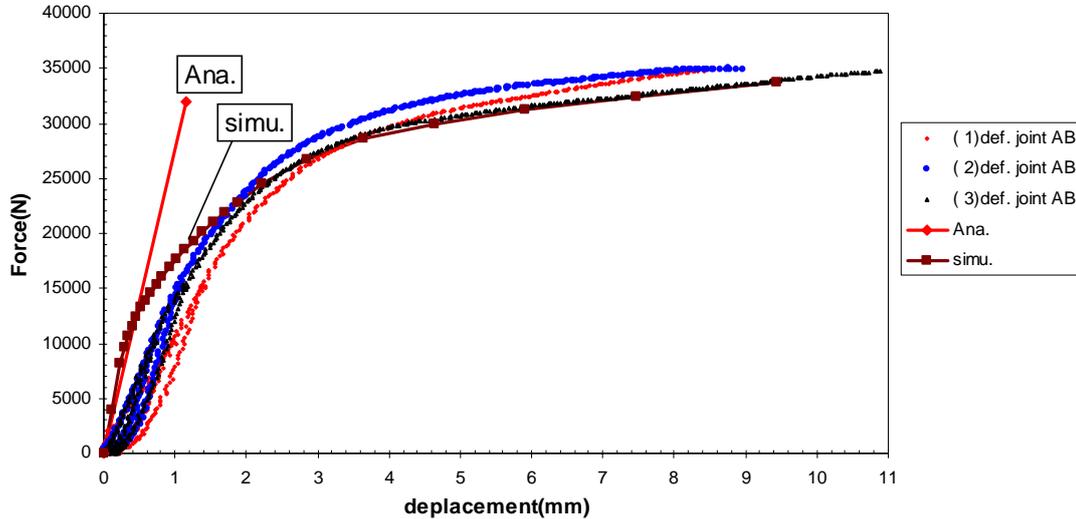


Figure 9-31 Courbes de comportement d'assemblage "force-déformation" expérimentales, numérique et analytique, éprouvettes d'assemblage à une broche D20, membrures 4D-8D-4D moisées à 0°-90°.

- Assemblages à une broche D20, membrures 8D-8D-8D moisées à 0°-90°:

La Figure 9-32 présente les résultats pour les éprouvettes à une broche D20 avec les membrures 8D-8D-8D moisées à 0°-90°. Les rigidités initiales numérique et analytique sont en bon accord mais légèrement plus grandes que celles des courbes expérimentales. La courbe numérique représente assez bien l'allure du comportement de l'assemblage.

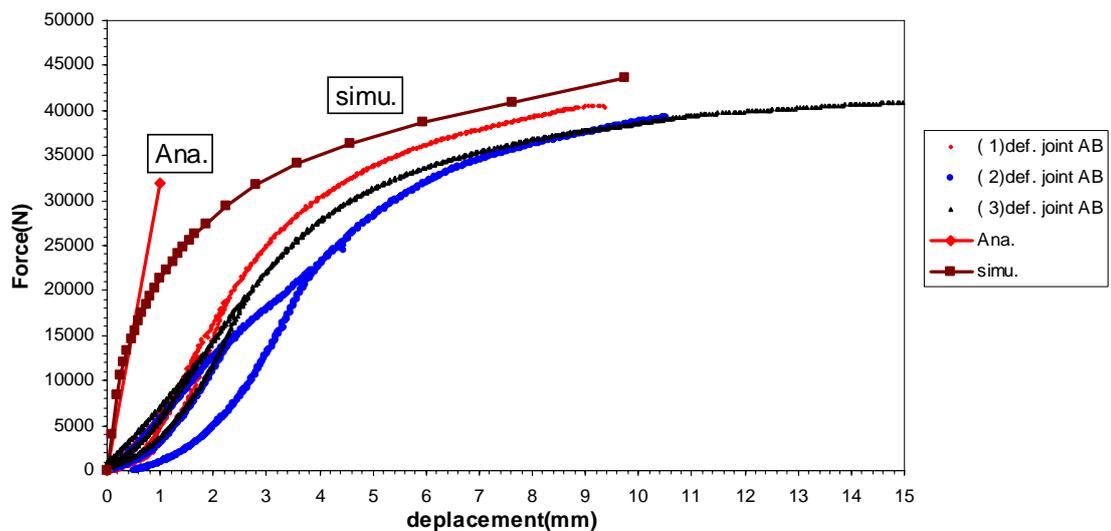


Figure 9-32 Courbes de comportement d'assemblage "force-déformation" expérimentales, numérique et analytique, éprouvettes d'assemblage à une broche D20, membrures 8D-8D-8D moisées à 0°-90°.

### 9.5.1.3 Discussion des résultats

Les comparaisons relatives au comportement d'un assemblage à une seule broche entre les résultats numériques, analytiques et expérimentaux ont permis d'obtenir les conclusions suivantes:

- Globalement, les courbes numériques sont en bon accord avec les courbes expérimentales. Dans la majorité des cas, le modèle numérique proposé représente très bien le comportement complet de l'assemblage à une seule broche. Autrement dit, le modèle numérique proposé peut être appliqué non seulement pour la prédiction du comportement élastique d'un assemblage à une seule broche mais éventuellement pour la prédiction de son comportement non linéaire complet.
- Vu que le modèle analytique destiné à prédire analytiquement le comportement élastique d'un assemblage à une seule broche est en bon accord avec le modèle numérique et les résultats expérimentaux, il est donc également validé.

### 9.5.2 Assemblages à plusieurs rangées de broches en cisaillement

L'objectif de la thèse est de développer un modèle analytique qui permet de prédire le comportement élastique des assemblages. Au préalable, des modèles numériques ont été développés afin d'orienter la recherche d'un modèle analytique. Ce dernier, ayant été validé par les essais expérimentaux et par le modèle numérique dans le cas d'un assemblage à une seule broche, peut à présent être utilisé pour la détermination du comportement en groupe des broches des assemblages en cisaillement.

Pour ce faire, le comportement élastique "broche-bois" obtenu par voie analytique (§9.4.1) est introduit dans le modèle 2D analytique proposé au §9.4.2 (resp. au 9.4.3) pour la prédiction du comportement élastique de l'assemblage à plusieurs broches en cisaillement, moisé à  $0^\circ-0^\circ$  (resp. moisé à  $0^\circ-\alpha^\circ$ ). Aux figures ci-après (§9.5.2.1 à §9.5.2.3), deux types de courbe de comportement sont reportés:

- les courbes "Exp." présentent le comportement des assemblages avec un groupe de broches obtenu par voie expérimentale;
- la courbe "Ana." présente la rigidité élastique des assemblages déterminée par voie analytique.

#### 9.5.2.1 Assemblages à plusieurs broches, moisés à $0^\circ-0^\circ$ , en cisaillement (C4)

Les éprouvettes relevant de la configuration d'assemblage C4 (Annexe C.4) ont été limitées à deux broches de diamètre D16 et les membrures aux épaisseurs 4D-4D-4D moisées à  $0^\circ-0^\circ$ . La

rigidité élastique d'un assemblage possédant ce type de configuration est calculée analytiquement par une formule proposée au Tableau 9-1:

$$K_{ac} = \frac{4 + 3 \frac{K_{mc} P}{E_c A_c}}{2 + 3 \frac{K_{mc} P}{E_c A_c} + \left( \frac{K_{mc} P}{E_c A_c} \right)^2} K_{mc} \quad (9.26)$$

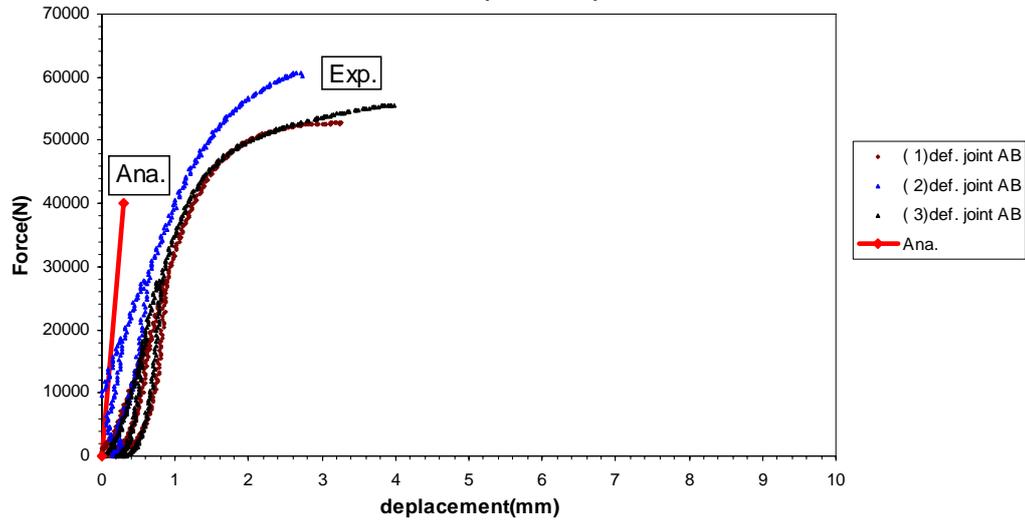


Figure 9-33 Courbes "force-déformation" expérimentales et analytique de comportement en groupe de deux deux rangées (à une broche) d'un assemblage *moisé* à 0°-0°, distance des deux broches: 7D=112mm.

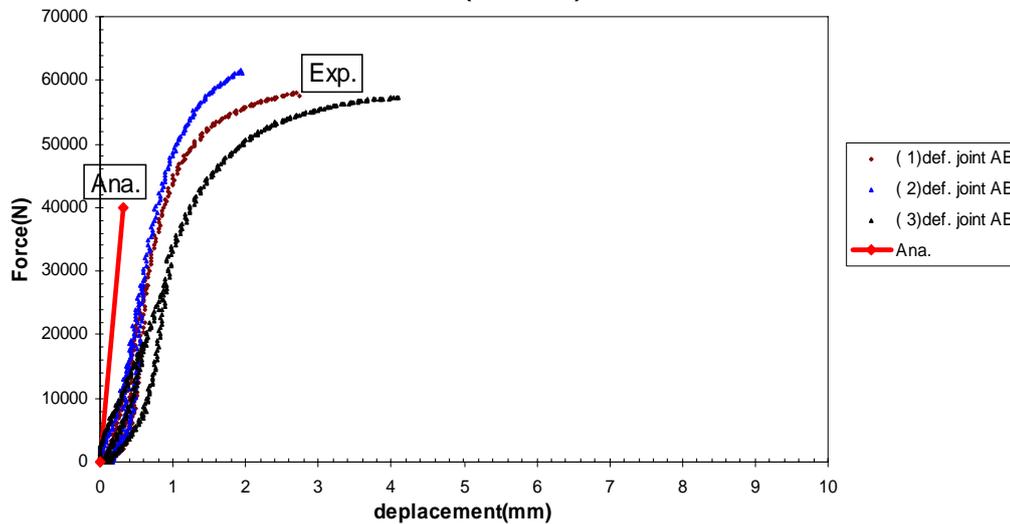


Figure 9-34 Courbes "force-déformation" expérimentales et analytique de comportement en groupe de deux deux rangées (à une broche) d'un assemblage *moisé* à 0°-0°, distance des deux broches: 10D=160mm.

En utilisant les résultats obtenus dans les chapitres précédents concernant le matériau bois et la rigidité élastique d'un assemblage à une seule broche, nous avons que:  $E_c = 11331.35 \text{ N/mm}^2$ ;  $A_c = 6144 \text{ mm}^2$  (le module élastique parallèle aux fibres et la section droite de la

membrure centrale);  $K_{mc} = K_{lc} = 72249.9 \text{ N/mm}$  (la rigidité élastique "broche-bois" pour une rangée);  $p = 7D$  (112 mm, pour la première configuration) ou et  $p = 10D$  (160 mm, pour la deuxième configuration).

Pour la première configuration de l'assemblage (Figure 9-33), la rigidité prédite par le modèle analytique est en bon accord avec la rigidité élastique des courbes expérimentales.

Pour la deuxième configuration de l'assemblage (Figure 9-34), la rigidité prédite par le modèle analytique est à nouveau très proche de la rigidité élastique des courbes expérimentales.

### 9.5.2.2 Assemblages à plusieurs broches, moisés à $0^\circ$ - $90^\circ$ , en cisaillement (C5)

Les éprouvettes relevant de la configuration d'assemblage C5 (Annexe C.5) sont composées d'une rangée de deux broches disposées perpendiculairement à la direction d'application de la force. La rigidité élastique d'un assemblage répondant ce type de configuration vaut simplement le double de la rigidité de l'assemblage à une seule broche:

$$K_{ac} = 2K_{lc} \quad (9.27)$$

La rigidité élastique  $K_{lc}$  due à l'interaction locale "broche-bois" de l'assemblage moisé à  $0^\circ$ - $90^\circ$  vaut  $24223.5 \text{ N/mm}$  (à savoir la formule (9.1)).

Pour la première configuration de l'assemblage (Figure 9-35), la rigidité élastique prédite par le modèle analytique est en bon accord avec la rigidité élastique des courbes expérimentales.

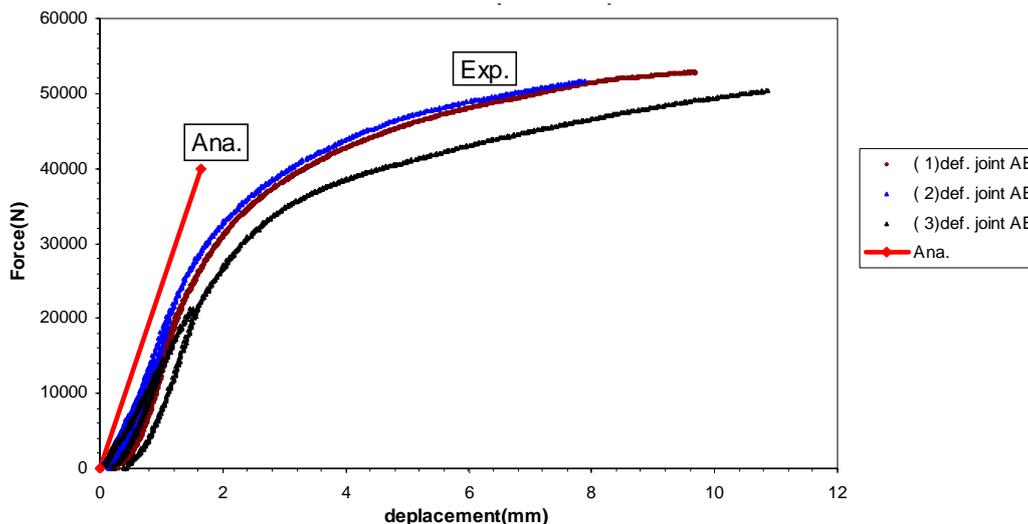


Figure 9-35 Courbes "force-déformation" expérimentales et analytique de comportement en groupe d'une rangée de deux broches d'un assemblage moisé à  $0^\circ$ - $90^\circ$ , distance des broches:  $7D=112\text{mm}$ .

Pour la deuxième configuration de l'assemblage (Figure 9-36), la rigidité élastique prédite par le modèle analytique correspond aussi très bien à la rigidité élastique des courbes expérimentales.

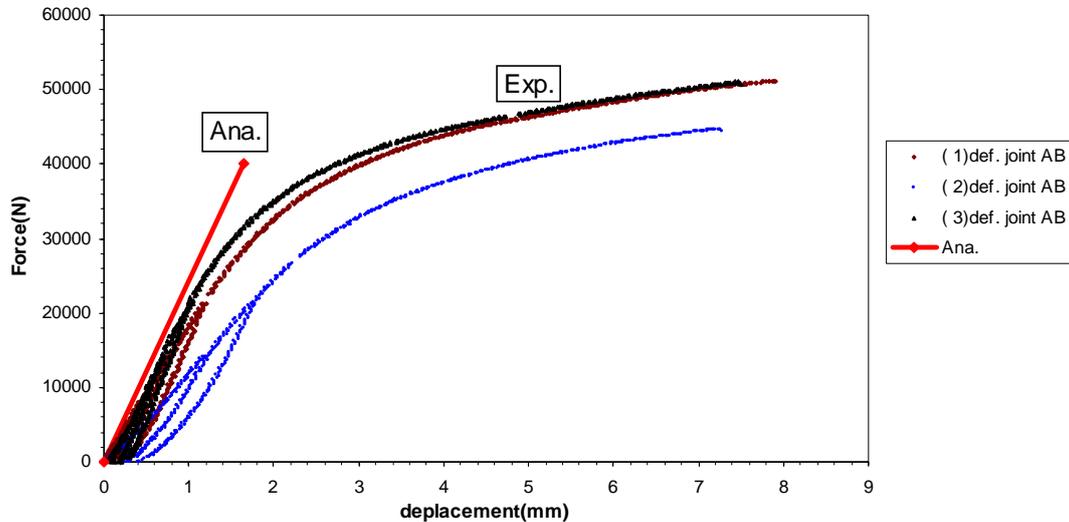


Figure 9-36 Courbes "force-déformation" expérimentales et analytique de comportement en groupe d'une rangée de deux broches d'un assemblage *moisé* à 0°-90°, distance des broches: 10D=160mm.

### 9.5.2.3 Assemblages à plusieurs broches, moisés à 0°-90°, en cisaillement (C6)

Les éprouvettes à configuration d'assemblage C6 (Annexe C.6) ont été limitées à deux rangées à une broche de diamètre D16 avec les membrures d'épaisseurs 4D-4D-4D moisées à 0°-90°. La rigidité élastique d'un assemblage de ce type est estimée analytiquement par une formule proposée au Tableau 9-2:

$$K_{ac} = \frac{2 + \frac{K_{mc} p}{E_c A_c}}{1 + \frac{K_{mc} p}{E_c A_c}} K_{mc} \quad (9.28)$$

Le module élastique  $E_c$  parallèle aux fibres et la section  $A_c$  droite de la membrure centrale sont respectivement égaux à  $11331.35 \text{ N/mm}^2$  et à  $6144 \text{ mm}^2$ . La rigidité élastique  $K_{lc}$  due à l'interaction "broche-bois" est égale à  $24223.5 \text{ N/mm}$ . La distance  $p$  entre les deux broches est égale à 7D (112 mm) pour la première configuration et 10D (160 mm) pour la deuxième configuration.

Pour la première configuration de l'assemblage (Figure 9-37), la rigidité élastique prédite par le modèle analytique est en bon accord avec la rigidité élastique des courbes expérimentales.

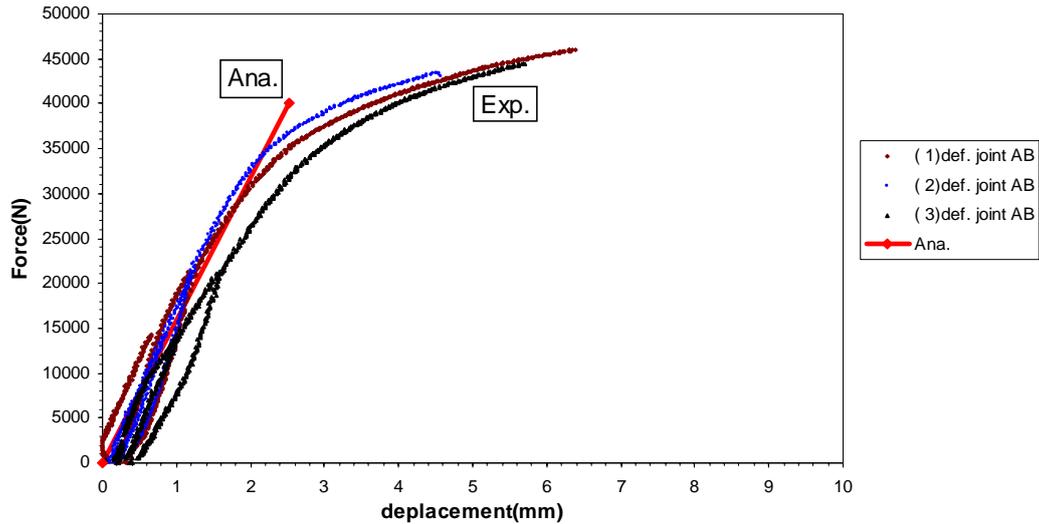


Figure 9-37 Courbes "force-déformation" expérimentales et analytique de comportement en groupe de deux rangées (à une broche) d'un assemblage *moisé* à  $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$ , distance des deux broches:  $7D=112\text{mm}$ .

Pour la deuxième configuration de l'assemblage (Figure 9-38), la rigidité élastique prédite par le modèle analytique est également très proche de la rigidité élastique des courbes expérimentales.

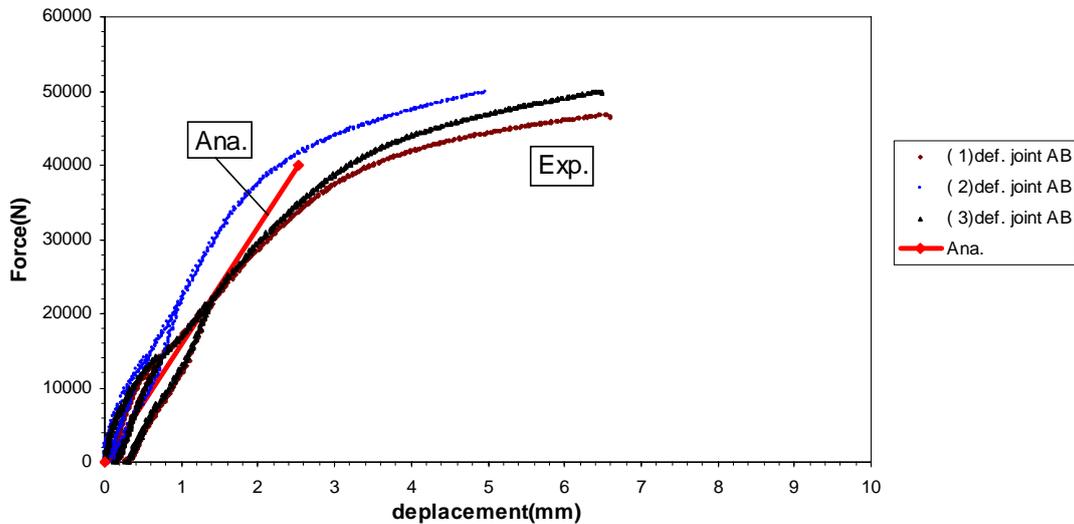


Figure 9-38 Courbes "force-déformation" expérimentales et analytique de comportement en groupe de deux rangées (à une broche) d'un assemblage *moisé* à  $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$ , distance des deux broches:  $10D=160\text{mm}$ .

#### 9.5.2.4 Discussion des résultats

Les modèles analytiques développés précédemment pour la prédiction du comportement élastique d'un assemblage à plusieurs broches en cisaillement sont dérivés d'une analyse développée par Wilkinson [WIL-1986]. Bien que ce dernier porte sur la distribution des efforts entre les rangées de connecteurs en intégrant le comportement non linéaire complet de chaque cou-

ple "connecteur-bois", les principes sur lesquels nos modèles sont construits sont les mêmes. Il aurait idéalement fallu des éprouvettes avec des configurations à plus de 2 rangées de broches afin de couvrir un plus large éventail d'assemblages. Ceci étant, la validité des modèles proposés est largement démontrée sur base des comparaisons effectuées.

## 9.6 Conclusions

Un assemblage mécanique en bois est souvent constitué de plusieurs connecteurs (les broches dans le cadre de cette thèse). La méthode des composantes permet d'étudier le comportement d'un assemblage en le considérant comme un ensemble de binômes "broche-bois". Chacun de ces derniers agit comme une "composante généralisée" au sein de l'assemblage. Une fois ces binômes caractérisés, le comportement d'un assemblage soumis une sollicitation (flexion et/ou cisaillement) peut être aisément déterminé.

- **Assemblages à une seule broche en cisaillement**

Tout comme au chapitre précédent, le couplage de deux comportements 2D dans deux plans (l'un perpendiculaire et l'autre parallèle à l'axe de la broche) pour représenter le comportement 3D "broche-bois" est aussi valable à l'échelle des assemblages; son application est semblable pour les éprouvettes de portance locale que pour les éprouvettes d'assemblage.

L'interaction "broche-bois" dans les assemblages est également fondée sur deux composantes: la composante "broche" et la composante d'"embedding". Ces dernières ont déjà été étudiées à la partie 5 relative à l'étude des composantes. Un modèle numérique (Figure 9-8) et un modèle analytique (Figure 9-11) sont proposés pour la détermination du comportement "broche-bois". Ils ont été validés par l'intermédiaire de comparaisons avec des essais expérimentaux. Ceci confirme les conclusions tirées au chapitre précédent, à savoir au §8.7 sur la validité des modèles et la possibilité d'application du modèle numérique à la description non linéaire du comportement complet "broche-bois".

- **Assemblages à plusieurs broches en cisaillement**

Suite de l'étude du comportement "broche-bois", deux autres modèles analytiques (Figure 9-12 et Figure 9-14) ont été établis pour prédire le comportement élastique d'un assemblage à plusieurs broches en cisaillement. Ils sont issus d'un modèle établi par Wilkinson [WIL-1986], mais pour un autre type d'application. Les modèles développés dans cette thèse concernent la prédiction de la rigidité élastique des assemblages, tandis que le modèle développé par Wilkinson concerne la distribution des efforts entre les connecteurs. Bien qu'un nombre limité de configurations d'assemblage ne soit pas suffisant pour cou-

vrir tous les cas d'assemblages possibles, la validité des modèles effectués paraît toutefois convaincante.

Le chapitre suivant présentera l'interprétation analytique du comportement d'un assemblage en flexion. Ceci complétera le travail de thèse dont l'objectif est de prédire le comportement élastique des assemblages mécaniques à broches soumis à une sollicitation générale (cisaillement et/ou flexion).

# Chapitre 10 Assemblages en flexion

## 10.1 Introduction

L'application de la méthode des composantes à la détermination du comportement élastique d'un assemblage en cisaillement a conduit à de bons résultats, au chapitre précédent. Elle est à présent utilisée, dans ce chapitre, pour étudier le comportement élastique d'un assemblage en flexion (Figure 10-1):

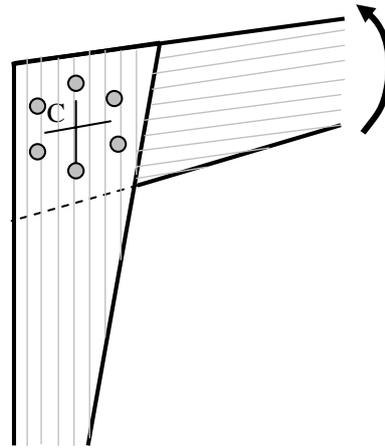


Figure 10-1 Un assemblage en flexion.

A l'image du chapitre précédent, la détermination du comportement élastique d'un assemblage en flexion doit être fondé également sur le comportement des binômes "broche-bois", ainsi que sur la distribution des efforts entre les broches. En fait, dans le domaine élastique, ces efforts diminuent en fonction de la distance entre la broche concernée et le centre de rotation du groupe de broches. De même, les broches extérieures sont plus déformées que celles situées aux alentours du centre de rotation. Cela permet les observations suivantes quant au comportement en flexion d'un assemblage:

- **Rigidité élastique en flexion**

Ce sont les broches extérieures qui influencent principalement la rigidité en flexion de l'assemblage, car elles ont de grands bras de levier pour reprendre l'effort de moment appliqué. C'est la raison pour laquelle on doit disposer les broches aussi loin que possible du centre de rotation de l'assemblage.

- **Résistance ultime en flexion:**

La résistance ultime plastique de l'assemblage en flexion peut être atteinte à condition que le comportement des binômes "broche-bois" soit très ductile. Dans la réalité, le bois est souvent écrasé avant la plastification sur les broches. Par conséquent, les binômes "broche-bois" les plus extérieurs atteignent la ruine avant que les autres ne développent leur pleine capacité. La résistance ultime en flexion de l'assemblage est dès lors limitée au premier écrasement du bois au niveau de la broche la plus chargée.

Dans ce chapitre, l'objectif de la thèse est limité au comportement élastique en flexion d'un assemblage. Un modèle analytique portant sur la détermination de ce comportement est proposé et validé par les essais expérimentaux.

## 10.2 Travaux à caractère expérimental

Les essais expérimentaux qui avaient pour but d'étudier expérimentalement le comportement des assemblages et qui étaient initialement prévus dans le projet  $K_{ser}$  n'ont pas pu finalement être réalisés par le CTIB. Il nous a donc fallu les consulter dans la bibliographie afin de pouvoir valider le modèle analytique proposé.

### 10.2.1 Assemblages en flexion [CAL-2005]

Il s'agit d'essais de flexion à quatre points sur des assemblages "bout-à-bout". Le bois utilisé pour les essais est extrait d'une poutre de châtaignier datant de 1700-1800 et prélevée dans un ancien bâtiment à Naples. La classe du bois, selon l'EC5, est entre C16 et C18 avec les caractéristiques mécaniques correspondantes présentées au §8, Tableau 8-4. Les connecteurs utilisés dans les essais d'assemblages sont des pointes de diamètre D5 (5 mm). La Figure 10-2 présente la géométrie des éprouvettes et les dispositifs de chargement pour les essais.

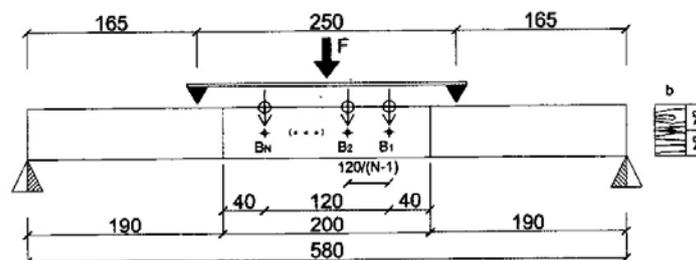


Figure 10-2 Configurations et dispositifs de chargement des essais d'assemblage en flexion [CAL-2005].

Le Tableau 10-1 présente en détails les configurations d'assemblages avec différentes sections ( $b \times h$ ) et différents nombres de connecteurs ( $N_f$ ) qui sont distribués, pour toutes les configurations, sur une longueur de 120 mm. Les éprouvettes  $B_{C1}$ ,  $B_{C4}$  et  $B_{C5}$  ont de plusieurs largeurs

b, mais le même  $N_f$  ( $N_f = 3$ ), tandis que les éprouvettes BC1, BC2 et BC3 ont les mêmes dimensions, mais  $N_f$  varie ( $N_f = 3, 4$  et  $5$ ).

Eprouvette	Portée	Assemblage $L_0$ (mm)	Section		Nombre de connecteurs ( $N_f$ )	Entre- espacement (mm)
	L (mm)		Largeur b (mm)	Hauteur h (mm)		
BC1	580	200	20.5	50.6	3	60
BC2	580	200	20.7	50.4	4	40
BC3	580	200	21.0	50.7	5	30
BC4	580	200	30.4	50.7	3	60
BC5	580	200	39.5	50.7	3	60

Tableau 10-1 Configurations des éprouvettes en essais [CAL-2005].

Les résultats de ces essais sont présentés au §10.4 à l'occasion de la validation du modèle analytique proposé.

## 10.2.2 Assemblages en flexion [MER-1995]

Le comportement semi-rigide des assemblages est ici aussi étudié par l'intermédiaire d'essai de flexion à quatre points sur des poutres assemblées "bout-à-bout". Le bois utilisé est du Sapin Rouge du Nord SRN, classé entre S8 et S10 d'après le classement visuel STS 04. La classe équivalente de ce bois, d'après [EN338], est C27; les caractéristiques mécaniques correspondantes sont données au Tableau 10-2:

Essence	E0 N/mm <sup>2</sup>	E90 N/mm <sup>2</sup>	G N/mm <sup>2</sup>	ft,0 N/mm <sup>2</sup>	fc,0 N/mm <sup>2</sup>	ft,90 N/mm <sup>2</sup>	fc,90 N/mm <sup>2</sup>	v
C27	12000.00	400.00	750.00	16.00	22.00	0.40	5.60	0.30

Tableau 10-2 Caractéristiques mécaniques du bois C27.

La Figure 10-3 présente la géométrie des éprouvettes et la disposition des broches. La membrure centrale, de section  $b_c \times h_c$  (34x220), est connectée à deux membrures latérales, avec pour de sections  $b_l \times h_l$  (17x220), par des broches en acier de diamètre D16 (16 mm).

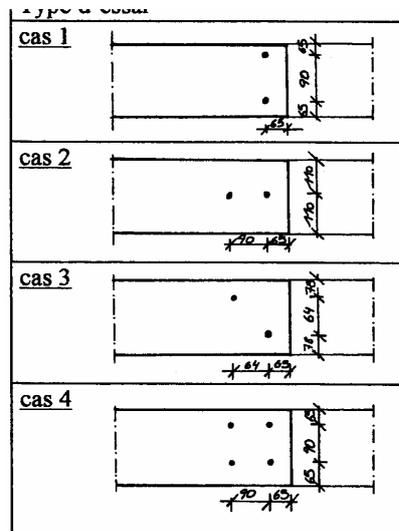


Figure 10-3 Récapitulatif des dimensions des éprouvettes.

La Figure 10-4 présente le dispositif d'essais utilisé.

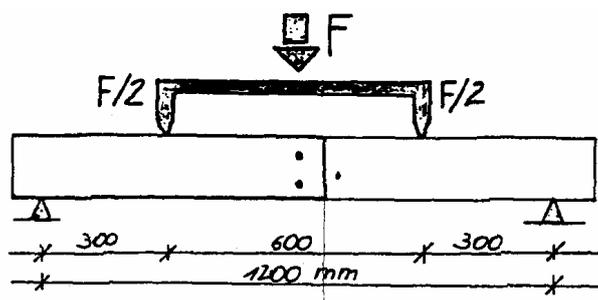


Figure 10-4 Dispositif de chargement.

Les résultats de ces essais sont également présentés au §10.4 pour la validation du modèle analytique proposé.

## 10.3 Travaux à caractère analytique

### 10.3.1 Modèle analytique général

La Figure 10-5 montre un type d'assemblage souvent rencontré dans une structure, les assemblages "poutre-colonne", où les membrures se croisent en un angle  $\gamma$ . Un modèle analytique écrit pour ce type de configuration peut couvrir toutes les configurations possibles pour un assemblage, simplement en faisant varier l'angle entre les membrures. C'est la raison pour laquelle il est choisi.

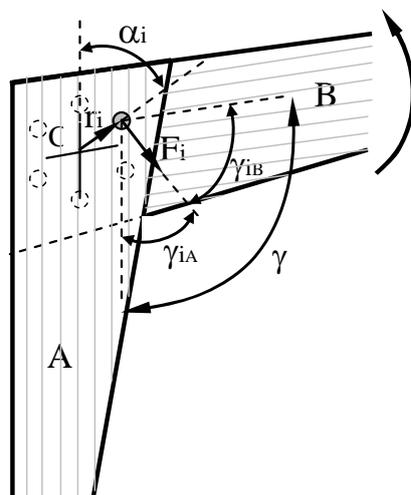


Figure 10-5 Assemblage poutre-colonne en flexion.

Les efforts sont transmis de la membrure B (la poutre) à la membrure A (la colonne) grâce aux broches en acier. Si l'on suppose que ces dernières sont initialement en contact parfait avec le bois, le comportement semi-rigide de l'assemblage en flexion peut s'exprimer par l'intégrale des comportements des couples "broche-bois", autour du centre de rotation C.

Sous l'application d'un moment  $M_j$ , l'assemblage subit une rotation  $\varphi_j$ . La broche  $i$  disposée à la distance  $r_i$  du centre de rotation C reprend un effort  $F_i$ . L'équilibre statique de l'assemblage en flexion peut être exprimé par l'équation suivante:

$$M_j = \sum_i F_i r_i \quad (10.1)$$

L'effort  $F_i$  fait un angle  $\gamma_{iA}$  avec les fibres de la membrure A et un angle  $\gamma_{iB}$  avec les fibres de la membrure B (la somme des angles  $\gamma_{iA}$  et  $\gamma_{iB}$  est égale à l'angle  $\gamma$  formé par la membrure A et la membrure B). Les composantes d'"embedding"  $k_{iA}$  de la membrure A et  $k_{iB}$  de la membrure B sont dès lors activées. La valeur de  $k_{iA}$  (resp.  $k_{iB}$ ) est calculée par la formule (8.1), sur base des deux composantes d'"embedding" principales  $k_{0A}$  et  $k_{90A}$  (resp.  $k_{0B}$  et  $k_{90B}$ ). Ces dernières peuvent être évaluées analytiquement grâce au modèle 2D analytique de prédiction du comportement élastique d'une composante d'"embedding" (de  $0^\circ$  et  $90^\circ$ ) proposé au §8.5.2.

L'effort  $F_i$  et la déformation du couple "broche-bois"  $i$  peuvent donc être mis en relation par la formule (10.2):

$$F_i = K_{\gamma_{iA}, \gamma_{iB}} r_i \varphi_j \quad (10.2)$$

$K_{\gamma_{iA}, \gamma_{iB}}$  est la rigidité élastique du couple "broche-bois"  $i$ . Sa valeur peut être obtenue sur base des  $k_{iA}$  et  $k_{iB}$  via le modèle 2D analytique de prédiction de la rigidité élastique d'un couple "broche-bois" proposé au 9.4.1.

Introduisons donc (10.2) dans (10.1); nous obtenons:

$$M_j = \sum_i K_{\gamma_{iA}, \gamma_{iB}} r_i^2 \varphi_j \quad (10.3)$$

Appelons  $K_{af}$  la rigidité élastique de l'assemblage en flexion; par définition:

$$M_j = K_{af} \varphi_j \quad (10.4)$$

De (10.3) et (10.4), la rigidité élastique de l'assemblage en flexion peut être obtenue par la formule (10.5):

$$K_{af} = \sum_i K_{\gamma_{iA}, \gamma_{iB}} r_i^2 \quad (10.5)$$

### 10.3.2 Modèle analytique pour un cas simplifié

Les essais expérimentaux présentés au §10.2 ont recours à des assemblages "bout-à-bout" dont les membrures sont assemblées parallèlement, le long de leur axe. La disposition des broches dans l'assemblage, par rapport au repère "central", est décrite à la Figure 10-6:

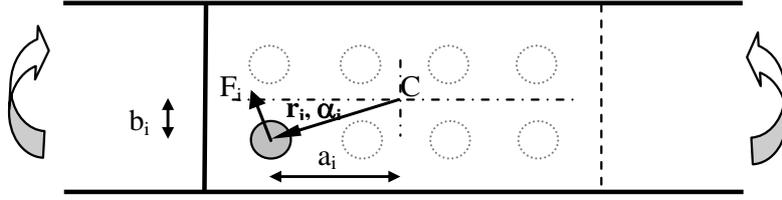


Figure 10-6 Assemblage bout-à-bout en flexion.

La formule (10.5) peut évidemment être appliquée. Dans ce cas, l'effort  $F_i$  fait un angle  $\gamma_i$  ( $\pi/2 - \alpha_i$ ) avec les fibres des membrures A et B. La rigidité élastique de chaque couple "broche-bois"  $K_{\gamma_i, \gamma_i}$  (en abrégiation  $K_{\gamma_i}$ ) peut être exprimée en fonction de  $K_{0,0}$  ( $K_0$ ) et  $K_{90,90}$  ( $K_{90}$ ).  $K_0$  (resp.  $K_{90}$ ) est la rigidité élastique de l'assemblage à une broche calculée sur base des  $k_{0A}$  et  $k_{0B}$  (resp.  $k_{90A}$  et  $k_{90B}$ ) via le modèle 2D analytique de prédiction de la rigidité élastique d'un binôme "broche-bois" proposé au 9.4.1.

$$K_{\gamma_i} = K_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_i\right) + K_{90} \sin^2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_i\right) \quad (10.6)$$

ou encore:

$$K_{\gamma_i} = K_0 \sin^2 \alpha_i + K_{90} \cos^2 \alpha_i \quad (10.7)$$

Introduisons (10.7) dans (10.5), on obtient:

$$K_{af} = K_0 \sum_i r_i^2 \sin^2 \alpha_i + K_{90} \sum_i r_i^2 \cos^2 \alpha_i \quad (10.8)$$

Appelons  $a_i$  et  $b_i$  les coordonnées de la broche  $i$  dans le repère conventionnel de la Figure 10-6; la formule (10.8) peut être réécrite en fonction de  $a_i$  et  $b_i$ :

$$K_{af} = K_0 \sum_i b_i^2 + K_{90} \sum_i a_i^2 \quad (10.9)$$

car:

$$a_i^2 = r_i^2 \cos^2 \alpha_i \quad \text{et} \quad b_i^2 = r_i^2 \sin^2 \alpha_i \quad (10.10)$$

## 10.4 Validation du modèle analytique

Les essais présentés au §10.2 seront utilisés pour valider le modèle analytique proposé. Aux pages suivantes, les résultats des essais expérimentaux sont interprétés, puis comparés aux résultats analytiques correspondants.

### 10.4.1 Assemblages en flexion [CAL-2005]

Les assemblages en flexion [CAL-2005] sont tels que les connecteurs ne travaillent que perpendiculairement aux fibres; cela permet de vérifier le modèle analytique dans le cas où la seule composante d'"embedding" à  $90^\circ$  est activée.

#### 10.4.1.1 Modélisation et solution du problème

Les essais expérimentaux présentés au §10.2.1 peuvent être modélisés par une poutre en flexion "quatre points" avec un assemblage semi-rigide à mi-travée, dont la rigidité élastique en flexion est  $K_{af}$  (Figure 10-7).

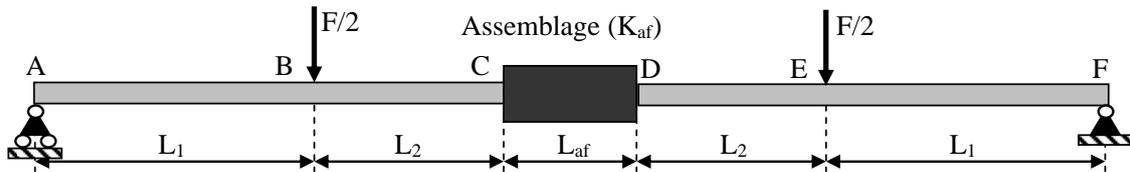


Figure 10-7 Modélisation de la poutre en flexion à 4 points.

Du fait de la symétrie, une demi-poutre peut être étudiée (Figure 10-8). La rigidité élastique en rotation de l'assemblage est alors égale au double de la précédente, car la rotation  $\varphi_C$ , dans la section C, due à la déformation locale de l'assemblage n'est, dans ce cas, que la moitié de celle qui se développe à la Figure 10-7; tandis que le moment appliqué à la section C, lui, est identique dans tous les deux cas.

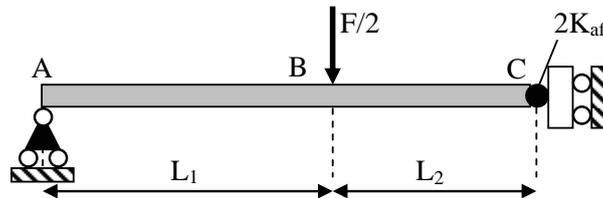


Figure 10-8 Modélisation de la moitié du problème.

Il s'agit d'une structure isostatique soumise à une force concentrée  $F/2$  à la distance  $L_1$  de l'appui. La partie BC de la poutre est en flexion pure et le moment  $M_{BC}$  y vaut  $FL_1/2$ . Ceci entraîne une rotation de l'assemblage  $\varphi_C$  égale à  $FL_1/4K_{af}$ . Par l'équation différentielle, reliant le moment et la déformation en flexion de la poutre (plus des conditions de compatibilité de déformation entre la poutre et les appuis), le déplacement vertical de la section C peut être estimé par la formule suivante:

$$w_c = -\frac{FL_1^3}{12E_b I_b} + \left( \frac{FL_1}{4K_{af}} + \frac{FL_1^2}{2E_b I_b} + \frac{FL_1 L_2}{2E_b I_b} \right) (L_1 + L_2) - \frac{FL_1}{4E_b I_b} (L_1 + L_2)^2 \quad (10.11)$$

où  $E_b I_b$  est la rigidité en flexion de la poutre. Cette formule peut être exprimée sous la forme d'une rigidité de déformation (N/mm), comme suit:

$$\frac{F}{w_c} = \frac{1}{-\frac{L_1^3}{12E_b I_b} + \left( \frac{L_1}{4K_{af}} + \frac{L_1^2}{2E_b I_b} + \frac{L_1 L_2}{2E_b I_b} \right) (L_1 + L_2) - \frac{L_1}{4E_b I_b} (L_1 + L_2)^2} \quad (10.12)$$

Dans le cas des essais expérimentaux, il y a une seule rangée de connecteurs disposée sur l'axe de la poutre, donc  $b_i = 0$  ( $i = 1, n$ ). La rigidité de l'assemblage est alors calculée par la formule réduite (10.13):

$$K_{af} = K_{90} \sum_i a_i^2 \quad (10.13)$$

La rigidité élastique due à l'interaction "broche-bois"  $K_{90}$  est calculée sur base de la composante "broche en flexion" et la composante d'"embedding"  $k_{90}$  ( $k_{90A} = k_{90B} = k_{90}$ ). La dernière est estimée par le modèle 2D analytique proposé au §8.5.2 et la première ( $K_{90}$ ), par le modèle proposé au §9.4.1. Il faut toutefois mentionner que les membrures assemblées, dans ces essais, ne sont pas symétriques comme supposé au §8.5.2. Il nous a donc fallu modifier un peu le modèle analytique en conséquence, mais en s'appuyant toujours, évidemment, sur les mêmes principes. On obtient donc:

$$K_{90} = \frac{[-2 + \cos(2b\beta_{90}) + \cosh(2b\beta_{90})]k_{90}}{4(\sin(2b\beta_{90}) - \sinh(2b\beta_{90}))\beta_{90}} \quad (10.14)$$

Le Tableau 10-3 présente tous les calculs qui conduisent au rapport  $F/w_c$  de la formule (10.12):

Eprouvette	$E_b I_b$ (Nmm <sup>2</sup> )	$L_1$ (mm)	$L_2$ (mm)	$L_{af}$ (mm)	$N_f$	$k_{90}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{90}$ (N/mm)	$K_{af}$ (N/mm)	$F/w_c$ (N/mm)
BC1	1.99E+09	165	65	120	3	608.34	1500.92	1.08E+07	560.07
BC2	1.99E+09	165	65	120	4	608.34	1513.40	1.21E+07	590.61
BC3	2.05E+09	165	65	120	5	608.34	1531.94	1.38E+07	637.41
BC4	2.97E+09	165	65	120	3	608.34	1977.19	1.42E+07	784.40
BC5	3.86E+09	165	65	120	3	608.34	2146.94	1.55E+07	924.22

Tableau 10-3 Rigidités de déformation " $F/w_c$ " calculées analytiquement pour les éprouvettes.

### 10.4.1.2 Comparaison avec les résultats expérimentaux

Dans les diagrammes comparatifs présentés à la Figure 10-9, trois types de courbes peuvent être identifiés:

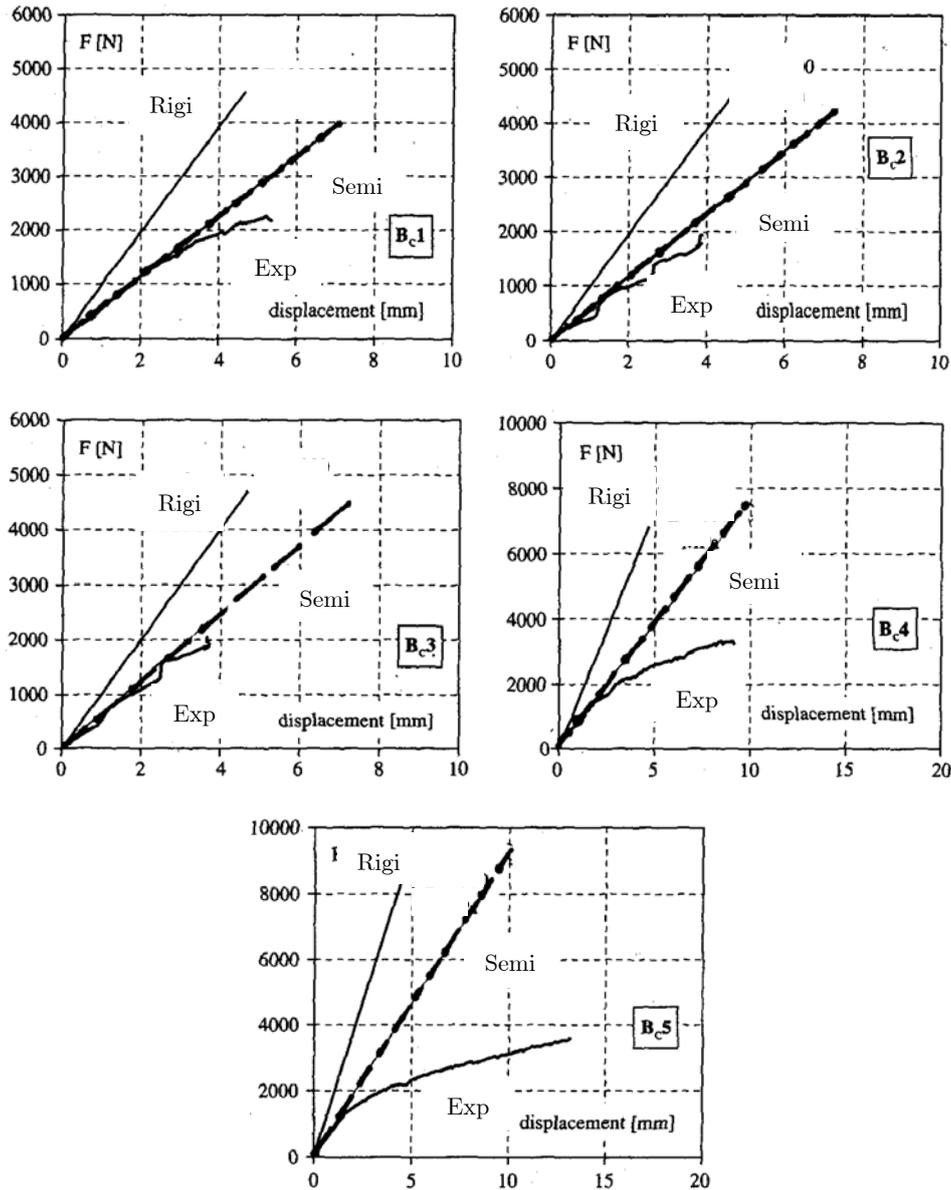


Figure 10-9 Courbes "F-w<sub>c</sub>" expérimentales et analytiques des essais d'assemblages en flexion.

- la courbe "Exp" présente le comportement expérimental "F-w<sub>c</sub>" des éprouvettes;
- la courbe "Semi" présente le comportement élastique "F-w<sub>c</sub>" estimé analytiquement, avec prise en compte de la semi-rigidité de l'assemblage;
- la courbe "Rigi" présente le comportement élastique "F-w<sub>c</sub>" estimé analytiquement en supposant que l'assemblage est rigide.

Les courbes "Exp" et "Rigi" sont reprises de l'article [CAL-2005], tandis que la courbe "Semi" est obtenue via les modèles analytiques proposés de cette thèse (Tableau 10-3).

Les courbes "Rigi" sont beaucoup plus rigides que celles relevées expérimentalement, car elles sont obtenues en supposant que les assemblages sont parfaitement rigides. Par contre, la prise en compte du comportement semi-rigide des assemblages a manifestement amélioré la prédic-

tion du comportement des éprouvettes. Dans tous les diagrammes comparatifs à la Figure 10-9, les courbes "Semi" correspondent presque parfaitement au comportement élastique réel "F-w<sub>c</sub>" des éprouvettes d'essais. Autrement dit, les essais expérimentaux permettent, ici aussi, de valider le modèle analytique proposé.

### 10.4.2 Assemblages en flexion [MER-1995]

La récupération et le retraitement des résultats de [MER-1995] nous a posé des difficultés et, au final, seuls le cas 1 et le cas 4 semblent utilisables. Le cas 1, avec les broches disposées de manière à ce qu'elles travaillent parallèlement aux fibres, permet de vérifier le modèle analytique dans lequel seule la composante d'"embedding" à 0° est activée. Le cas 4, avec les broches disposées à 45° par rapport au repère de la Figure 10-6, permet de vérifier le modèle dans le cas où la composante d'"embedding" à α° (45°) est activée.

A l'aide de la procédure suggérée au §8.5.2, les rigidités de la composante d'"embedding" à 0° et à 90° de compression des fibres sont estimées:  $k_0 = 4788.97 \text{ N/mm}^2$ ;  $k_{90} = 813.043 \text{ N/mm}^2$ .

Grâce au §9.4.1, les rigidités élastiques "broche-bois"  $K_{0°,0°}$  ( $K_0$ ) et  $K_{90°,90°}$  ( $K_{90}$ ) peuvent, elles, être évaluées:  $K_0 = 67217.5 \text{ N/mm}$ ;  $K_{90} = 13315.1 \text{ N/mm}$ .

#### 10.4.2.1 Cas 1, broches disposées avec un angle de 0°

Sur base de la formule (10.9), avec  $a_i = 0$  et  $b_i = 45 \text{ mm}$ , la rigidité élastique de l'assemblage en flexion est calculée par la formule réduite suivante:

$$K_{af} = K_0 \sum_i b_i^2 \quad (10.15)$$

En introduisant les valeurs des paramètres dans la formule, on obtient la rigidité élastique en flexion de l'assemblage:  $K_{af} = 2.72 \times 10^8 \text{ Nmm/rad}$  (ou bien  $4.75 \times 10^3 \text{ Nm/deg}$ ).

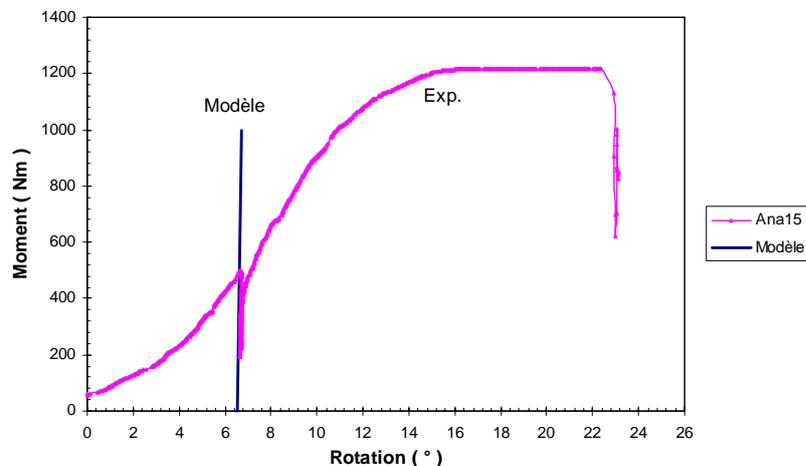


Figure 10-10 Courbes "Moment-Rotation" expérimentale et analytique des éprouvettes d'assemblage en flexion, Cas 1.

Le diagramme comparatif de la Figure 10-10 montre un bon accord de rigidité entre la courbe expérimentale "Exp." et le résultat analytique "Modèle". Le modèle analytique est donc validé.

#### 10.4.2.2 Cas 2, broches disposées à 45° de compression aux fibres

A l'aide de la formule (10.9) avec  $a_i = 45 \text{ mm}$  et  $b_i = 45 \text{ mm}$ , on obtient la rigidité élastique en flexion de l'assemblage:  $K_{of} = 6.52 \cdot 10^8 \text{ Nmm/rad}$  (ou bien  $11.384 \cdot 10^3 \text{ Nm/deg}$ ). En reportant cette valeur dans le diagramme comparatif de la Figure 10-11, on a à nouveau un bon accord de rigidité entre les résultats expérimentaux "Exp." et le résultat analytique "Modèle".

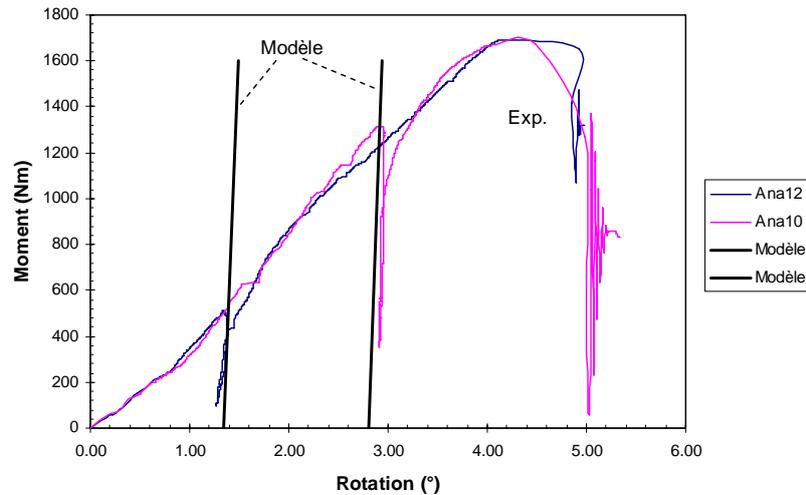


Figure 10-11 Courbes "Moment-Rotation" expérimentales et analytique des éprouvettes d'assemblage en flexion, Cas 4.

## 10.5 Conclusions

A nouveau, la méthode des composantes est appliquée pour prédire le comportement élastique des assemblages en flexion. Puisque les essais d'assemblages correspondants, initialement prévus dans la recherche  $K_{ser}$  comme compléments à l'ensemble des essais précédents, n'ont pas été réalisés au CTIB, il a fallu chercher d'autres données dans la bibliographie et ce, afin de pouvoir valider le modèle analytique proposé.

Des essais intervenant ont été trouvés aux références: [CAL-2005] et [MER-1995]. Les travaux de validation menés sur base de ces essais nous conduisent aux conclusions suivantes:

- le modèle analytique utilisé dans le cas où seule la composante d'"embedding" à  $90^\circ$  ( $k_{90}$ ) est activée est validé par les essais de [CAL-2005];
- le modèle analytique utilisé dans le cas où seule la composante d'"embedding" à  $0^\circ$  ( $k_0$ ) est activée est validé par une série d'essais de [MER-1995];

- le modèle analytique utilisé dans le cas où seule la composante d'"embedding" à  $45^\circ$  ( $k_{45}$ ) est activée est validé par une série d'essais de [MER-1995].

Le nombre limité d'essais d'assemblages disponibles n'est pas suffisant pour couvrir toutes les configurations dans lesquelles la composante d'"embedding" correspond à un angle quelconque de compression des fibres (de  $0^\circ$  à  $90^\circ$ ). De plus, il serait intéressant si le modèle pouvait être validé par des essais dans lesquels plusieurs composantes d'"embedding" correspondant à différents angles de compression des fibres pouvaient être activées en même temps. Mais en fait, vu que le comportement d'une composante d'"embedding"  $k_\alpha$  peut toujours être déduit à partir des deux composantes principales ( $k_\theta$  et  $k_{90}$ ) et qu'en régime élastique, l'application du principe de superposition des effets est applicable, les validations effectuées pour des angles  $\alpha$  de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  et  $45^\circ$  nous semblent être un gage de confiance dans la qualité du modèle proposé.

En somme, des modèles analytiques disponibles pour la prédiction de la rigidité en cisaillement et en flexion d'un assemblage sont proposés dans la partie "Etude des assemblages" de cette thèse. La combinaison des deux permet évidemment de déterminer la rigidité élastique d'un assemblage soumis à la fois au cisaillement et à la flexion.

## **Partie 7 Conclusions**

---

**Partie 7 Conclusions**

Conclusions..... 169  
Perspectives..... 173

## Conclusions

Plusieurs publications, dont l'EC5, portent essentiellement sur la détermination de la résistance des assemblages mécaniques de la construction en bois, mais s'expriment peu sur leur rigidité. Pourtant l'influence du comportement semi-rigide des assemblages dans la structure est aujourd'hui largement reconnue.

Une formule expérimentale proposée par l'EC5 permet de prédire la rigidité des assemblages, mais elle ne satisfait pas les exigences actuelles en matière d'analyse structurale. Par ailleurs, la **méthode des composantes** qui permet la prédiction du comportement semi-rigide des assemblages dans les constructions en acier et en mixtes peut être appliquée à n'importe quel matériau tout en s'appuyant sur le respect de principes physiques de comportement des assemblages et de leurs matériaux constitutifs.

Cette thèse s'est dès lors donnée comme objectif d'étudier les assemblages mécaniques à broches et de développer des modèles analytiques de prédiction de leur comportement sur base des caractéristiques mécaniques du bois et des broches en acier. De plus, la compréhension du comportement élastique des assemblages à broches permet d'envisager sans problème l'étude d'autres assemblages de la même famille.

L'élément commun à l'étude du comportement de tous les assemblages à broches n'est rien d'autre que le binôme "broche-bois". Ce dernier a fondamentalement un caractère tridimensionnel. Mais l'approche proposée permet de le "scinder" en deux comportements 2D dans deux plans perpendiculaires :

- **Dans le plan perpendiculaire à l'axe de la broche**

Il s'agit de la réponse de chaque couche d'épaisseur de la pièce de bois à l'effet d'embedding. Cette réponse caractérise le comportement de la *composante d'embedding*.

- **Dans le plan parallèle à l'axe de la broche**

Il s'agit de la réponse de plusieurs couches d'épaisseur du bois en interaction avec la broche soumise à flexion et *cisaillement* (*l'effet de la déformation en cisaillement est négligeable*). L'effet de cisaillement entre les couches d'épaisseur du bois est également supposé être négligeable. Il ne reste alors que la *composante "broche"*. L'interaction "broche-bois" peut dès lors être considérée comme la réponse d'un système composé de deux composantes: une poutre caractérisée par le comportement de la composante "broche" s'appuie

sur une fondation compressible caractérisée par le comportement de la composante d'embedding

Cette thèse est menée à deux niveaux, qui correspondent à deux étapes d'étude: *étude locale des composantes* et *étude globale des assemblages*. Pour chaque étape d'étude, les conclusions suivantes sont ont été tirées:

- **Etude locale des composantes**

Deux composantes principales sont identifiées: la composante "broche" et la composante d'embedding. La composante "broche" reste souvent en régime élastique, tandis que la composante d'embedding peut travailler même en domaine post-élastique. L'allure non linéaire du comportement "broche-bois" provient donc du caractère non linéaire de la composante d'embedding. Cette remarque permet d'observer le comportement non linéaire de la composante d'embedding au travers du comportement expérimental "broche-bois" obtenu via les essais.

La composante "broche" peut être assimilée à une poutre en flexion. Quant à la composante d'embedding, un modèle 2D numérique et un modèle 2D analytique sont proposés pour la prédiction de son comportement. Ces deux composantes sont ensuite implantées dans un autre modèle 2D numérique (resp. analytique) proposé pour la prédiction du comportement "broche-bois". Les travaux de validation ont permis de conclure que *les modèles numériques et analytiques proposés sont précis*.

- **Modèles 2D numériques**

En régime élastique, le couplage de deux modèles 2D numériques, l'un dans le plan perpendiculaire et l'autre dans le plan parallèle à l'axe de la broche, a donné des résultats qui sont en bon accord avec les essais expérimentaux.

En régime post-élastique, bien que les modèles ne soient pas censés décrire le comportement complet non linéaire "broche-bois", que les paramètres mécaniques (frottement "acier-bois", coefficient de Poisson du bois, module de cisaillement, ...) - qui sont jugés moins importants pour le comportement élastique "broche-bois" - ne soient pas étudiés de façon très rigoureuse, la description non linéaire du comportement "broche-bois" par les modèles est assez correcte. Cela veut dire que ces modèles proposés peuvent éventuellement être utilisés pour étudier également le comportement non linéaire "broche-bois".

- **Modèles 2D analytiques**

Le couplage de deux modèles 2D analytiques permet de prédire la rigidité élastique de la composante d'embedding et puis, de là, la rigidité élastique du binôme "broche-bois".

L'influence du frottement "acier-bois", du coefficient de Poisson et du module de cisaillement sur la rigidité de la composante d'embedding et donc sur la rigidité du binôme "broche-bois" n'est pas significative.

Le diamètre de la broche n'a pas d'influence sur la rigidité d'embedding prédite par le modèle analytique. Les résultats numériques, eux, sont légèrement influencés par ce paramètre. Cette différence trouve son explication dans les hypothèses de calcul qui sont à la base du modèle analytique (plaque de dimensions infinies).

- **Etude globale des assemblages**

Deux types caractéristiques de comportement élastique sont identifiés pour les assemblages mécaniques à broches: les *assemblages en cisaillement simple* et les *assemblages en flexion*. Lorsque ces deux cas sont connus, le comportement élastique d'un assemblage soumis à une sollicitation quelconque peut être déterminé par le principe de superposition.

Le comportement élastique "broche-bois" a de nouveau été étudié au travers d'éprouvettes d'assemblages à une seule broche. Et puis, à partir de là, des modèles ont été proposés pour prédire la rigidité élastique des assemblages en cisaillement ou en flexion.

- **Assemblages à une seule broche**

L'interaction "broche-bois", à l'échelle des assemblages, est également fondée sur deux composantes: la composante "broche" et la composante d'embedding. Un modèle 2D numérique et un modèle 2D analytique sont proposés pour la détermination du comportement "broche-bois". Ils ont été validés par comparaisons avec les essais expérimentaux disponibles. Les conclusions sont similaires à celles tirées à l'issue de l'étude des composantes.

- **Assemblages à plusieurs broches en cisaillement**

Les modèles analytiques proposés sont issus d'un modèle établi par Wilkinson [WIL-1986], mais pour un autre type d'application. Ils concernent la prédiction de la rigidité élastique des assemblages, tandis que le modèle développé par Wilkinson concerne la

distribution des efforts entre les connecteurs, intégrant le comportement complet de chaque binôme "connecteur-bois". Bien qu'un nombre limité de configurations d'assemblage ne soit pas suffisant pour couvrir tous les cas possibles d'application, la validité du modèle semble toutefois avoir été démontrée.

○ **Assemblages en flexion**

Le modèle analytique proposé a été validé dans les cas où la seule composante d'embedding à  $90^\circ$  ou  $0^\circ$  ou  $45^\circ$  est activée. Vu que la réponse d'une composante d'embedding  $k_\alpha$  peut toujours être déduite à partir de deux composantes principales ( $k_0$  et  $k_{90}$ ) et qu'en régime élastique, l'application du principe de superposition des effets est d'actualité, la validation du modèle avec composantes d'embedding à  $0^\circ$  et  $90^\circ$  est suffisamment jugée convaincante.

Malgré tout, il serait intéressant que le modèle puisse un jour être vérifié avec une configuration d'assemblage usuelle dans laquelle plusieurs composantes d'embedding (de  $0^\circ$  à  $90^\circ$ ) sont activées en même temps. Cela permettrait de confirmer la qualité du modèle.

En résumé, l'objectif fixé au départ de la thèse a été atteint. Des modèles analytiques sont développés pour la prédiction de la rigidité élastique des assemblages à broches. Une procédure d'application des modèles est détaillée à l'Annexe D.

## Perspectives

L'application de la méthode des composantes pour la prédiction du comportement élastique des assemblages à broches a donc été couronnée de succès. Ci-après, nous détaillons un certain nombre de travaux complémentaires qu'il serait intéressant de réaliser dans l'avenir:

- **Prédiction du comportement complet des assemblages (rigidité, résistance, ductilité, ...)**

L'étude du comportement non linéaire complet des assemblages en bois peut être également menée sur base de la méthode des composantes appliquée ici uniquement à la prédiction de la rigidité des assemblages. La connaissance de ce comportement permettrait, dans le cadre de la procédure nouvelle de calcul des structures (Figure 2-6), une analyse complète aux ELU et ELS, comme pour les constructions en acier et mixtes.

- **Classification des assemblages**

L'approche semi-rigide de la modélisation des assemblages contient en elle-même l'approche traditionnelle. Pour savoir quand l'approche nouvelle doit être utilisée et ou bien quand l'approche traditionnelle est suffisante, une classification des assemblages s'impose. Trois types de classification peuvent être envisagés pour un assemblage, selon ses trois caractéristiques principales:

- classification en rigidité;
- classification en résistance;
- classification en ductilité.

La mise au point de critères de classification offrirait aux praticiens le choix entre l'approche traditionnelle et l'approche nouvelle pour la modélisation des assemblages et permettrait de dimensionner ces derniers de manière adéquate.

- **Application des résultats obtenus pour les autres assemblages mécaniques**

Les connaissances acquises à l'occasion de cette thèse peuvent être appliquées chez à d'autres types d'assemblages mécaniques. Le tableau ci-après prévient, pour quelques types d'assemblages mécaniques usuels, les composantes qui peuvent être activées:

Connecteurs	Liste des composantes
Pointes, vis	(1) bois en embedding (2) pointe (vis) en flexion et cisaillement (3) pointe (vis) en arrachement
Broches, boulons	(1) bois en embedding (2) broche (boulon) en flexion et cisaillement
Anneaux	(1) bois en embedding
...	...

Il existe probablement bien d'autres composantes que les connaissances acquises de cette thèse ne permettent pas d'aborder. Cela nécessite donc des travaux complémentaires, fondés sur des essais expérimentaux, afin de valider les modèles proposés pour chaque type d'assemblage.

Pour les d'assemblage avec connecteurs métalliques à dents, la relation mécanique entre le bois, les dents métalliques et la plaque métallique devient beaucoup plus complexe que les autres. Cela provient de la nature particulière de ses "composantes" constitutives: le bois avec son matériau anisotrope, les dents métalliques avec leur forme spécifique et la plaque métallique avec son caractère mécanique orthotrope. L'établissement du comportement de ce type d'assemblage nécessite une compréhension de ces trois composantes et de l'interaction mécanique elles; des essais expérimentaux spécifiques et des simulations numériques, de nature différente de celles réalisées dans cette thèse devraient dès lors être mis en œuvre.

Enfin, en vue d'une application par les praticiens de ces outils de caractérisation du comportement des assemblages, une simplification des modèles analytiques proposés, en particulier de celui relatif à la rigidité d'embedding, nous semble devoir faire prioritairement l'objet de travaux futurs.

## Bibliographie

---

- [AIT-1988] Recueil de contributions au calcul des éléments et structures en bois, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux publics (AITBTP), n° 466 p108-110, 1988 .
- [AND] L. ANDRIAMITANTSOA, J.P.BIGER, E. FOURNELY, F. ROUGER, A. VERGNE, "Life duration of wood bolted joints", Laboratoire de Génie Civil CUST, Aubière, France, COST WG3 p 293-301.
- [BLA-1996] H.J. BLASS, 1996, "longueurs de flambement", Structures en bois aux états limites - Introduction à l'Eurocode 5- STEP 1 : Matériaux et bases de calcul, Ed.Sedibois/Union Nationale française de Charpente, Menuiserie, Parquets, Paris (F), p IV-7-1, IV-7-9.
- [BLE-2000] L. BLÉRON, 2000, "Contribution à l'optimisation des performances d'assemblages bois en structure. Analyse de la portance dans les assemblages de type tige" Thèse de doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy I, France.
- [BLE-2001] L.BLERON,J.F. BOCQUET, G. DUCHANOIS, P. TRIBOULOT, 2001, "Contribution to the optimization of timber joints performances – Analysis of dowel type fasteners embedment strength", Proceedings of the Rilem PRO 22, Stuttgart (D).
- [BOC-1997] J. F. BOCQUET, 1997, "Modélisation des déformations locales du bois dans les assemblages broches et boulonnes", Thèse de Docteur, Université Blaise Pascal-Clermont II.
- [BOU] A. BOUCHAIR, A. VERGNE, "Numérical analysis of wood bolted joints – Influence of various local parameters", COST WG6 p 503-513.
- [BOU-1993] A. BOUCHAIR, 1993, "Modélisation non linéaire du comportement local des assemblages bois", Thèse de Docteur, Université Blaise Pascal-Clermont II.
- [BEH-1997] La maison en bois vous séduit. Bois et habitat A.S.B.L. B-1325 Vieusart.
- [CAL-2005] B. CALDERONI, G. DE MATTEIS, C. GIUBILEO & F. M. MAZZOLANI, 2005, "Experimental analysis on mechanical connections for ancient chestnut beams", COST C12 p.607-614.
- [CAP-1994] S. CAPRETTI, A. CECOTTI, 1994: "On the experimental determination of factor kdef and slip modulus kser from short- and long-term tests on a timber-concrete composite (TCC) beam", CIB W18, Proceedings Meeting 27, Sydney (Au). Paper CIB-W18/27-20-2.

- [CAR-1999] E.V.M. CARRASCO, C. F. BREMER, 1999, "Glulam structural connections under combined efforts", Proceedings of the 1st Rilem Symposium on Timber Engineering, Stockholm (Sweden).
- [CEB] Construire en bois (CEB), pages 28 à 31.
- [CEB2] Construire en bois 2 (CEB2), pages 36 et 37
- [CHU-1987] Y.H. CHUI, 1987, "Proposed Code and Development Association", CIB W18, Proceedings Meeting 20, Dublin (Ir). Paper CIB-W18/20-8-1.
- [CIB] CIBA, Etude d'assemblages mécaniques pour charpentes en bois lamellé-collé, Courrier de l'industriel du bois et de l'ameublement (CIBA) - étude générale R303, Paris, p1-23.
- [COST-C1] COST C1, 1992-1999, "Semi-rigid timber joints structural behaviour, modelling and new technologies", Final report of working group "timber joints", Edited by Peer Haller, Technisch Universität Dresden, Germany.
- [CRA-1968] CALVIN O. CRAMER, 1968, "Load distribution in multiple-bolt tension joints", Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 94, No. ST5, May 1968.
- [CTB-1995] CTBA, Les assemblages dans les constructions en bois, 1995, Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (CTBA), Paris (F), p49-50.
- [CTI-2004] N. FRANCOIS, J. P. JASPART, L. LY, 2004, "K\_ser, Modélisation de la déformation dans les modules de calcul des assemblages en bois", CTIB, Centre Technique de l'Industrie du Bois.
- [CUR-1996] I. CURTU, C. LAZARESCU, R. CRISAN, M. BARBU, A. POPA, 1996, "Rheological wood properties applied in wood joint adjust", Proceedings of the International COST 508 Wood Mechanics Conference, Stuttgart (D).
- [DEV-2000] F. DEVOS, 2000, "Assemblages semi-rigides", Formation bois UCL- M4-structure –assemblages, Louvain-la-Neuve (B).
- [EHL-1996] J. EHLBECK, H. WERNER, 1996, "Assemblages par boulons et broches – Partie II" Structures en bois aux états limites - Introduction à l'Eurocode 5- STEP 1 : Matériaux et bases de calcul, Ed.Sedibois/Union Nationale française de Charpente, Menuiserie, Parquets, Paris (F), p V-10-1 à V-10-7.
- [EN1193] EN 1193, Structure en bois - Bois de charpente et bois lamellé-collé – Détermination de la résistance au cisaillement et des propriétés mécaniques perpendiculaires aux fibres, Octobre 1997.
- [EN1993] Eurocode 3, Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints, december 2003.
- [EN1994] Eurocode 4, Design of composite steel and concrete structures - Part 1.1:

- [EN1995] Eurocode 5 - Design of Timber Structures, 1993, Proceedings of the International Workshop on Wood Connectors, Forest Product Society.
- [EN26891] EN 26891, Structures en bois – Assemblages réalisés avec des éléments mécaniques de fixation – Principes généraux pour la détermination des caractéristiques de résistance et de déformation.
- [EN338] EN 338, Bois de structures - Classes de résistance.
- [EN383] EN 383, Structures en bois – Méthodes d'essais – Détermination de caractéristiques de fondation et de la portance locale d'éléments d'assemblage de type broche.
- [FRA-2002] J. M. FRANSSSEN, 2002, "Construction en bois", Cours à l'intention des ingénieurs Civils Architectes et des Ingénieurs Civils des Constructions, Année académique 2001-2002.
- [GUI-1987] D. GUITARD, 1987, Mécanique du matériau bois et composite.
- [GUN-1989] R. GUNNEWIJK, A. J. M. LEIJTEN, 1989, "Plasticity requirements for portal frame corners", CIB W18A Proceedings Meeting 22, Berlin (G). Paper CIB-W18A/22-7-5.
- [HAK-a] H. HAKKARAINEN, "Influence of semi-rigidity of the joint on the structure - Optimization of the semi-rigid connections of the portal frame", Laboratory of Structural Engineering and Building Physics, Finland.
- [HAK-b] H. HAKKARAINEN, "Influence of semi-rigidity of the joint on the structure – Comparison of the rotational stiffness and pin-connected joint models in the designing of the nail plate structures", Laboratory of Structural Engineering and Building Physics, Finland.
- [HAL-1998] P. HALLER, 1998: "Timber joints in joint research", proceedings of the Cost C1 Conference, Liège (B).
- [HIL-1950] R. HILL, 1950, "The mathematical theory of plasticity", The Oxford Engineering Science Series.
- [HIL-1996] B.O. HILSON, 1996 : "Assemblages cloués – partie I", Structures en bois aux états limites - Introduction à l'Eurocode 5- STEP 1 : Matériaux et bases de calcul, Ed.Sedibois/Union Nationale française de Charpente, Menuiserie, Parquets, Paris (F), p V-4-4 à V-4-9.
- [INT-a] <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/bois>
- [INT-b] <http://oak.arch.utas.edu.au/tbia/default.asp>
- [INT-c] il n'est plus disponible sur internet
- [INT-d] <http://passion.bois.free.fr/ebenisterie/assemblages.htm>
- [INT-e] <http://www.menuiserie-caserotto.com/guide/assemblages/index.htm>
- [INT-f] <http://debricole.free.fr/htfr/0007.htm>
- [INT-g] [http://www.cwc.ca/products/connections/heavy\\_connections/split\\_rings.php](http://www.cwc.ca/products/connections/heavy_connections/split_rings.php)

- [JAS-1999] J. P. JASPART, 1999, "Semi-rigid behaviour of civil engineering structural connections", Cost C1, Recent advances in the field of structural steel joints and their representation in the building frame analysis and design process, Bruxelles (B).
- [JAS-1997] J. P. JASPART, 1997, "Contributions to recent advances in the field of steel joints. Column bases and further configurations for beam-to-column joints", Thèse d'agrégation de l'enseignement supérieur, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, Département M.S.M, février 1997.
- [JEN] J.L. JENSEN and H.J. LARSEN, 1998: "Modelling of semi-rigid joints and their influence on the behaviour of structures", Proceedings of the 5th WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, Montreux (S).
- [KEV-1993] A. KEVARINMAKI, J. KANGAS, 1993, "Rotational stiffness of nail plates in moment anchorage", CIB W18, Proceedings Meeting 26, Athens (USA). Paper CIB-W18/26-14-3.
- [KEV-1995] A. KEVARINMAKI, 1995, "Bolt joints of kerto-LVL reinforced with nail plates", Helsinki university of Technology report 49 HUT/LSEB, Helsinki (Finland).
- [KIK-1991] S. KIKUCHI: "Stresses and deformations of timber", proceedings of the 1991 INTERNATIONAL TIMBER ENGINEERING CONFERENCE LONDON p 2383-2390.
- [KOM-1994] K. KOMATSU, 1994, "Glulam arch Bridge and design of its moment-resisting joint", CIB W18, Proceedings Meeting 27, Sydney (Au). Paper CIB-W18/27-7-1.
- [LAN-1969] G. LANTOS, 1969, "Load distribution in a row of fasteners subjected to lateral load", Wood Science, Vo. 1, No. 3, Jan., 1969, pp. 129-136.
- [LAR-1998] H.J. LARSEN, 1998, "Influence of semi-rigidity of joints on the structure ", proceedings of the Cost C1 Conference, Liège (B).
- [LEI-a] Ad. J. M. LEIJTEN, "Joint behaviour and static of structures with semi-rigid joints", Delft University of Technology, Netherlands.
- [LEI-b] Ad. J. M. LEIJTEN, P.RAGUPATHY, K.S. VIRDI, "Rotation Capacity of semi-rigid Joints in timber frames", COST WG3 p335-345.
- [LEK-1968] S. G. LEKHNITSKII, 1968, Anisotropic Plates, Gordon and Breach science publishers.
- [LY-2004] L. LY, M. VERSTRAETE, N. FRANCOIS, J. P. JASPART, 2004, "Rapport des essais de matériau de bois", Laboratoire M&S, Université de Liège, Belgique.
- [MER-1995] ANNE MERTENS, 1995, "Etude de la transmission de la flexion dans les assemblages en bois", Travail de fin d'étude, Faculté Polytechnique de Mons,

- Belgique.
- [MIS-1999] A. MISCHLER, 1999, "Doweled timber connections with high efficiency", Proceedings of the 1st Rilem Symposium on Timber Engineering, Stockholm (Sweden).
- [NAT-1999] B. NATALINO, S. ALBERTO, 1999, "Effectiveness of bolts in multiple connections", Proceedings of the 1st Rilem Symposium on Timber Engineering, Stockholm (Sweden).
- [NAT-2004] J. Natterer, J. L. Sandoz et M. Rey, 2004, "Construction en bois, matériau, technologie et dimensionnement", Traité de Génie Civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
- [NOR-1986] B. NOREN, 1986, "Design of joints with nail plates – principles", CIB W18, Proceedings Meeting 19, Florence(I). Paper CIB-W18/19-7-7.
- [prEN1193] prEN 1193, Structures en bois - Bois de charpente et bois lamellé collé – Détermination de la résistance au cisaillement et des propriétés mécaniques perpendiculaires aux fibres.
- [prEN1194] prEN 1194, Structures en bois - Bois lamellé collé - Classes de résistance et détermination des valeurs caractéristiques.
- [prEN14080] prEN 14080, Structures en bois - Bois lamellé collé – Exigences.
- [prEN1993] prEN 1993-1-8, Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 1-8 : calcul d'assemblages.
- [prEN1995] prEN 1995-1-1, Eurocode 5 - Calcul des structures en bois - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments.
- [prEN384] prEN 384, Bois de structure – Détermination des valeurs des propriétés mécaniques et de la masse volumique.
- [prEN408] prEN 408, Structures en bois – Bois de structure et bois lamellé collé - Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques.
- [RAC-1992] P. RACHER, P. GALLIMARD, 1992, "Les assemblages de structures bois – comportement mécanique des principaux types d'assemblages", Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux publics n° 504 p 30-38.
- [RAC-1996] P. RACHER, 1996, "Liaisons sollicitées en flexion", Structures en bois aux états limites - Introduction à l'Eurocode 5 - STEP 1 : Matériaux et bases de calcul, Ed.Sedibois/Union Nationale française de Charpente, Menuiserie, Parquets, Paris (F), p V-16-5 à V-16-13.
- [RAC-1997] P. RACHER, 1997, "Angles de portique", Structures en bois aux états limites - Introduction à l'Eurocode 5 - STEP 2: Calcul de structures Ed.Sedibois/Union Nationale française de Charpente, Menuiserie, Parquets, Paris (F), p VI-4-1 à VI-4-9.
- [ROD-1998] P.D. RODD, 1998: "Improvement of the structural behaviour of timber joints

- ", proceedings of the Cost C1 Conference, Liège (B).
- [SAN-2001] C. SANTANA, N. MASCIA, 2001, "Modeling of semi-rigid nailed joints for application in structural analysis", Proceedings of the Rilem PRO 22, Stuttgart (D).
- [SMI-1985] I. SMITH, L. R. J. WHALE, 1985, "The influence of the orientation of mechanical joints on their mechanical properties", CIB W18, Proceedings Meeting 18, Beit Oren (Israel). Paper CIB-W18/18-7-2.
- [SMI-1987] I. SMITH, 1987, "Modelling the load-deformation behaviour of connections with pin-type fasteners under combined moment, thrust and shear forces", CIB W18, Proceedings Meeting 20, Dublin (Ir). Paper CIB-W18/20-7-4.
- [STE-1993] E.G. STERN, 1993, "Definitions of terms and multi-language terminology pertaining to metal connector plates", CIB W18, Proceedings Meeting 26, Athens (USA). Paper CIB-W18/26-7-3.
- [STE-1995] STEP 1, 1995, Basis of design, material properties, structural components and joints, First edition, Centrum Hout, Netherlands  
STEP 2, 1995, Design-Details and structural systems, First edition, Centrum Hout, Netherlands
- [STS31] STS 31, Charpenterie
- [TGC] Traité de génie civil (TGC) - volume 13, pages 76 à 80 .
- [TSA-1971] STEPHEN M. TSAI and EDWARD M. WU, 1971, "A general theory of strength for anisotropic materials", J. Composite materials, Vol. 5 (January 1971), p.58.
- [VAN] J. W. VAN DE KUILEN, "Effects of Creep on the Stiffness of Timber Joints", COST WG3 p 327-333
- [VER-1998] A. VERGNE, 1998, "Testing and modelling of the load-carrying behaviour of timber joints", proceedings of the Cost C1 Conference, Liège (B).
- [WER-1994] H. WERNER, 1994, "Characteristic load-carrying capacity of joints with dowel-type fasteners in regard to the system properties", CIB W18, Proceedings Meeting 27, Sydney (Au). Paper CIB-W18/27-7-2.
- [WHA-1986] L. R. J. WHALE, I. SMITH, B.O. HILSON, 1986, "Behaviour of nailed and bolted joints under short-term lateral load – conclusions from some recent research", CIB W18, Proceedings Meeting 19, Florence(I). Paper CIB-W18/19-7-1.
- [WHA-1986] L. R. J. WHALE, I. SMITH, 1986, "The derivation of design clauses for nailed and bolted joints in Eurocode 5", CIB W18, Proceedings Meeting 19, Florence(I). Paper CIB-W18/19-7-6.
- [WIL-1971] T. L. WILKINSON, 1971, "Theoretical lateral resistance of nailed joints", Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of

- Civil Engineers, Vol. 97, No. ST5, May 1971.
- [WIL-1972] T. L. WILKINSON, 1972, "Analysis of nailed joints with dissimilar members", Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 98, No. ST9, Septembre 1972.
- [WIL-1986] T. L. WILKINSON, 1986, "Load distribution among bolts parallel to load", Journal of Structural Engineering, Vol.112, No. 4, April 1986.
- [YAS-1987] M. YASUMURA, T. MUROTA, J. SAKAI, 1987, "Ultimate properties of bolted joints in glued-laminated timber", CIB W18, Proceedings Meeting 20, Dublin (Ir). Paper CIB-W18/20-7-3.



## **Annexes**

---

## **Annexes**

### **Annexe A Rigidité de la composante d'"embedding"**

A.1 Théorie de l'élasticité anisotrope de la plaque, état plan de contraintes .....	183
A.1.1 Génération de l'état plan de contraintes.....	183
A.1.2 Génération de la fonction d'Airy .....	185
A.1.3 Calcul des contraintes à partir de la fonction d'Airy.....	186
A.1.4 Plaque avec un trou au milieu sur lequel on impose des efforts .....	187
A.2 Application .....	189
A.2.1 Problème traité .....	189
A.2.2 Analyse du problème.....	189
A.2.3 Remarque.....	191
A.3 Conclusions .....	191

### **Annexe B Rigidité d'un assemblage à une broche**

B.1 Introduction .....	193
B.2 Modèle .....	193
B.3 Solution.....	194
B.4 Conclusions .....	197

### **Annexe C Essais expérimentaux**

C.1 Essais de portance locale.....	199
C.2 Essais sur les assemblages simples moisés, compression à 0° .....	219
C.3 Essais sur les assemblages simples moisés, compression à 0° et 90° .....	221
C.4 Essais sur les assemblages simples moisés, à deux broches, compression à 0°.....	223
C.5 Essais sur les assemblages simples moisés, à deux broches, compression à 0°et à 90° ..	225
C.6 Essais sur les assemblages simples moisés, à deux broches, compression à 0°et à 90° ..	227

### **Annexe D Méthode de prédiction analytique de la rigidité élastique des assemblages à broches**

D.1 Introduction .....	229
D.2 Assemblages en cisaillement, moisés à 0°-0° .....	230
D.3 Assemblages en cisaillement, moisé à 0°- $\alpha^\circ$ .....	231
D.4 Assemblages en flexion.....	234

# Annexe A Rigidité de la composante d'"embedding"

L'annexe A reflète les travaux à caractère théorique relatifs à la proposition d'un modèle analytique de prédiction du comportement élastique de la composante d'"embedding". Ces travaux constituent une application adaptée à cette thèse de solutions disponibles à la référence [LEK-1968].

## A.1 Théorie de l'élasticité anisotrope de la plaque, état plan de contraintes

### A.1.1 Génération de l'état plan de contraintes

On considère une plaque anisotrope en équilibre sollicitée par des forces qui satisfont les hypothèses suivantes:

- les forces appliquées sur la plaque agissent dans des plans parallèles à la surface moyenne;
- la distribution des forces est strictement symétrique par rapport à la surface moyenne;
- la déformation de la plaque au cours de son chargement est supposée petite.

Grâce à ces hypothèses, la plaque étudiée peut être représentée par sa surface moyenne. Appelons  $t$  son épaisseur;  $X_n, Y_n$  les composantes de la force distribuée sur le bord, par une unité de surface;  $X, Y$  les composantes de la force volumique, par unité de volume dans un repère  $x, y, z$ .

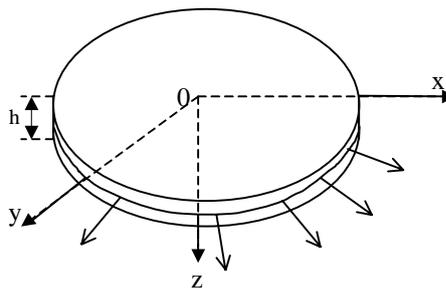


Figure A.1-1 Système de coordonnées d'un élément plaque.

Sachant que l'état plan de contraintes en un point est constant sur toute l'épaisseur, on travaille dorénavant avec les contraintes moyennes sur la surface moyenne de la plaque.

En absence de forces volumiques, un état de contraintes en un point  $(x, y)$  doit satisfaire:

- les équations d'équilibre:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.1})$$

- les équations constitutives:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{16}\tau_{xy} \\ \varepsilon_y &= a_{21}\sigma_x + a_{22}\sigma_y + a_{26}\tau_{xy} \\ \gamma_{xy} &= a_{61}\sigma_x + a_{62}\sigma_y + a_{66}\tau_{xy} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.2})$$

- les équations de compatibilité:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (\text{A.3})$$

La pièce soumise à une distribution de force au bord satisfait également:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x n_x + \tau_{xy} n_{xy} &= X_n \\ \tau_{xy} n_x + \sigma_y n_{xy} &= Y_n \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.4})$$

A partir des équations d'équilibre (A.1), on définit une fonction dite d'Airy  $F$  telle que:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}; \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}; \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \quad (\text{A.5})$$

A partir de (A.3), on écrit la condition de compatibilité de déformation sous la forme:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = 0 \quad (\text{A.6})$$

Si l'on se réfère aux expressions de  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$  ( $\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy}$ ) - données par (A.2) - et de  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  - fournies par (A.5) -, on obtient une équation différentielle à laquelle la fonction d'Airy doit satisfaire:

$$a_{22} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} - a_{26} \frac{\partial^4 F}{\partial x^3 \partial y} + (2a_{12} + a_{66}) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} - 2a_{16} \frac{\partial^4 F}{\partial x \partial y^3} + a_{11} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = 0 \quad (\text{A.7})$$

Dans le cas d'un matériau orthotrope dont les 2 directions principales coïncident avec celles du repère  $(x, y)$ , (A.7) se transforme en:

$$\frac{1}{E_2} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{1}{E_1} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = 0 \quad (\text{A.8})$$

Où  $E_1, E_2$  sont les modules Young selon les 2 directions principales  $x$  et  $y$ ;  $G_{12}$ , le module de cisaillement;  $\nu_{12}$ , le coefficient de Poisson.

On étudie maintenant une surface  $S$  définie par deux contours,  $C_1$  et  $C_2$ .

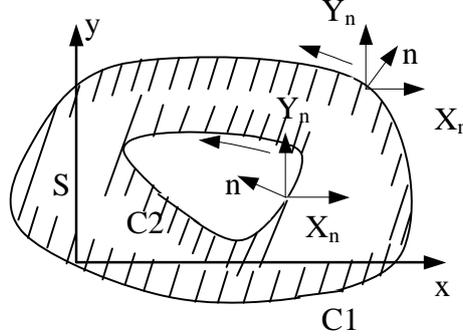


Figure A.1-2 Convention du vecteur normal du contour dans l'analyse de la plaque.

L'équation de contour peut être définie par les équations paramétriques,  $x = x(s)$ ,  $y = y(s)$ . Il convient alors de définir la relation entre la tangente  $ds$  et la normale  $n$  pour  $C_1$  et  $C_2$ , respectivement:

$$n_x = \pm \frac{dy}{ds}; n_y = \mp \frac{dx}{ds} \quad (\text{A.9})$$

$F$  devrait en plus satisfaire les conditions de bord. Dans le cas de la force imposée, en introduisant (A.9) dans (A.4):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x} &= \int_0^s \mp Y_n ds + c_1 \\ \frac{\partial F}{\partial y} &= \int_0^s \pm X_n ds + c_2 \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.10})$$

Dans le cas de déplacements imposés,  $u^*$  et  $v^*$  sont les déplacements au bord de la plaque:

$$u = u^*; v = v^* \quad (\text{A.11})$$

### A.1.2 Génération de la fonction d'Airy

Comme mentionné au-dessus, l'état plan de contraintes dans une pièce plane sera résolu au moyen de la fonction d'Airy (A.7). Cette fonction peut être réécrite sous une autre forme en utilisant 4 opérations différentielles de premier ordre:

$$D_1 D_2 D_3 D_4 F = 0 \quad (\text{A.12})$$

avec:

$$D_k = \frac{\partial}{\partial y} - \mu_k \frac{\partial}{\partial x} \quad (\text{A.13})$$

où  $\mu_k$  satisfait l'équation caractéristique:

$$a_{11}\mu^4 - 2a_{16}\mu^3 + (2a_{12} + a_{66})\mu^2 - 2a_{26}\mu + a_{22} = 0 \quad (\text{A.14})$$

Dans le cas du matériau orthotrope, (A.14) est plus simple:

$$\mu^4 + \left(\frac{E_1}{G} - 2\nu_1\right)\mu^2 + \frac{E_1}{E_2} = 0 \quad (\text{A.15})$$

Il est évident que les racines de l'équation (A.15) sont complexes. Les 4 racines seront de la forme ci-dessous:

$$\mu_1 = \alpha + \beta i, \overline{\mu_1} = \alpha - \beta i, \mu_2 = \gamma + \delta i, \overline{\mu_2} = \gamma - \delta i \quad (\text{A.16})$$

D'après [LEK-1968], l'équation (A.12) aboutit à une fonction  $F$  de forme:

$$F = F_1(x + \mu_1 y) + F_2(x + \mu_2 y) + F_3(x + \overline{\mu_1} y) + F_4(x + \overline{\mu_2} y) \quad (\text{A.17})$$

$F_1, F_2, F_3, F_4$  sont les fonctions de  $(x + \mu_k y)$

En nommant:

$$z_1 = x + \mu_1 y; z_2 = x + \mu_2 y; \overline{z_1} = x + \overline{\mu_1} y; \overline{z_2} = x + \overline{\mu_2} y \quad (\text{A.18})$$

la fonction  $F$  peut s'exprimer sous une autre forme:

$$F = 2\text{Re}[F_1(z_1) + F_2(z_2)] \quad (\text{A.19})$$

### A.1.3 Calcul des contraintes à partir de la fonction d'Airy

Nommons:

$$\phi_1(z_1) = \frac{\partial F_1}{\partial z_1}; \phi_2(z_2) = \frac{\partial F_2}{\partial z_2}; \phi'_1(z_1) = \frac{\partial^2 F_1}{\partial z_1^2}; \phi'_2(z_2) = \frac{\partial^2 F_2}{\partial z_2^2} \quad (\text{A.20})$$

Sur base de la théorie de l'état plan de contraintes (§A.1.1), les contraintes et les déplacements en un point sont calculés comme suit:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= 2\text{Re}[\mu_1^2 \phi'_1(z_1) + \mu_2^2 \phi'_2(z_2)] \\ \sigma_y &= 2\text{Re}[\phi'_1(z_1) + \phi'_2(z_2)] \\ \tau_{xy} &= -2\text{Re}[\mu_1 \phi'_1(z_1) + \mu_2 \phi'_2(z_2)] \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.21})$$

$$\left. \begin{aligned} u &= 2 \operatorname{Re}[p_1 \phi_1(z_1) + p_2 \phi_2(z_2)] - \omega y + u_o \\ v &= 2 \operatorname{Re}[q_1 \phi_1(z_1) + q_2 \phi_2(z_2)] + \omega x + v_o \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.22})$$

Avec:

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= a_{11} \mu_1^2 + a_{12} - a_{16} \mu_1, p_2 = a_{11} \mu_2^2 + a_{12} - a_{16} \mu_2 \\ q_1 &= a_{12} \mu_1 + \frac{a_{22}}{\mu_1} - a_{26}, q_2 = a_{12} \mu_2 + \frac{a_{22}}{\mu_2} - a_{26} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.23})$$

$\omega, u_o, v_o$  sont des constantes arbitraires qui caractérisent les déplacements en translation et en rotation de la plaque sans déformation (déplacements de corps rigide).

Sachant que la fonction d'Airy  $F$  peut être décrite, soit dans l'espace des variables réelles ( $x, y$ ), soit dans l'espace des variables complexes ( $z_1, z_2$ ), les formules (A.10) et (A.11) sont modifiées comme suit:

- Distribution des efforts imposée:

$$\left. \begin{aligned} 2 \operatorname{Re}[\phi_1(z_1) + \phi_2(z_2)] &= \mp \int_0^s Y_n ds + c_1 \\ 2 \operatorname{Re}[\mu_1 \phi_1(z_1) + \mu_2 \phi_2(z_2)] &= \pm \int_0^s X_n ds + c_1 \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.24})$$

- Déplacements imposés:

$$\left. \begin{aligned} 2 \operatorname{Re}[p_1 \phi_1(z_1) + p_2 \phi_2(z_2)] &= u^* + \varpi y - u_o \\ 2 \operatorname{Re}[q_1 \phi_1(z_1) + q_2 \mu_2 \phi_2(z_2)] &= v^* - \varpi x - v_o \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.25})$$

#### A.1.4 Plaque avec un trou au milieu sur lequel on impose des efforts

Considérons une plaque faite d'un matériau homogène anisotrope de forme donnée et percée d'un trou de forme elliptique sur lequel s'applique une distribution d'efforts. Il s'agit d'étudier l'état de contraintes et de déformations en un point de cette plaque. Dans le cas où le trou est petit par rapport à la plaque et ne se trouve pas juste à côté d'un bord, on suppose que la plaque est à dimension indéfinie et qu'il n'y a pas d'effets de bord sur l'état de contraintes et de déformations des points au voisinage du trou. Ce cas est traité ci-dessous.

On voit sur la Figure A.1-3 que  $x$  et  $y$  sont les axes de coordonnées;  $a_{ij}$ , les constantes élastiques (loi de Hook);  $a, b$ , les demi-axes elliptiques;  $t$ , l'épaisseur de la plaque;  $X_n, Y_n$ , les composantes suivant  $x$  et  $y$  de la distribution des efforts sur le bord du trou;  $P_x, P_y$ , l'intégrale suivant  $x$  et  $y$  de la distribution des efforts sur le bord.

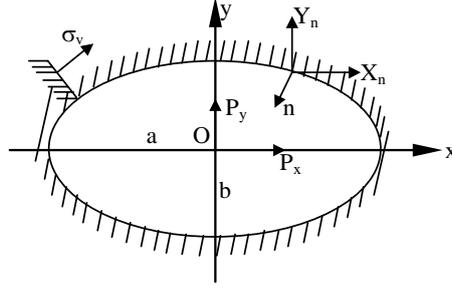


Figure A.1-3 Plaque avec un trou au milieu sur lequel on impose des efforts.

L'équation du contour elliptique peut être exprimée sous la forme paramétrique:

$$x = a \cos(\theta); y = b \sin(\theta); 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (\text{A.26})$$

En développant  $X_n$  et  $Y_n$  en séries complexes, on obtient les expressions complexes des  $\phi_1(z_1)$  et  $\phi_2(z_2)$  (voir(A.24)):

$$\left. \begin{aligned} 2 \operatorname{Re}[\phi_1(z_1) + \phi_2(z_2)] &= \frac{P_y}{2\pi t} \theta + \alpha_0 + \sum_m (\alpha_m e^{im\theta} + \bar{\alpha}_m e^{-im\theta}) \\ 2 \operatorname{Re}[\mu_1 \phi_1(z_1) + \mu_2 \phi_2(z_2)] &= -\frac{P_x}{2\pi t} \theta + \alpha_0 + \sum_m (\beta_m e^{im\theta} + \bar{\beta}_m e^{-im\theta}) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.27})$$

$\alpha_m, \bar{\alpha}_m, \beta_m, \bar{\beta}_m$  sont les coefficients complexes obtenus en développant en série la partie droite de (A.24);  $\alpha_0, \beta_0$  sont les constantes arbitraires.

Selon [LEK-1968], la solution de (A.27) peut s'exprimer comme suit:

$$\left. \begin{aligned} \phi_1(z_1) &= A_0 + A \ln \zeta_1 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\bar{\beta}_m - \mu_2 \bar{\alpha}_m}{\mu_1 - \mu_2} \zeta_1^{-m} \\ \phi_2(z_2) &= B_0 + B \ln \zeta_2 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\bar{\beta}_m - \mu_1 \bar{\alpha}_m}{\mu_1 - \mu_2} \zeta_2^{-m} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.28})$$

où:

$$\zeta_1 = \frac{z_1 + \sqrt{z_1^2 - a^2 - \mu_1^2 b^2}}{a - i\mu_1 b}; \zeta_2 = \frac{z_2 + \sqrt{z_2^2 - a^2 - \mu_2^2 b^2}}{a - i\mu_2 b} \quad (\text{A.29})$$

Pour les pointes sur l'ouverture,  $\zeta_1 = e^{i\theta}$ ;  $\zeta_2 = e^{i\theta}$

$A_0$  et  $B_0$  sont des constantes arbitraires concernant les déplacements du corps rigide  $\omega_0, u_0, v_0$  -voir (A.22)-;  $A$  et  $B$  sont exprimés implicitement:

$$\left. \begin{aligned} A + B - \bar{A} - \bar{B} &= \frac{P_y}{2\pi t l} \\ \mu_1 A + \mu_2 B - \bar{\mu}_1 \bar{A} - \bar{\mu}_2 \bar{B} &= \frac{P_x}{2\pi t i} \\ \mu_1^2 A + \mu_2^2 B - \bar{\mu}_1^2 \bar{A} - \bar{\mu}_2^2 \bar{B} &= -\frac{a_{16}}{a_{11}} \frac{P_x}{2\pi t i} - \frac{a_{12}}{a_{11}} \frac{P_y}{2\pi t i} \\ \frac{1}{\mu_1} A + \frac{1}{\mu_2} B - \frac{1}{\bar{\mu}_1} \bar{A} - \frac{1}{\bar{\mu}_2} \bar{B} &= \frac{a_{12}}{a_{22}} \frac{P_x}{2\pi t i} + \frac{a_{26}}{a_{22}} \frac{P_y}{2\pi t i} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.30})$$

En dérivant  $\phi_1(z_1)$  et  $\phi_2(z_2)$ , on obtient:

$$\left. \begin{aligned} \phi_1'(z_1) &= \frac{1}{\sqrt{z_1^2 - a^2 - \mu_1^2 b^2}} \left( A - \sum_{m=1}^{\infty} m \frac{\bar{\beta}_m - \mu_2 \bar{\alpha}_m}{\mu_1 - \mu_2} \zeta_1^{-m} \right) \\ \phi_2'(z_2) &= \frac{1}{\sqrt{z_2^2 - a^2 - \mu_2^2 b^2}} \left( B - \sum_{m=1}^{\infty} m \frac{\bar{\beta}_m - \mu_1 \bar{\alpha}_m}{\mu_1 - \mu_2} \zeta_2^{-m} \right) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.31})$$

## A.2 Application

### A.2.1 Problème traité

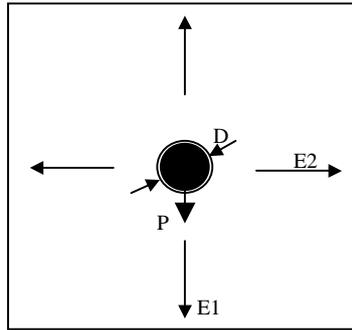


Figure A.2-1 Modèle analytique pour la composante d'"embedding"

La Figure A.2-1 représente l'enfoncement, sous l'action de la force  $P$ , d'une tige de diamètre  $D$ , supposée infiniment rigide, dans une plaque de dimensions indéfinies faite d'un matériau orthotrope dont les propriétés sont les suivantes: modules d'élasticité  $E_1$  et  $E_2$ , coefficient de Poisson  $\nu_{12}$  et module de cisaillement  $G_{12}$ .

La rigidité d'"embedding" peut être évaluée comme le rapport entre la force  $P$  appliquée sur la tige et l'enfoncement dans le milieu élastique orthotrope.

### A.2.2 Analyse du problème

Le problème est étudié dans le domaine élastique, dans l'hypothèse de petites déformations; de plus, la tige est supposée en contact parfait contre le bois. Enfin, il est supposé qu'il n'y a pas de frottement entre la tige en acier et le bois. Par contact entre la tige et le bois, la force

$P$  se répartit sur le bord du trou (pression diamétrale); les contraintes atteignent leur valeur maximale en B et diminuent régulièrement jusqu'à s'annuler en D' et D''.

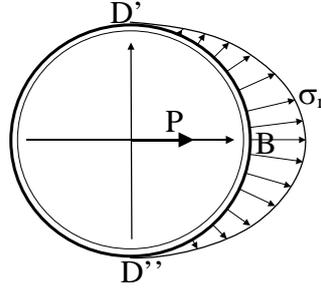


Figure A.2-2 La répartition des efforts sur le bord du trou.

La fonction proposée pour traduire la distribution des efforts diamétraux sur le bord de l'ouverture est la suivante:

$$\sigma_r = \frac{2}{\sqrt{1+3\sin^2\theta}} - 1, 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (\text{A.32})$$

La fonction (A.32) est déjà normalisée,  $\sigma_{rmax}=1$ . Donc, la force appliquée  $P$  qui correspond à cette distribution sera calculée comme suit:

$$P_x = Dt\left(\frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{arctanh}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - 1\right), P_y = 0 \quad (\text{A.33})$$

Le trou est de forme circulaire; la fonction paramétrique qui décrit son contour est par conséquent relativement simple:

$$x = R \cos(\theta); y = R \sin(\theta); 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (\text{A.34})$$

En projetant la pression diamétrale sur les axes du repère  $(x, y)$ , on obtient l'expression des composantes  $X_n$  et  $Y_n$ :

$$\left. \begin{aligned} X_n &= \left( \frac{2}{\sqrt{1+3\sin^2\theta}} - 1 \right) \cos\theta; 0 \leq \theta \leq 2\pi \\ Y_n &= \left( \frac{2}{\sqrt{1+3\sin^2\theta}} - 1 \right) \sin\theta; 0 \leq \theta \leq 2\pi \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.35})$$

En développant  $X_n$  et  $Y_n$  en séries de Fourier:

$$X_n = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} x_m e^{im\theta}; Y_n = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} y_m e^{im\theta}; 0 \leq \theta \leq 2\pi; m \in Z \quad (\text{A.36})$$

Donc:

$$x_m = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sigma_r \cos \theta e^{-im\theta}; y_m = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sigma_r \sin \theta e^{-im\theta} \quad (\text{A.37})$$

Alors:

$$\left. \begin{aligned} \int Y_n ds &= -\sum_{m=1}^{+\infty} (\alpha_m e^{im\theta} + \bar{\alpha}_m e^{-im\theta}) + c_1 \\ \int -X_n ds &= \sum_{m=1}^{+\infty} (\beta_m e^{im\theta} + \bar{\beta}_m e^{-im\theta}) + c_2 \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.38})$$

avec:

$$\alpha_m = -i \frac{Ry_m}{m}; \bar{\alpha}_m = -i \frac{Ry_{-m}}{-m}; \beta_m = \frac{Rx_m}{m}; \bar{\beta}_m = \frac{Rx_{-m}}{-m}; m \in \mathbb{Z}^* \quad (\text{A.39})$$

Les  $\alpha_m, \bar{\alpha}_m, \beta_m, \bar{\beta}_m$  obtenus peuvent ensuite être introduits dans la formule (A.28) pour l'identification des fonctions  $\phi_1(z_1)$  et  $\phi_2(z_2)$ , et enfin la détermination de la rigidité d'"embedding".

### A.2.3 Remarque

La force appliquée  $P$  et la déformation due à l'effet d'"embedding" sont proportionnelles au rayon  $R$ . En conséquence, la rigidité d'"embedding", elle, est bien indépendante du rayon  $R$  du trou.

## A.3 Conclusions

Le modèle proposé est plutôt complexe. Mais son utilisation est intéressante dans le cadre, par exemple, d'études de sensibilité de la rigidité d'"embedding" à toute une série de paramètres. De plus, après validation par rapport aux résultats expérimentaux, l'existence de ce modèle sera primordiale dans la phase de développement de modèles plus simples à destination des praticiens.



# Annexe B Rigidité d'un assemblage à une broche

## B.1 Introduction

Ce type d'assemblage (Figure B.1-1) existe rarement dans la réalité. Mais il est destiné à étudier, par la suite, le comportement "broche-bois" des assemblages à plusieurs broches:

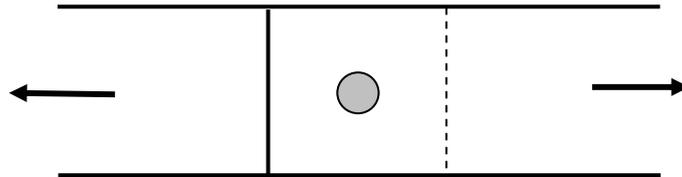


Figure B.1-1 Un Assemblage à une seule broche.

## B.2 Modèle

Le modèle analytique pour la prédiction du comportement élastique d'un assemblage à une seule broche avec deux plans de cisaillement est présenté à la Figure B.2-1.

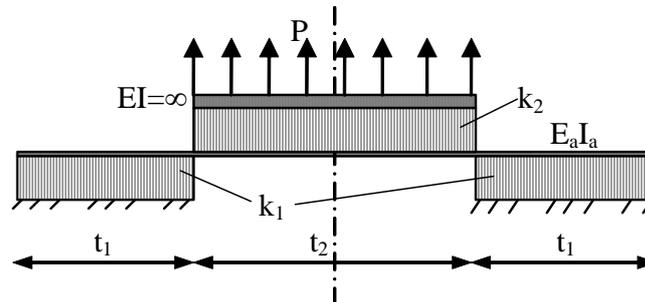


Figure B.2-1 Modèle mathématique d'un assemblage simplement cisailé.

Appelons, pour la membrure extérieure,  $t_1$  l'épaisseur et  $k_1$  la rigidité élastique de la composante d'"embedding" activée; pour la membrure intérieure,  $t_2$  l'épaisseur et  $k_2$  la rigidité de la composante d'"embedding" activée. Dans le modèle, le comportement d'"embedding" du bois est représenté par un milieu compressible caractérisé par la rigidité élastique d'"embedding". La broche est modélisée par des éléments "poutres" caractérisés par la rigidité en flexion  $E_a I_a$  de la section droite.

La partie du bois qui n'est pas influencée par la déformation d'"embedding" est supposée indéformable: cette zone indéformable est fixée à la fondation (pour les membrures extérieures) ou attachée à une barre infiniment raide sur laquelle s'applique la force de traction  $P$  (pour la membrure intérieure).

### B.3 Solution

Il s'agit d'un problème hyperstatique et symétrique; deux coupures sont donc réalisées pour l'analyse des efforts (Figure B.3-1):

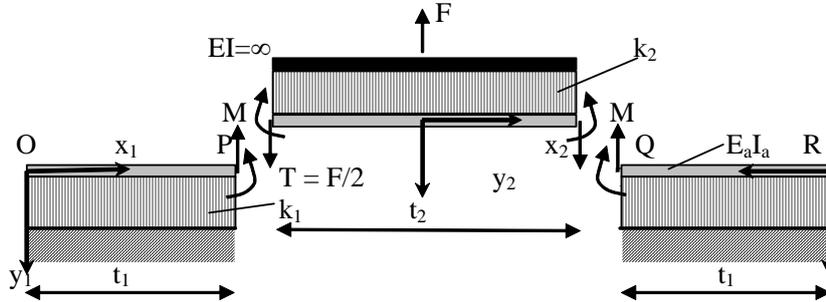


Figure B.3-1 Analyse des efforts agissant dans la structure.

Comme démontré au §8.5.4.2, l'effet de déformation de la broche en cisaillement est négligeable. La relation entre la déformation  $v$  de la broche et le moment  $M$  appliqué peut être exprimée par l'équation différentielle suivante:

$$\frac{d^2v}{dx} = -\frac{M}{EI} \quad (B.1)$$

La déformation  $v$  de la broche doit également satisfaire l'équation différentielle qui traduit le comportement du milieu compressible caractérisé par la rigidité élastique d'"embedding"  $k$ :

$$\frac{dT}{dx} = \frac{d^2M}{dx^2} = vk \quad (B.2)$$

De (B.1) et (B.2), on déduit donc:

$$\frac{d^4M}{dx^4} = -k \frac{M}{E_a I_a} \quad (B.3)$$

où  $T$  est l'effort tranchant. Si l'on pose:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4E_a I_a}} \quad (B.4)$$

la racine de l'équation (B.3) s'exprime alors sous la forme générale:

$$M(x) = A \cos \beta x \cosh \beta x + B \sin \beta x \sinh \beta x + C \cos \beta x \sinh \beta x + D \sin \beta x \cosh \beta x \quad (B.5)$$

L'application de l'équation (B.5) pour chaque membrure de l'assemblage nous donne:

- Pour la membrure extérieure ( $M_1, T_1, v_1, \theta_1$ ):

$$M_1 = A_1 \cos(x\beta_1) \cosh(x\beta_1) + B_1 \cosh(x\beta_1) \sin(x\beta_1) + C_1 \cos(x\beta_1) \sinh(x\beta_1) + D_1 \sin(x\beta_1) \sinh(x\beta_1) \quad (\text{B.6})$$

$$T_1 = \beta_1 \{ \cosh(x\beta_1) [(C_1 + B_1) \cos(x\beta_1) + (-A_1 + D_1) \sin(x\beta_1)] + \sinh(x\beta_1) [(A_1 + D_1) \cos(x\beta_1) + (-C_1 + B_1) \sin(x\beta_1)] \} \quad (\text{B.7})$$

$$v_1 = \frac{2\beta_1^2}{k_1} \{ \cosh(x\beta_1) [D_1 \cos(x\beta_1) - C_1 \sin(x\beta_1)] + \sinh(x\beta_1) [B_1 \cos(x\beta_1) - A_1 \sin(x\beta_1)] \} \quad (\text{B.8})$$

$$\theta_1 = -\frac{2\beta_1^3}{k_1} \{ \cosh(x\beta_1) [(C_1 - B_1) \cos(x\beta_1) + (A_1 + D_1) \sin(x\beta_1)] + \sinh(x\beta_1) [(A_1 - D_1) \cos(x\beta_1) + (C_1 + B_1) \sin(x\beta_1)] \} \quad (\text{B.9})$$

- Pour la membrure intérieure ( $M_2, T_2, v_2, \theta_2$ ), ( $B_2$  et  $C_2$  s'annulent en raison de la symétrie du problème):

$$M_2 = A_2 \cos(x\beta_2) \cosh(x\beta_2) + D_2 \sin(x\beta_2) \sinh(x\beta_2) \quad (\text{B.10})$$

$$T_2 = \beta_2 \{ (A_2 + D_2) \cos(x\beta_2) \sinh(x\beta_2) + (-A_2 + D_2) \sin(x\beta_2) \cosh(x\beta_2) \} \quad (\text{B.11})$$

$$v_2 = \frac{2\beta_2^2}{k_2} [D_2 \cos(x\beta_2) \cosh(x\beta_2) - A_2 \sin(x\beta_2) \sinh(x\beta_2)] \quad (\text{B.12})$$

$$\theta_2 = -\frac{2\beta_2^3}{k_2} [(A_2 + D_2) \cosh(x\beta_2) \sin(x\beta_2) + (A_2 - D_2) \cos(x\beta_2) \sinh(x\beta_2)] \quad (\text{B.13})$$

Les inconnues  $A_i, B_i, C_i, D_i$  ( $i = 1, 2$ ) sont déterminées en exprimant les conditions de bord comme suit:

- **Pour la membrure extérieure:**

Vu que le moment et l'effort tranchant s'annulent à l'extrémité libre O de la poutre, nous obtenons donc les équations (B.14) et (B.15).

$$M_1(0) = 0 \Leftrightarrow A_1 = 0 \quad (\text{B.14})$$

$$T_1(0) = 0 \Leftrightarrow B_1 = -C_1 \quad (\text{B.15})$$

Vu que le moment et l'effort tranchant dans la section P doivent être égaux aux valeurs données à la Figure B.3-1, nous obtenons donc les équations (B.16) et (B.17).

$$M_1(t_1) = M \Leftrightarrow D_1 \sin(t_1\beta_1) \sinh(t_1\beta_1) + C_1 [-\cosh(t_1\beta_1) \sin(t_1\beta_1) + \cos(t_1\beta_1) \sinh(t_1\beta_1)] - M = 0 \quad (\text{B.16})$$

$$T_1(t_1) = -\frac{F}{2} \Leftrightarrow D_1\beta_1[\cosh(t_1\beta_1)\sin(t_1\beta_1) + \cos(t_1\beta_1)\sinh(t_1\beta_1)] - 2C_1\beta_1\sin(t_1\beta_1)\sinh(t_1\beta_1) + \frac{F}{2} = 0 \quad (\text{B.17})$$

- **Pour la membrure intérieure** (de la même manière que nous constatons pour la membrure extérieure):

$$M_2(-\frac{t_2}{2}) = M \Leftrightarrow A_2\cos(\frac{t_2\beta_2}{2})\cosh(\frac{t_2\beta_2}{2}) + D_2\sin(\frac{t_2\beta_2}{2})\sinh(\frac{t_2\beta_2}{2}) - M = 0 \quad (\text{B.18})$$

$$T_2(-\frac{t_2}{2}) = -\frac{F}{2} \Leftrightarrow A_2\beta_2[\cosh(\frac{t_2\beta_2}{2})\sin(\frac{t_2\beta_2}{2}) - \cos(\frac{t_2\beta_2}{2})\sinh(\frac{t_2\beta_2}{2})] - D_2\beta_2[\cosh(\frac{t_2\beta_2}{2})\cos(\frac{t_2\beta_2}{2}) + \sin(\frac{t_2\beta_2}{2})\sinh(\frac{t_2\beta_2}{2})] + \frac{F}{2} = 0 \quad (\text{B.19})$$

- **Pour la continuité de la poutre à la section P:**

$$\begin{aligned} \theta_1(t_1) = \theta_2(-\frac{t_2}{2}) \Leftrightarrow & -\frac{2\beta_2^3}{k_2}A_2[\cosh(\frac{t_2\beta_2}{2})\sin(\frac{t_2\beta_2}{2}) + \cos(\frac{t_2\beta_2}{2})\sinh(\frac{t_2\beta_2}{2})] \\ & + \frac{2\beta_2^3}{k_2}D_2[\cos(\frac{t_2\beta_2}{2})\sinh(\frac{t_2\beta_2}{2}) - \cosh(\frac{t_2\beta_2}{2})\sin(\frac{t_2\beta_2}{2})] \\ & - \frac{2\beta_1^3}{k_1}D_1[\cosh(t_1\beta_1)\sin(t_1\beta_1) - \cos(t_1\beta_1)\sinh(t_1\beta_1)] - \frac{4\beta_1^3}{k_1}C_1\cos(t_1\beta_1)\cosh(t_1\beta_1) = 0 \end{aligned} \quad (\text{B.20})$$

Il ne reste qu'à résoudre le système de 7 équations (B.14), (B.15), (B.16), (B.17), (B.18), (B.19) et (B.20) pour retrouver les 7 inconnues  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$ ,  $D_1$ ,  $A_2$ ,  $D_2$  et  $M$ . Etant donné que la rigidité de cet assemblage simplement cisailé est définie comme le rapport entre la force appliquée et sa déformation, soit:

$$K_{1c} = \frac{F}{v} \quad (\text{B.21})$$

avec:

$$v = v_2(-\frac{t_2}{2}) - v_1(t_1) \quad (\text{B.22})$$

alors:

$$\begin{aligned} K_{1c} = & 4k_1k_2\{[\sin(2t_1\beta_1) + \sinh(2t_1\beta_1)][\sin(t_2\beta_2) + \sinh(t_2\beta_2)]k_2\beta_1^3 \\ & - [-2 + \cos(2t_1\beta_1) + \cosh(2t_1\beta_1)][\cos(t_2\beta_2) - \cosh(t_2\beta_2)]k_1\beta_2^3\} / \\ & \{2[+2 + \cos(2t_1\beta_1) + \cosh(2t_1\beta_1)][\sin(t_2\beta_2) + \sinh(t_2\beta_2)]k_2^2\beta_1^4 + \\ & 2[-2 + \cos(2t_1\beta_1) + \cosh(2t_1\beta_1)][\sin(t_2\beta_2) + \sinh(t_2\beta_2)]k_1^2\beta_2^4 + \\ & 4k_1k_2\beta_1\beta_2[(\cos(t_2\beta_2) + \cosh(t_2\beta_2))(\sin(2t_1\beta_1) + \sinh(2t_1\beta_1))\beta_1^2 + \\ & (\cos(2t_1\beta_1) - \cosh(2t_1\beta_1))(\sin(t_2\beta_2) - \sinh(t_2\beta_2))\beta_1\beta_2 + \\ & (\cos(t_2\beta_2) - \cosh(t_2\beta_2))(\sin(2t_1\beta_1) - \sinh(2t_1\beta_1))\beta_2^2\} \end{aligned} \quad (\text{B.23})$$

Pour un assemblage dont les membrures, souvent de même classe de bois, sont assemblées parallèlement aux fibres, nous avons  $k_1 = k_2$  et, par conséquent,  $\beta_1 = \beta_2$ . Les éléments structuraux connectés à l'assemblage ont souvent la même section, soit  $t_1 = 0.5t_2$ . Dans ce cas, la rigidité élastique de l'assemblage est calculée par la formule (B.24) qui est plus simple que celle donnée précédemment.

$$K_{1c} = \frac{(2 \cos(2t_1\beta_1) - \cos(4t_1\beta_1) - 2 \cosh(2t_1\beta_1) + \cosh(4t_1\beta_1) + 2 \sin(2t_1\beta_1) \sinh(2t_1\beta_1))k_1}{2(\sin(4t_1\beta_1) + \sinh(4t_1\beta_1))\beta_1} \quad (\text{B.24})$$

## B.4 Conclusions

La rigidité élastique d'un binôme "broche-bois" avec une seule broche est une fonction des paramètres:  $k_1, k_2, E_a I_a, t_1, t_2$ . Elle peut être représentée de façon symbolique comme suit:

$$K_{1c} = F(k_1, k_2, E_a I_a, t_1, t_2) \quad (\text{B.25})$$



# Annexe C Essais expérimentaux

## C.1 Essais de portance locale

Les éprouvettes de forme parallélépipède à faces carrées (Figure C.1-1a) sont fabriquées en fonction des paramètres suivants:

- angle de compression des fibres  $\alpha$  ( $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $90^\circ$ );
- diamètre de la broche  $d$  (10 mm, 16 mm, 20 mm);
- épaisseur de l'éprouvette  $t$  ( $1,5d$ ,  $4d$ ).

En outre, en suivant strictement les recommandations du [EN383], des éprouvettes de forme parallélépipédique à faces rectangulaires, positionnées verticalement (Figure C.1-1b) sous compression axiale et positionnées horizontalement (Figure C.1-1c) sous compression transversale, complètent la série d'essais de portance locale.

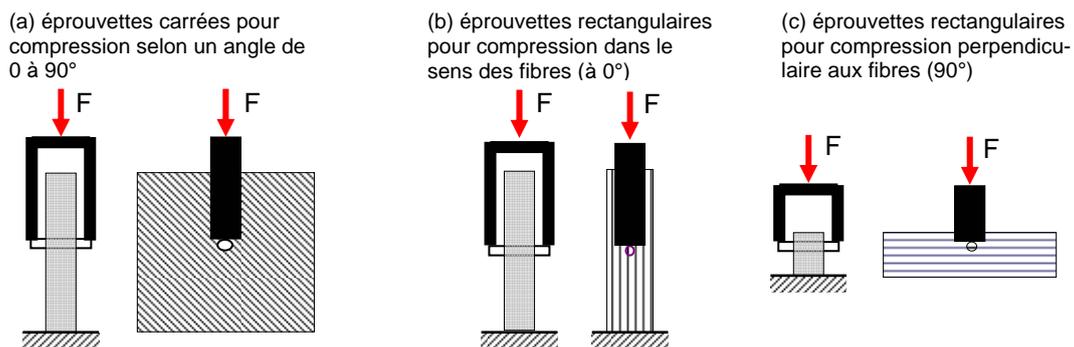


Figure C.1-1 Eprouvettes des essais de portance locale.

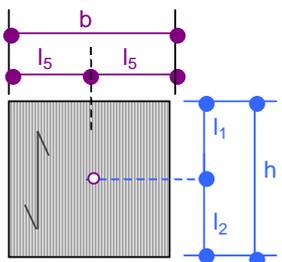
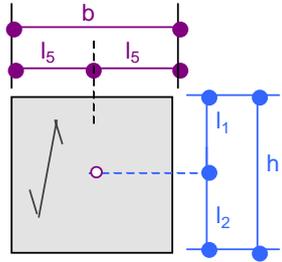
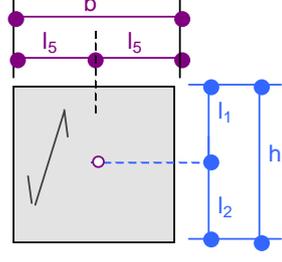
La configuration géométrique et le mode de chargement des éprouvettes sont prévus au aux Tableau C.1-1 et Tableau C.1-2:

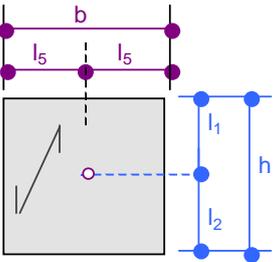
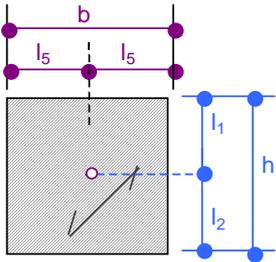
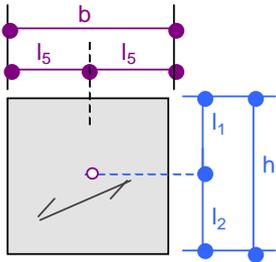
Eprouvette carrée		Eprouvette verticale		Eprouvette horizontale	
b	$2 \cdot l_5$	b	$2 \cdot a_1$	b	$2 \cdot l_5$
h	$l_1 + l_2$	h	$l_1 + l_2$	h	$a_2 + a_3$
$l_5$	$7 \cdot d$	$a_1$	$3 \cdot d$	$a_2$	$2 \cdot d$
$l_1$	$7 \cdot d$	$l_1$	$7 \cdot d$	$a_3$	$4 \cdot d$
$l_2$	$7 \cdot d$	$l_2$	$7 \cdot d$	$l_5$	$7 \cdot d$

Tableau C.1-1 Position de la broche dans les éprouvettes.

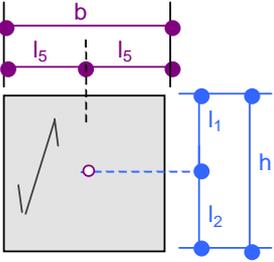
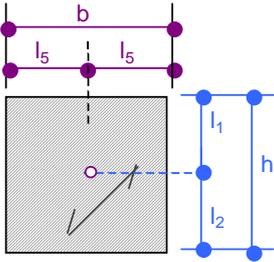
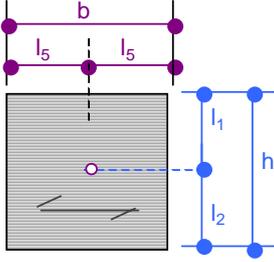
Dans les graphiques suivants, deux types de courbes caractéristiques du comportement "broche-bois" des éprouvettes de portance locale sont reportées:

- les courbes "emb-CTIB" présentent le comportement "broche-bois" obtenu via les essais réalisés au CTIB;
- la courbe "emb-ULG" présente le comportement "broche-bois" obtenu via l'essai réalisé à l'ULG.

SCHEMA		d	angle	désignation	Charge estimée			dimension
					0,4 Fmax	0,6 Fmax	Fmax	
		mm	°	échantillon	N	N	N	échantillon
 <p>Série C1-1</p>	1	10	0	C1-0°-d10(4d)-1	4490	6730	11217	140x140x40
	2	10	0	C1-0°-d10(4d)-2				140x140x40
	3	10	0	C1-0°-d10(4d)-3				140x140x40
	4	10	0	C1-0°-d10(4d)-4				140x140x40
	5	10	0	C1-0°-d10(4d)-5				140x140x40
	6	16	0	C1-0°-d16(4d)-1	10721	16082	26803	224x224x64
	7	16	0	C1-0°-d16(4d)-2				224x224x64
	8	16	0	C1-0°-d16(4d)-3				224x224x64
	9	16	0	C1-0°-d16(4d)-4				224x224x64
	10	16	0	C1-0°-d16(4d)-5				224x224x64
	11	20	0	C1-0°-d20(4d)-1	15954	23931	39885	280x280x80
	12	20	0	C1-0°-d20(4d)-2				280x280x80
	13	20	0	C1-0°-d20(4d)-3				280x280x80
	14	20	0	C1-0°-d20(4d)-4				280x280x80
	15	20	0	C1-0°-d20(4d)-5				280x280x80
 <p>Série C1-2</p>	16	10	10	C1-10°-d10(4d)-1	4420	6630	11051	140x140x40
	17	10	10	C1-10°-d10(4d)-2				140x140x40
	18	10	10	C1-10°-d10(4d)-3				140x140x40
	19	16	10	C1-10°-d16(4d)-1	10534	15800	26334	224x224x64
	20	16	10	C1-10°-d16(4d)-2				224x224x64
	21	16	10	C1-10°-d16(4d)-3				224x224x64
	22	20	10	C1-10°-d20(4d)-1	15647	23471	39118	280x280x80
	23	20	10	C1-10°-d20(4d)-2				280x280x80
	24	20	10	C1-10°-d20(4d)-3				280x280x80
 <p>Série C1-3</p>	25	10	20	C1-20°-d10(4d)-1	4240	6360	10598	140x140x40
	26	10	20	C1-20°-d10(4d)-2				140x140x40
	27	10	20	C1-20°-d10(4d)-3				140x140x40
	28	10	20	C1-20°-d10(4d)-4				140x140x40
	29	10	20	C1-20°-d10(4d)-5				140x140x40
	30	16	20	C1-20°-d16(4d)-1	10029	15043	25072	224x224x64
	31	16	20	C1-20°-d16(4d)-2				224x224x64
	32	16	20	C1-20°-d16(4d)-3				224x224x64
	33	20	20	C1-20°-d20(4d)-1	14827	22240	37066	280x280x80
	34	20	20	C1-20°-d20(4d)-2				280x280x80
	35	20	20	C1-20°-d20(4d)-3				280x280x80

SCHEMA		d	angle	désignation	Charge estimée			dimension		
					com-press	échantillon	0,4		0,6	
							Fmax		Fmax	Fmax
		mm	°		N	N	N	échantillon		
	36	10	30	C1-30°-d10(4d)-1	3390	5980	9971	140x140x40		
	37	10	30	C1-30°-d10(4d)-2				140x140x40		
	38	10	30	C1-30°-d10(4d)-3				140x140x40		
	39	10	30	C1-30°-d10(4d)-4				140x140x40		
	40	10	30	C1-30°-d10(4d)-5				140x140x40		
	41	16	30	C1-30°-d16(4d)-1	9343	14014	23357	224x224x64		
	42	16	30	C1-30°-d16(4d)-2				224x224x64		
	43	16	30	C1-30°-d16(4d)-3				224x224x64		
	44	16	30	C1-30°-d16(4d)-4				224x224x64		
	45	16	30	C1-30°-d16(4d)-5				224x224x64		
	Série C1-4	46	20	30	C1-30°-d20(4d)-1	13724	20586	34310	280x280x80	
		47	20	30	C1-30°-d20(4d)-2				280x280x80	
		48	20	30	C1-30°-d20(4d)-3				280x280x80	
		49	20	30	C1-30°-d20(4d)-4				280x280x80	
			50	10	45	C1-45°-d10(4d)-1	3590	5380	8974	140x140x40
51	10		45	C1-45°-d10(4d)-2	140x140x40					
52	10		45	C1-45°-d10(4d)-3	140x140x40					
53	10		45	C1-45°-d10(4d)-4	140x140x40					
54	10		45	C1-45°-d10(4d)-5	140x140x40					
55	16		45	C1-45°-d16(4d)-1	8279	12418	20697	224x224x64		
56	16		45	C1-45°-d16(4d)-2				224x224x64		
57	16		45	C1-45°-d16(4d)-3				224x224x64		
58	16		45	C1-45°-d16(4d)-4				224x224x64		
59	16		45	C1-45°-d16(4d)-5				224x224x64		
Série C1-5	60		20	45	C1-45°-d20(4d)-1	12041	18061	30102	280x280x80	
	61		20	45	C1-45°-d20(4d)-2				280x280x80	
	62		20	45	C1-45°-d20(4d)-3				280x280x80	
	63		20	45	C1-45°-d20(4d)-4				280x280x80	
	64		20	45	C1-45°-d20(4d)-5	280x280x80				
	65	10	60	C1-60°-d10(4d)-1	3260	4900	8158	140x140x40		
	66	10	60	C1-60°-d10(4d)-2				140x140x40		
	67	10	60	C1-60°-d10(4d)-3				140x140x40		
	68	10	60	C1-60°-d10(4d)-4				140x140x40		
	69	16	60	C1-60°-d16(4d)-1	7432	11148	18581	224x224x64		
	70	16	60	C1-60°-d16(4d)-2				224x224x64		
	71	16	60	C1-60°-d16(4d)-3				224x224x64		
	72	16	60	C1-60°-d16(4d)-4				224x224x64		
	Série C1-6	73	20	60	C1-60°-d20(4d)-1	10725	16088	26813	280x280x80	
		74	20	60	C1-60°-d20(4d)-2				280x280x80	
75		20	60	C1-60°-d20(4d)-3	280x280x80					
76		20	60	C1-60°-d20(4d)-4	280x280x80					

SCHEMA		d	angle	désignation	Charge estimée			dimension
					échantillon	0,4 Fmax	0,6 Fmax	
		mm	°		N	N	N	
<p>Série C1-14</p>	77	20	70	C1-70-d20(4d)-1				280x280x80
	78	20	70	C1-70-d20(4d)-2				280x280x80
	79	20	70	C1-70-d20(4d)-3				280x280x80
	80	20	70	C1-70-d20(4d)-4				280x280x80
	81	20	70	C1-70-d20(4d)-5				280x280x80
<p>Série C1-15</p>	82	16	80	C1-80-d16(4d)-1				224x224x64
	83	16	80	C1-80-d16(4d)-2				224x224x64
	84	16	80	C1-80-d16(4d)-3				224x224x64
	85	16	80	C1-80-d16(4d)-4				224x224x64
	86	16	80	C1-80-d16(4d)-5				224x224x64
	87	20	80	C1-80-d20 (4d)-1				280x280x80
	88	20	80	C1-80-d20 (4d)-2				280x280x80
	89	20	80	C1-80-d20 (4d)-3				280x280x80
	90	20	80	C1-80-d20 (4d)-4				280x280x80
	91	20	80	C1-80-d20 (4d)-5				280x280x80
<p>Série C1-7</p>	92	10	90	C1-90°-d10(4d)-1	2990	4490	7478	140x140x40
	93	10	90	C1-90°-d10(4d)-2				140x140x40
	94	10	90	C1-90°-d10(4d)-3				140x140x40
	95	10	90	C1-90°-d10(4d)-4				140x140x40
	96	10	90	C1-90°-d10(4d)-5				140x140x40
	97	16	90	C1-90°-d16(4d)-1	6743	10114	16857	224x224x64
	98	16	90	C1-90°-d16(4d)-2				224x224x64
	99	16	90	C1-90°-d16(4d)-3				224x224x64
	100	20	90	C1-90°-d20(4d)-1	9669	14504	24173	280x280x80
	101	20	90	C1-90°-d20(4d)-2				280x280x80
	102	20	90	C1-90°-d20(4d)-3				280x280x80
	103	20	90	C1-90°-d20(4d)-4				280x280x80
	104	20	90	C1-90°-d20(4d)-5				280x280x80
	<p>Série C1-8</p>	105	10	0	C1-0°-d10(1,5d)-1	1683	2524	4207
106		10	0	C1-0°-d10(1,5d)-2				140x140x15
107		10	0	C1-0°-d10(1,5d)-3				140x140x15
108		16	0	C1-0°-d16(1,5d)-1	4020	6031	10051	224x224x24
109		16	0	C1-0°-d16(1,5d)-2				224x224x24
110		16	0	C1-0°-d16(1,5d)-3				224x224x24
111		20	0	C1-0°-d20(1,5d)-1	5983	8974	14957	280x280x30
112		20	0	C1-0°-d20(1,5d)-2				280x280x30
113		20	0	C1-0°-d20(1,5d)-3				280x280x30

SCHEMA		d	angle	désignation	Charge estimée			dimension		
					com-press	échantillon	0,4		0,6	
							Fmax		Fmax	Fmax
		mm	°		N	N	N	échantillon		
 <p>Série C1-9</p>	114	10	20	C1-20°-d10(1,5d)-1	1590	2384	3974	140x140x15		
	115	10	20	C1-20°-d10(1,5d)-2				140x140x15		
	116	10	20	C1-20°-d10(1,5d)-3				140x140x15		
	117	16	20	C1-20°-d16(1,5d)-1	3761	5641	9402	224x224x24		
	118	16	20	C1-20°-d16(1,5d)-2				224x224x24		
	119	16	20	C1-20°-d16(1,5d)-3				224x224x24		
	120	20	20	C1-20°-d20(1,5d)-1	5560	8340	13900	280x280x30		
	123	20	20	C1-20°-d20(1,5d)-2				280x280x30		
	122	20	20	C1-20°-d20(1,5d)-3				280x280x30		
	123	16	30	C1-30°-d16(4d)-5				224x224x64		
	 <p>Série C1-10</p>	124	10	45	C1-45°-d10(1,5d)-1	1346	2019	3365	140x140x15	
		125	10	45	C1-45°-d10(1,5d)-2				140x140x15	
126		10	45	C1-45°-d10(1,5d)-3				140x140x15		
127		16	45	C1-45°-d16(1,5d)-1	3105	4657	7761	224x224x24		
128		16	45	C1-45°-d16(1,5d)-2				224x224x24		
129		16	45	C1-45°-d16(1,5d)-3				224x224x24		
130		20	45	C1-45°-d20(1,5d)-1	4515	6773	11288	280x280x30		
131		20	45	C1-45°-d20(1,5d)-2				280x280x30		
132		20	45	C1-45°-d20(1,5d)-3				280x280x30		
 <p>Série C1-11</p>		133	10	90	C1-90°-d10(1,5d)-1	1122	1683	2804	140x140x15	
	134	10	90	C1-90°-d10(1,5d)-2				140x140x15		
	135	10	90	C1-90°-d10(1,5d)-3				140x140x15		
	136	16	90	C1-90°-d16(1,5d)-1	2529	3793	6321	224x224x24		
	137	16	90	C1-90°-d16(1,5d)-2				224x224x24		
	138	16	90	C1-90°-d16(1,5d)-3				224x224x24		
	139	20	90	C1-90°-d20(1,5d)-1	3626	5439	9065	280x280x30		
	140	20	90	C1-90°-d20(1,5d)-2				280x280x30		
	141	20	90	C1-90°-d20(1,5d)-3				280x280x30		

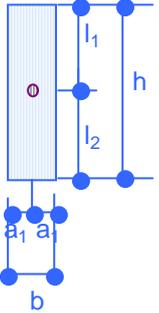
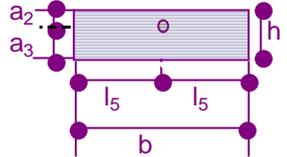
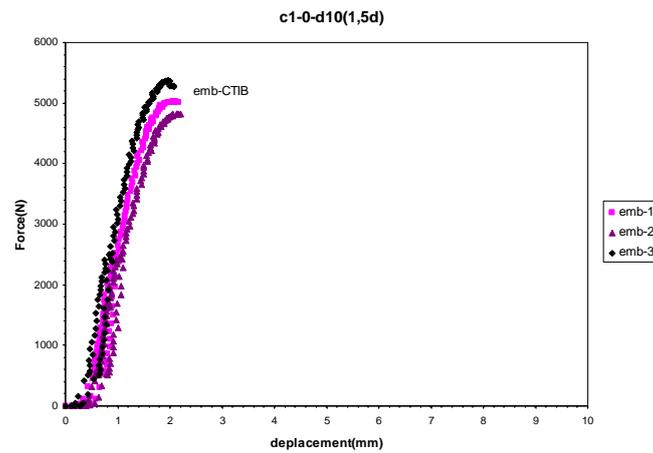
SCHEMA		d	angle	désignation	Charge estimée			dimension	
					échantillon				
					com-press	0,4 Fmax	0,6 Fmax	Fmax	échantillon
	mm	°		N	N	N			
	142	10	0	C1-0°-d10(4d)-b=6d-1	4487	6731	11218	60x140x40	
	143	10	0	C1-0°-d10(4d)-b=6d-2				60x140x40	
	144	10	0	C1-0°-d10(4d)-b=6d-3				60x140x40	
	145	16	0	C1-0°-d16(4d)-b=6d-1	10721	16082	26803	96x224x64	
	146	16	0	C1-0°-d16(4d)-b=6d-2				96x224x64	
	147	16	0	C1-0°-d16(4d)-b=6d-3				96x224x64	
	148	16	0	C1-0°-d16(4d)-b=6d-4				96x224x64	
	149	16	0	C1-0°-d16(4d)-b=6d-5				96x224x64	
	150	20	0	C1-0°-d20(4d)-b=6d-1	15954	23931	39885	120x280x80	
	151	20	0	C1-0°-d20(4d)-b=6d-2				120x280x80	
	152	20	0	C1-0°-d20(4d)-b=6d-3				120x280x80	
	153	20	0	C1-0°-d20(4d)-b=6d-4				120x280x80	
	154	20	0	C1-0°-d20(4d)-b=6d-5				120x280x80	
	Série C1-12								
		155	10	90	C1-90°-d10(4d)-h=6d-1	2991	4487	7478	60x140x40
156		10	90	C1-90°-d10(4d)-h=6d-2				60x140x40	
157		10	90	C1-90°-d10(4d)-h=6d-3				60x140x40	
158		16	90	C1-90°-d16(4d)-h=6d-1	6743	10114	16857	96x224x64	
159		16	90	C1-90°-d16(4d)-h=6d-2				96x224x64	
160		16	90	C1-90°-d16(4d)-h=6d-3				96x224x64	
161		16	90	C1-90°-d16(4d)-h=6d-4				96x224x64	
162		16	90	C1-90°-d16(4d)-h=6d-5				96x224x64	
163		20	90	C1-90°-d20(4d)-h=6d-1	9669	14504	24173	120x280x80	
164		20	90	C1-90°-d20(4d)-h=6d-2				120x280x80	
165		20	90	C1-90°-d20(4d)-h=6d-3				120x280x80	
Série C1-13									

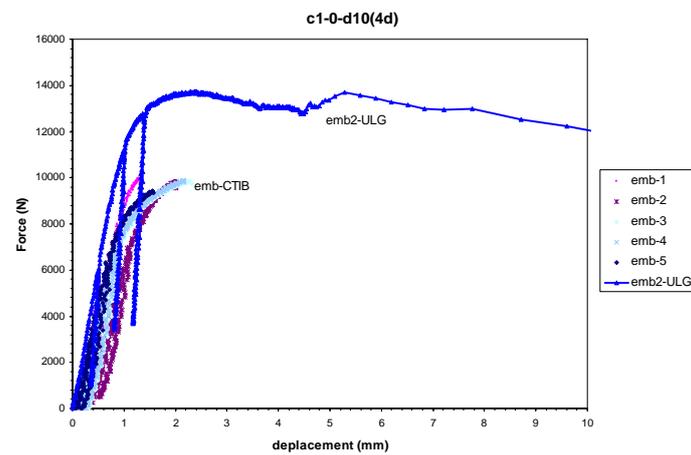
Tableau C.1-2: Informations associées à chacun des 165 échantillons de portance locale testés.

- Série d'essais C1-0-d10(1,5d)



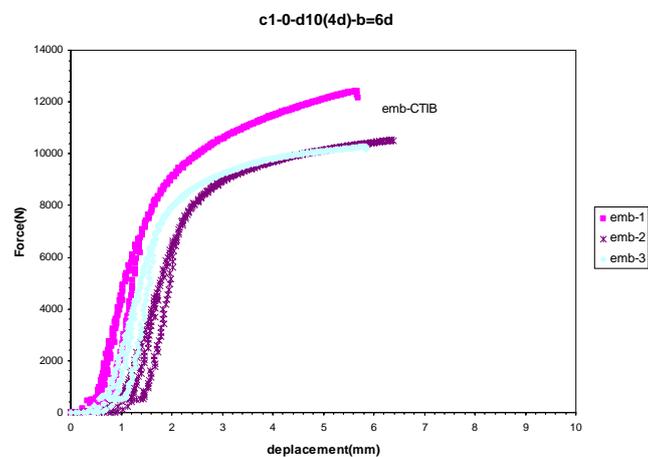
Graphique C.1-1 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-0-d10(4d)



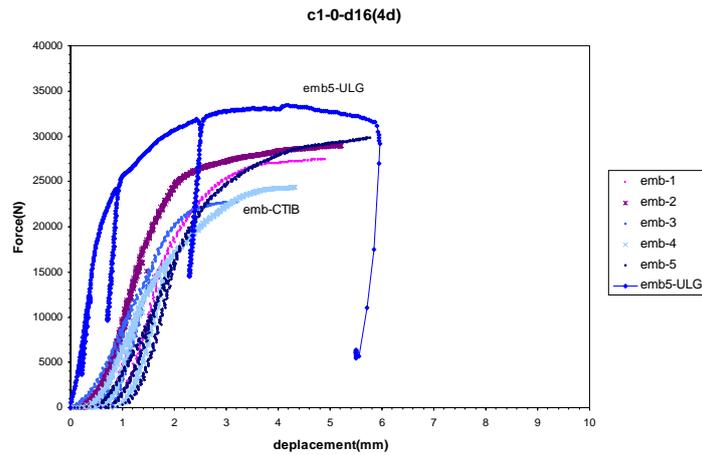
Graphique C.1-2 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-0-d10(4d)-b=6d



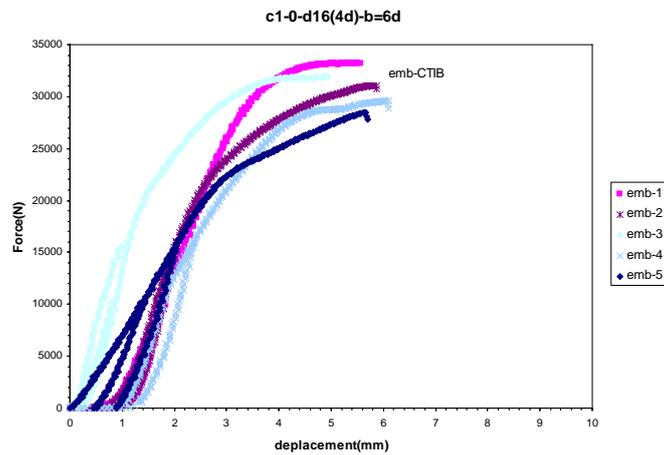
Graphique C.1-3 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-0-d16(4d)



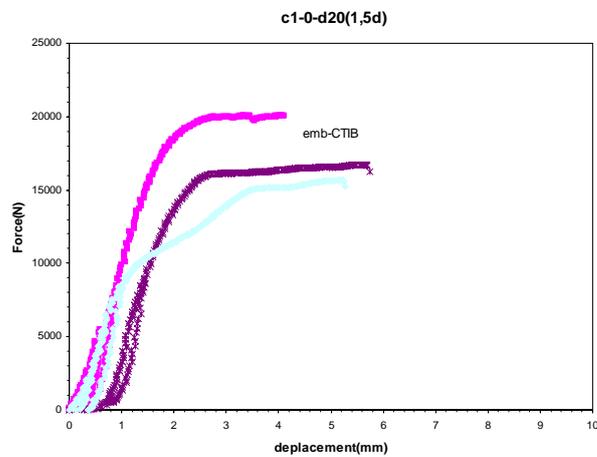
Graphique C.1-4 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-0-d16(4d)-b=6d



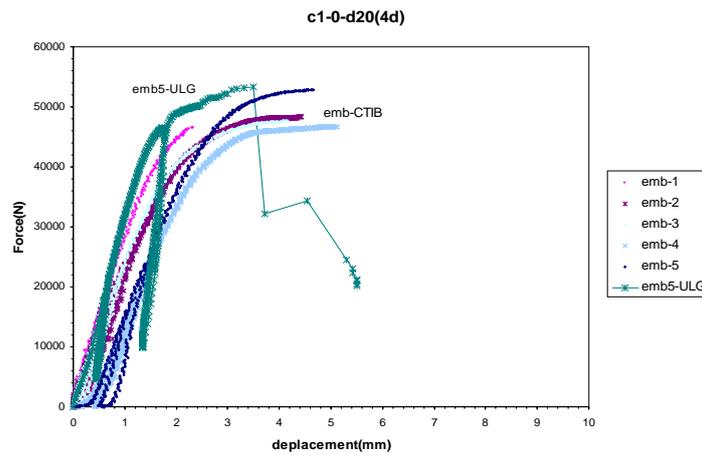
Graphique C.1-5 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-0-d20(1,5d)



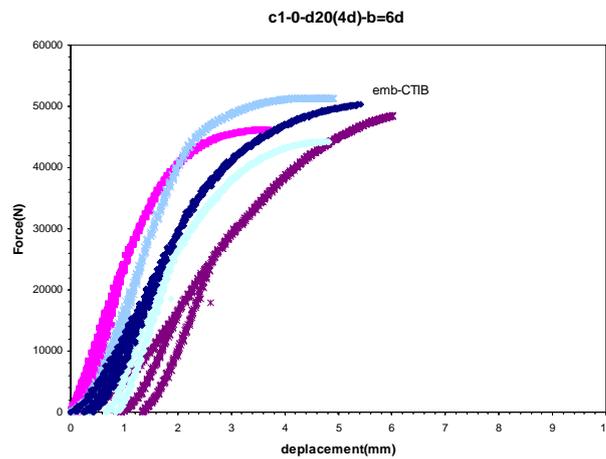
Graphique C.1-6 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-0-d20(4d)



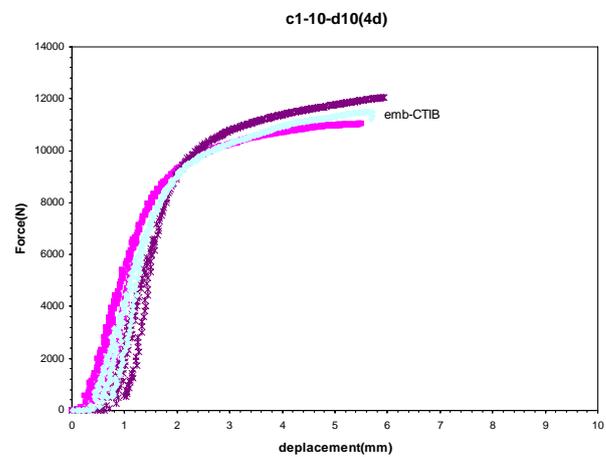
Graphique C.1-7 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-0-20(4d)-b=6d



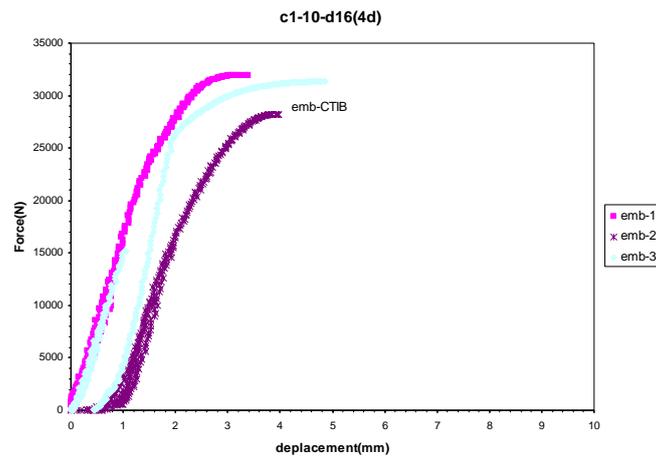
Graphique C.1-8 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais c1-10-d10(4d)



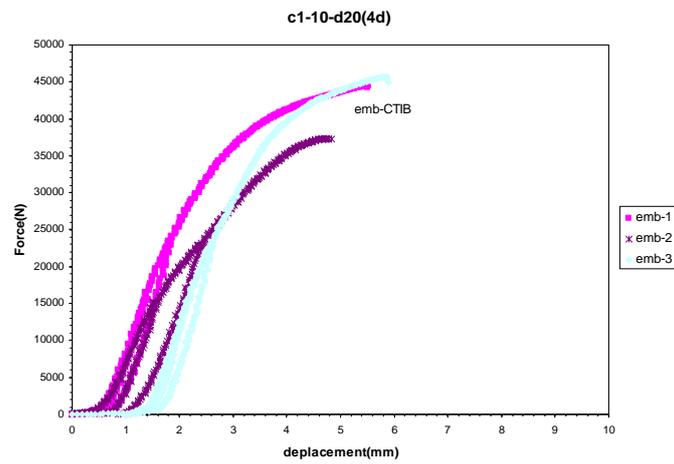
Graphique C.1-9 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-10-d16(4d)



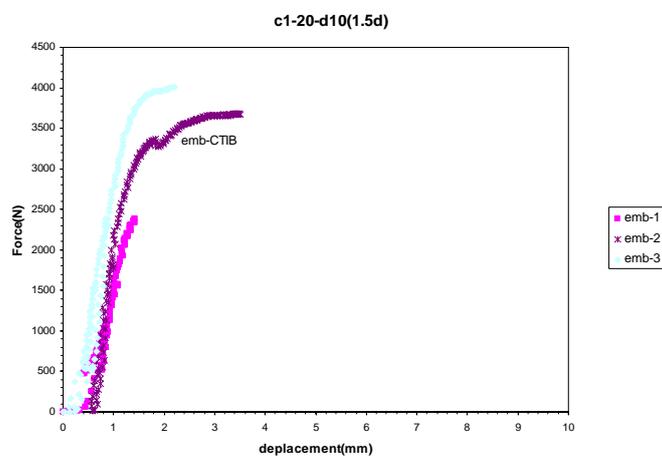
Graphique C.1-10 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-10-20(4d)



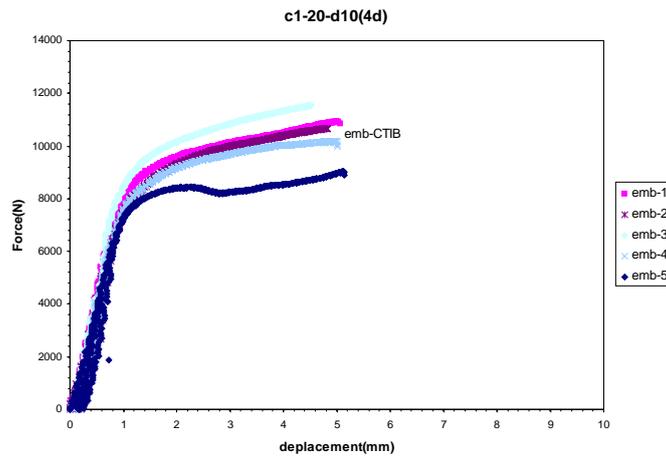
Graphique C.1-11 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-20-d10(1,5d)



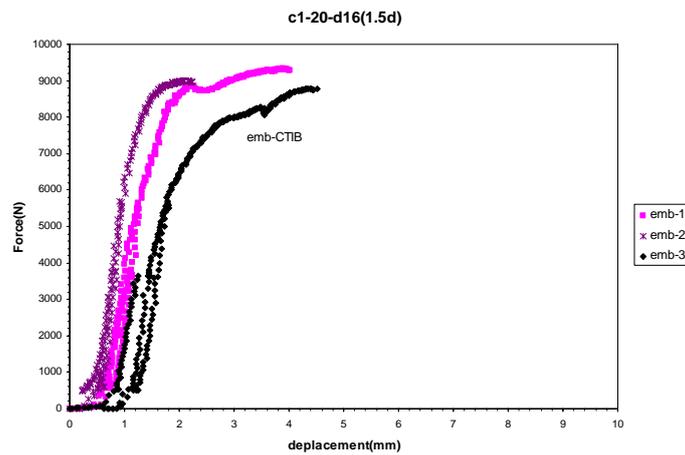
Graphique C.1-12 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-20-d10(4d)



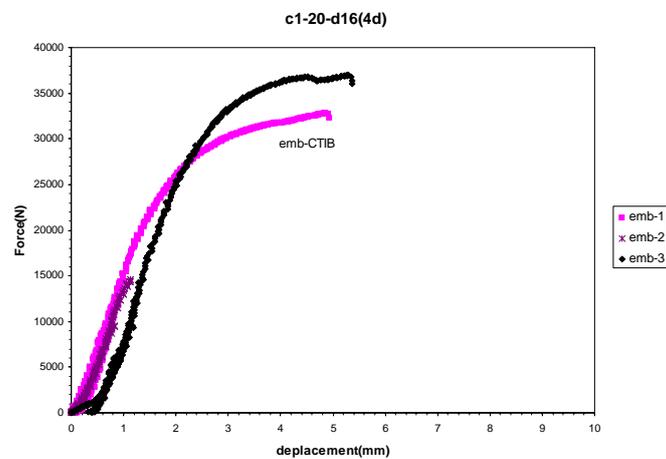
Graphique C.1-13 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-20-d16(1,5d)



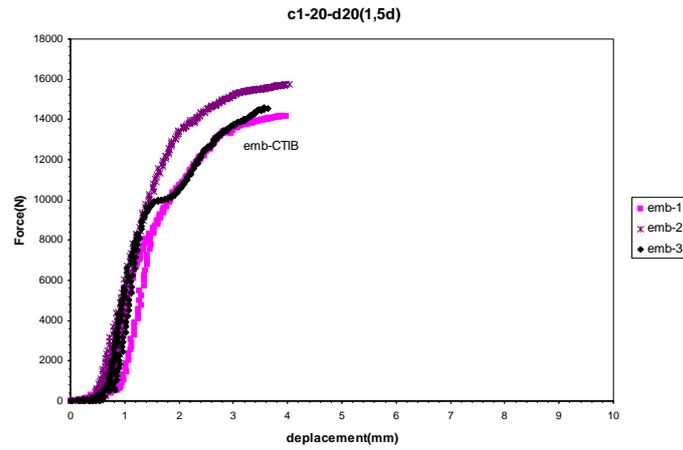
Graphique C.1-14 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-20-d16(4d)



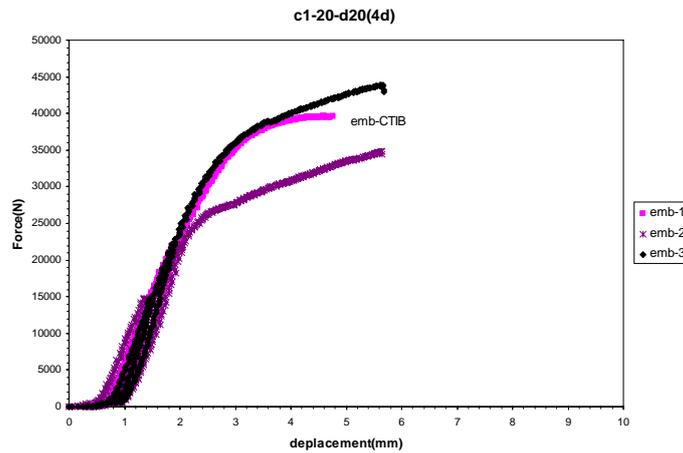
Graphique C.1-15 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais c1-20-d20(1,5d)



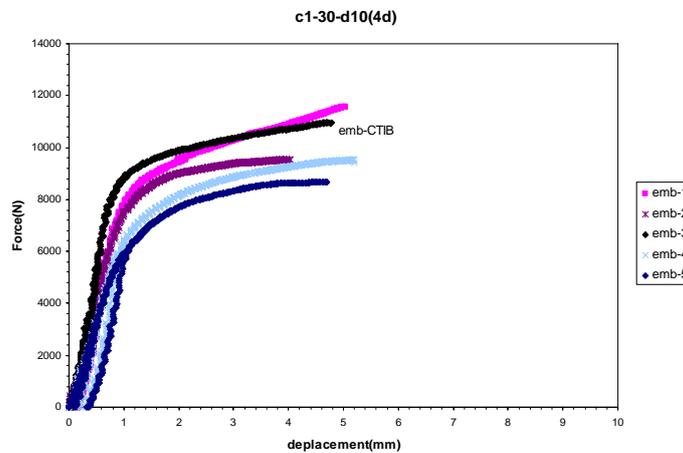
Graphique C.1-16 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-20-d20(4d)



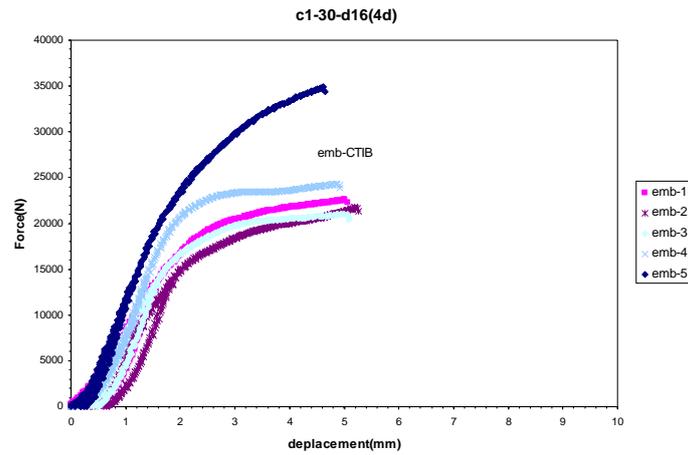
Graphique C.1-17 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-30-d10(4d)



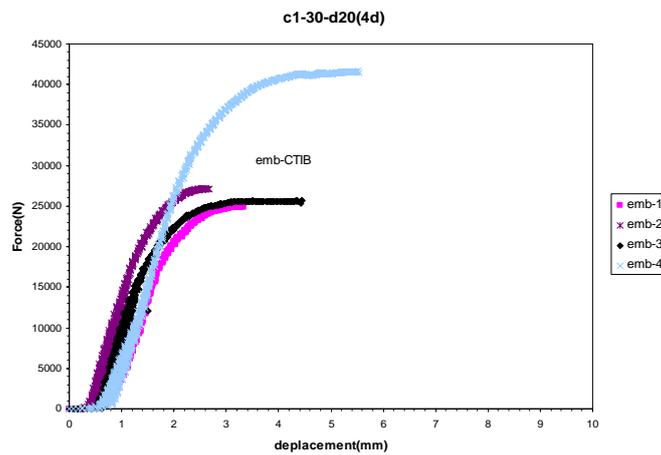
Graphique C.1-18 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-30-d16(4d)



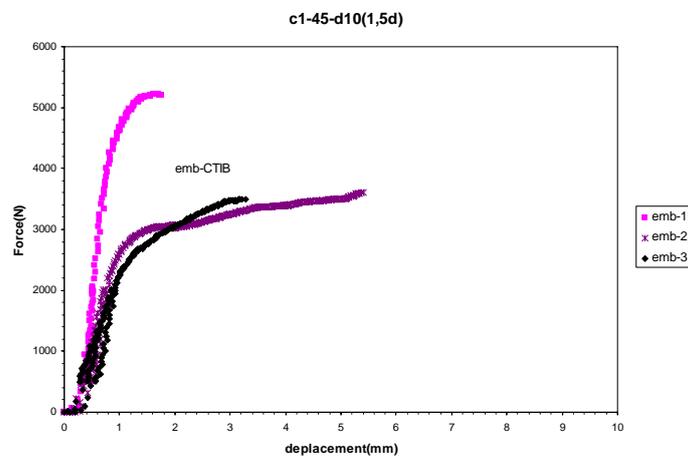
Graphique C.1-19 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-30-d20(4d)



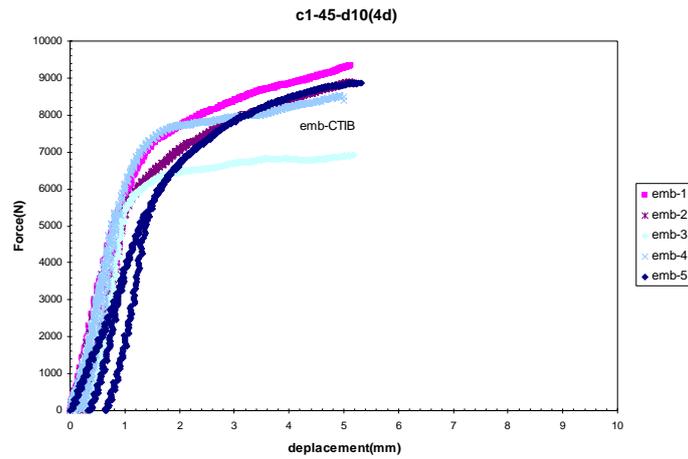
Graphique C.1-20 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-45-d10(1,5d)



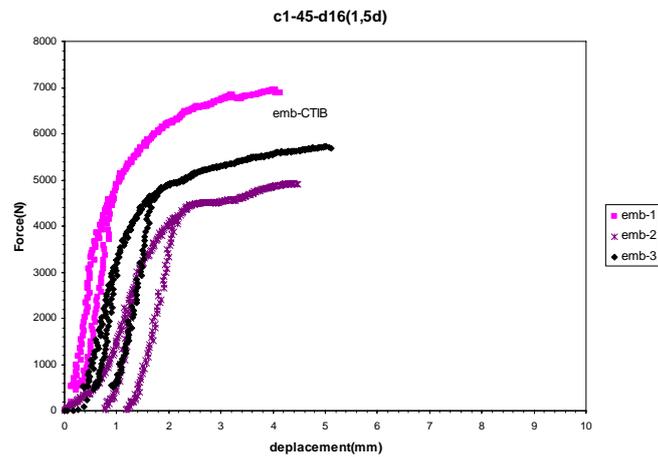
Graphique C.1-21 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-45-d10(4d)



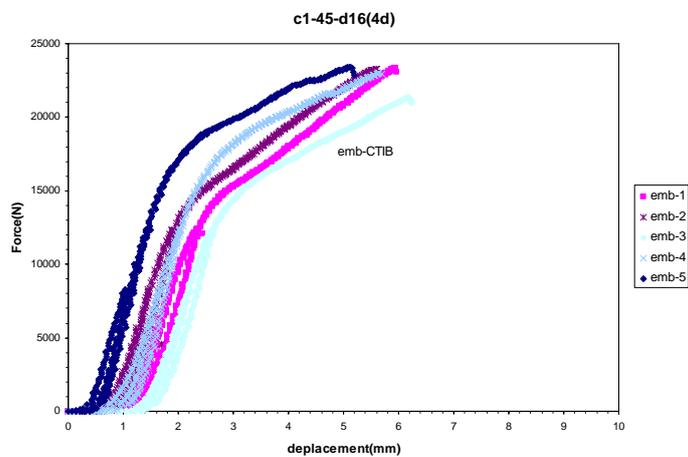
Graphique C.1-22 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-45-d16(1,5d)



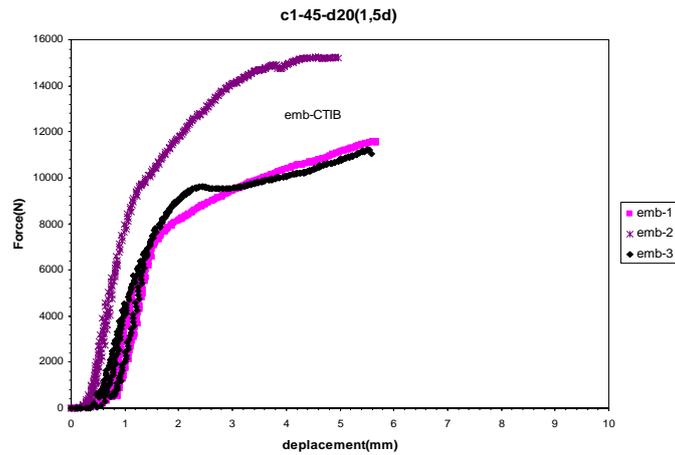
Graphique C.1-23 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-45-d16(4d)



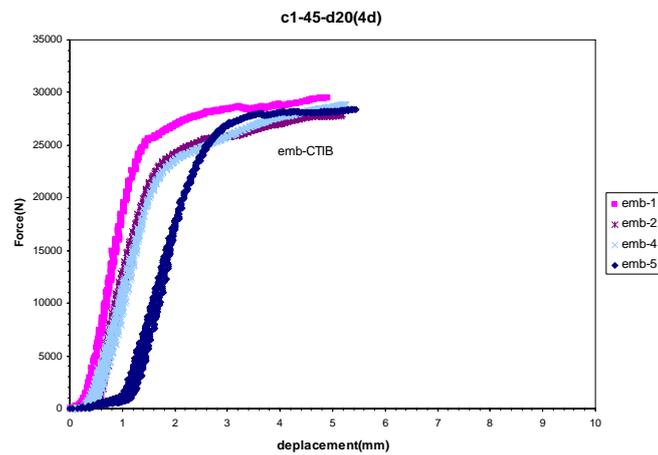
Graphique C.1-24 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-45-d20(1,5d)



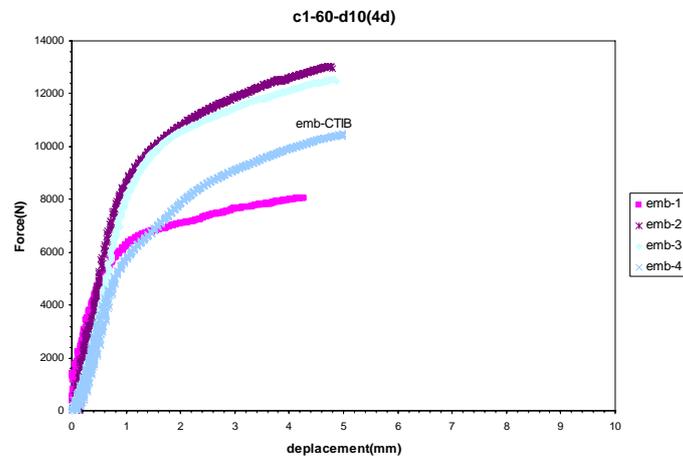
Graphique C.1-25 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-45-d20(4d)



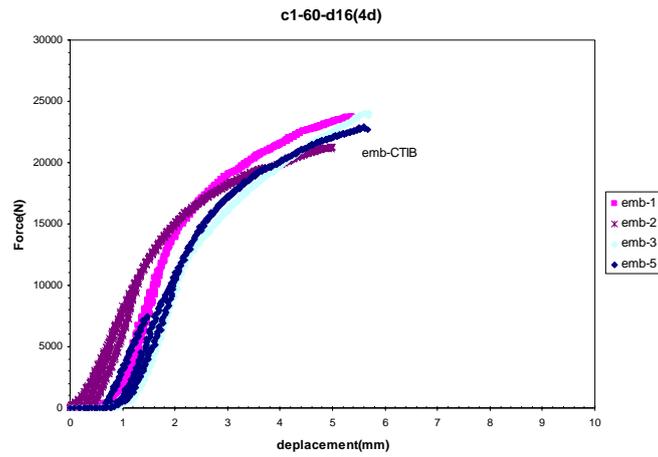
Graphique C.1-26 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-60-d10(4d)



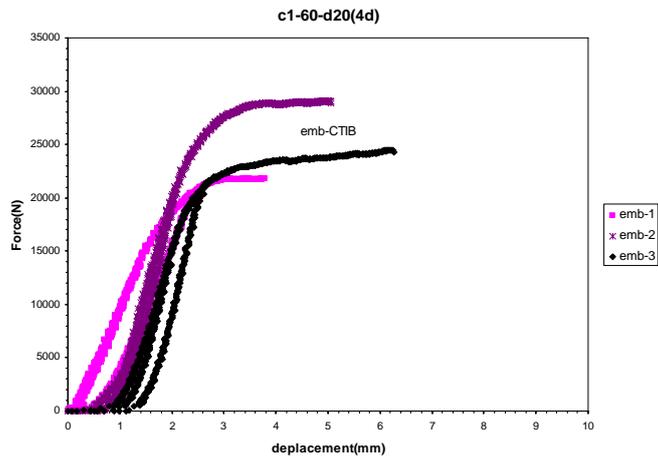
Graphique C.1-27 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-60-d16(4d)



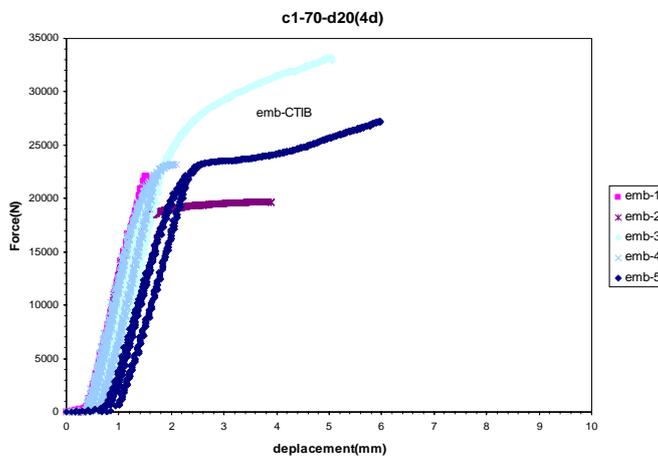
Graphique C.1-28 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-60-d20(4d)



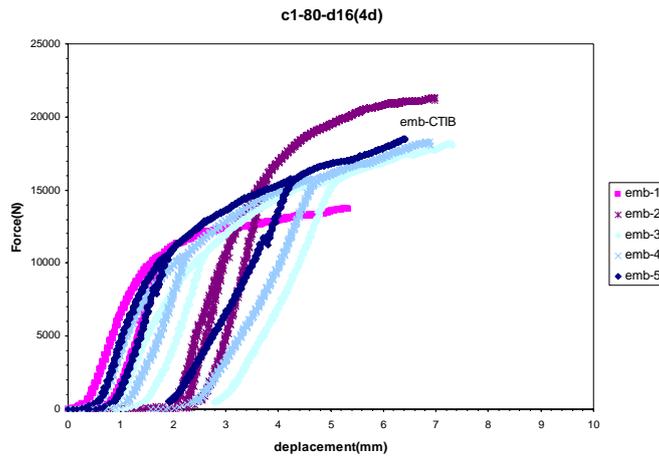
Graphique C.1-29 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-70-d20(4d)



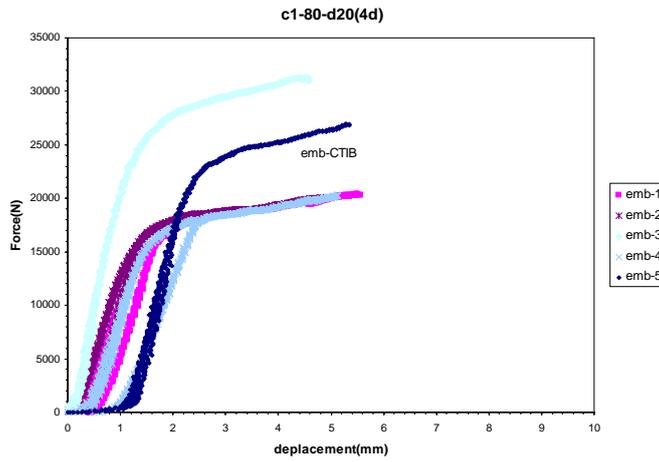
Graphique C.1-30 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-80-d16(4d)



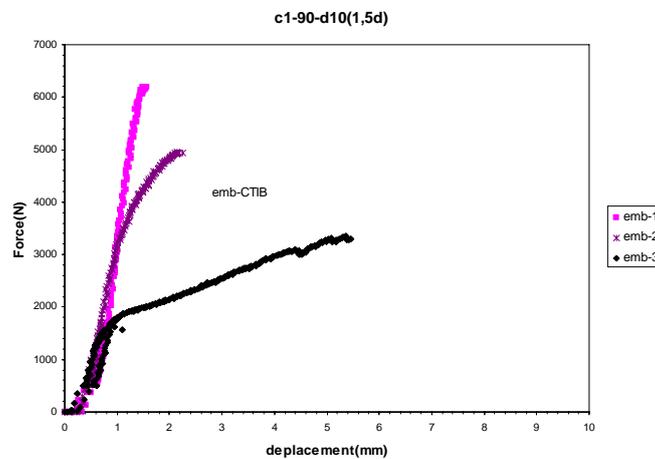
Graphique C.1-31 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-80-d20(4d)



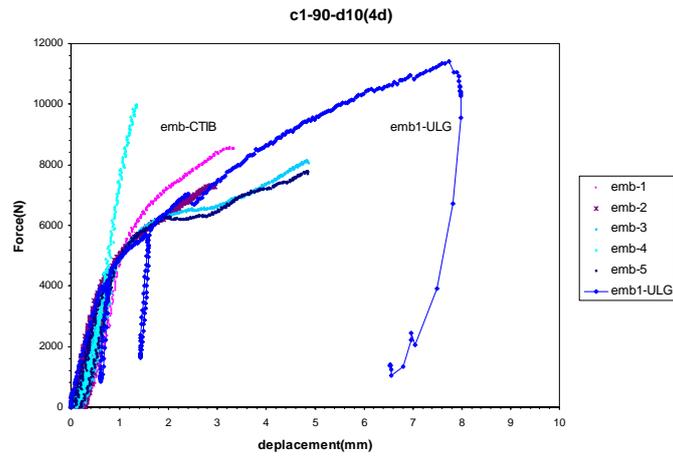
Graphique C.1-32 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-90-d10(1,5d)



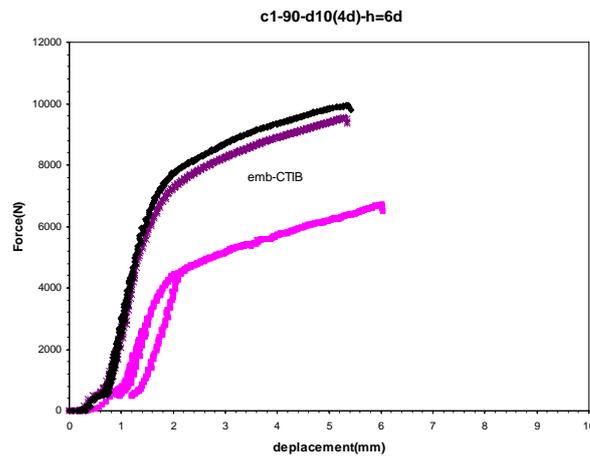
Graphique C.1-33 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-90-d10(4d)



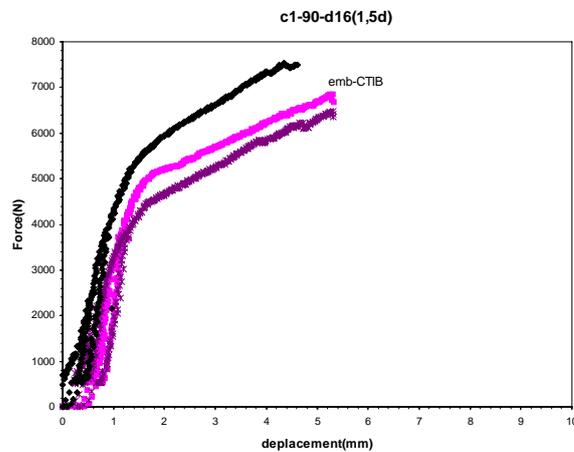
Graphique C.1-34 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-90-d10(4d)-h=6d



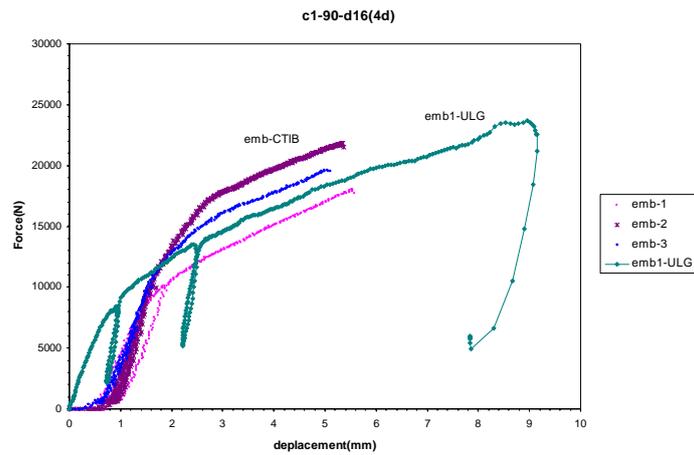
Graphique C.1-35 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-90-d16(1,5d)



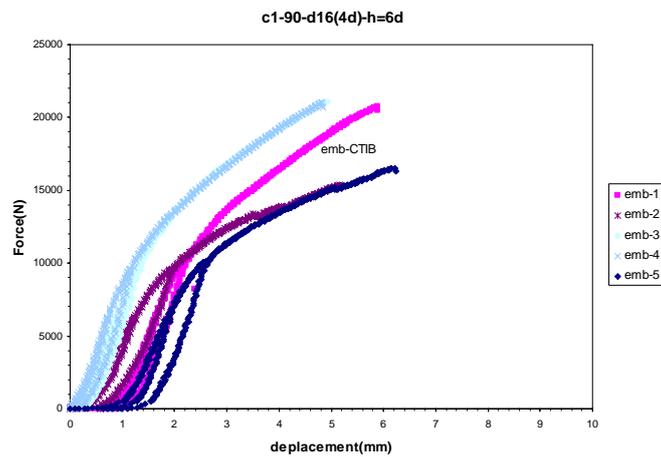
Graphique C.1-36 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-90-d16(4d)



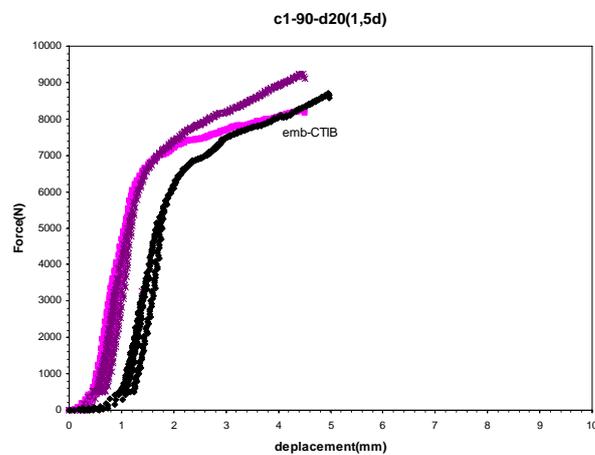
Graphique C.1-37 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-90-d16(4d)-h=6d



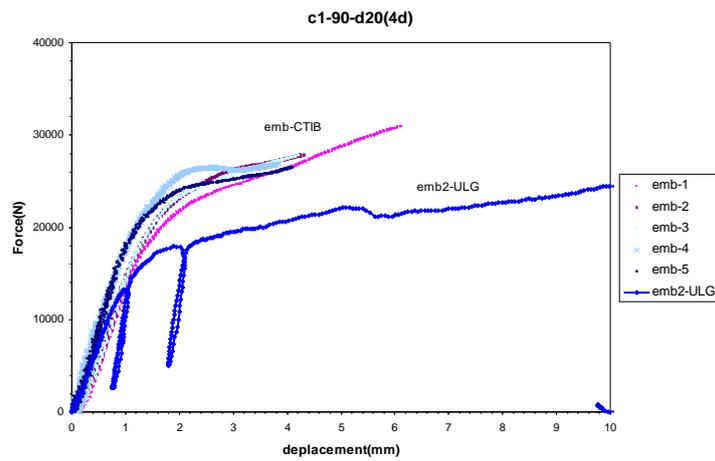
Graphique C.1-38 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-90-d20(1,5d)



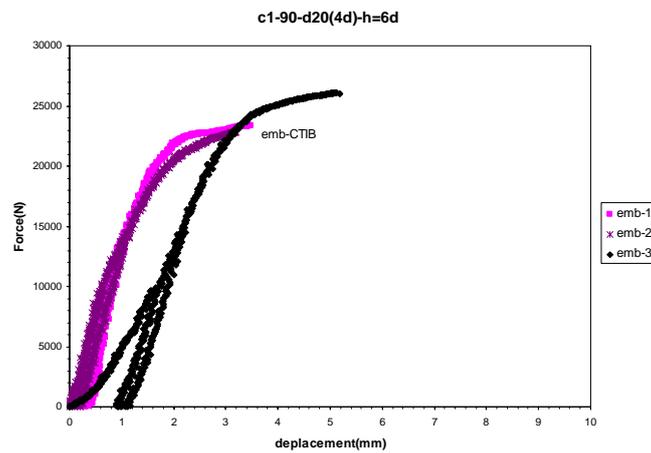
Graphique C.1-39 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-90-d20(4d)



Graphique C.1-40 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

- Série d'essais C1-90-d40(4d)-h=6d



Graphique C.1-41 Courbes "force-enfoncement" expérimentales.

## C.2 Essais sur les assemblages simples moisés, compression à 0°

Il s'agit d'éprouvettes d'assemblages à une seule broche. Les membrures se moisent parallèlement aux fibres, "compression à 0°". La Figure C.2-1 présente la configuration géométrique des éprouvettes en fonction de:

- diamètre  $d$  (10 mm, 16 mm, 20 mm) de la broche;
- rapport d'épaisseur des membrures (4d-4d-4d, 4d-8d-4d, 8d-8d-8d).

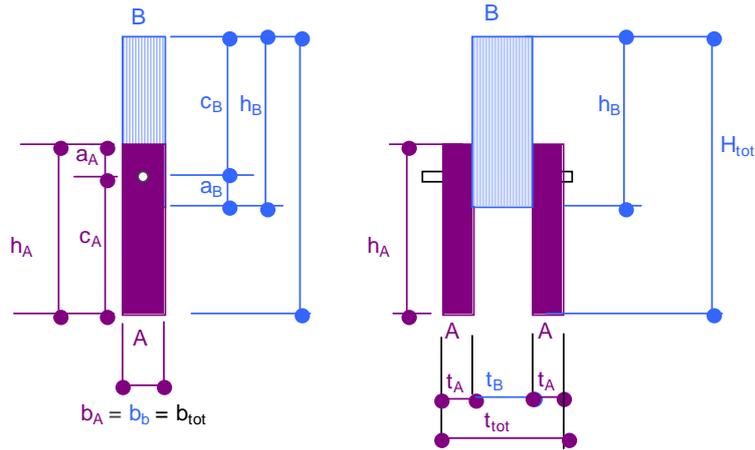


Figure C.2-1 Configuration des éprouvettes d'assemblages C2.

Les informations relatives à la configuration géométrique et au mode de chargement des éprouvettes sont données aux Tableau C.2-1 et Tableau C.2-2.

parties latérales		partie centrale	
$b_A$	6 * d	$b_B$	6 * d
$h_A$	27 * d	$h_B$	27 * d
$a_A$	7 * d	$a_B$	7 * d
$c_A$	20 * d	$c_B$	20 * d

Tableau C.2-1 Position de la broche dans les éprouvettes.

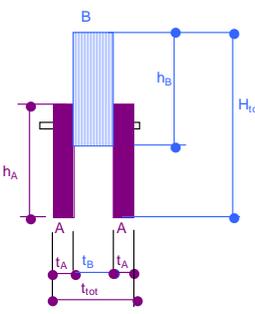
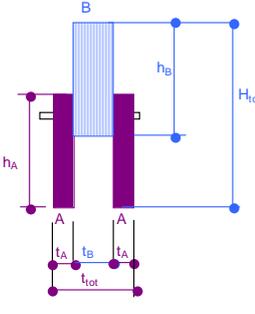
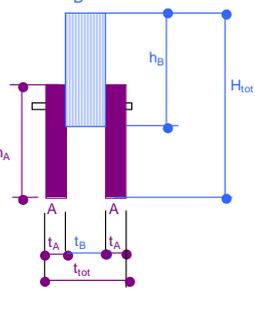
SCHEMA		d	Angle	Désignation	Charge estimée		
					0,4 Fmax	0,6 Fmax	Fmax
		mm	°	échantillon	N	N	N
 <p>Série C2-1</p>	1	10	0°/0°	C2-0°/0°-d10(4d-4d-4d)-1	3984	5976	9960
	2	10	0°/0°	C2-0°/0°-d10(4d-4d-4d)-2	"	"	"
	3	10	0°/0°	C2-0°/0°-d10(4d-4d-4d)-3	"	"	"
	4	16	0°/0°	C2-0°/0°-d16(4d-4d-4d)-1	9270	13905	23175
	5	16	0°/0°	C2-0°/0°-d16(4d-4d-4d)-2	"	"	"
	6	16	0°/0°	C2-0°/0°-d16(4d-4d-4d)-3	"	"	"
	7	20	0°/0°	C2-0°/0°-d20(4d-4d-4d)-1	13677	20516	34193
	8	20	0°/0°	C2-0°/0°-d20(4d-4d-4d)-2	"	"	"
	9	20	0°/0°	C2-0°/0°-d20(4d-4d-4d)-3	"	"	"
 <p>Série C2-2</p>	10	10	0°/0°	C2-0°/0°-d10(4d-8d-4d)-1	3984	5976	9960
	11	10	0°/0°	C2-0°/0°-d10(4d-8d-4d)-2	"	"	"
	12	10	0°/0°	C2-0°/0°-d10(4d-8d-4d)-3	"	"	"
	13	16	0°/0°	C2-0°/0°-d16(4d-8d-4d)-1	9270	13905	23175
	14	16	0°/0°	C2-0°/0°-d16(4d-8d-4d)-2	"	"	"
	15	16	0°/0°	C2-0°/0°-d16(4d-8d-4d)-3	"	"	"
	16	20	0°/0°	C2-0°/0°-d20(4d-8d-4d)-1	13677	20516	34193
	17	20	0°/0°	C2-0°/0°-d20(4d-8d-4d)-2	"	"	"
	18	20	0°/0°	C2-0°/0°-d20(4d-8d-4d)-3	"	"	"
 <p>Série C2-3</p>	19	10	0°/0°	C2-0°/0°-d10(8d-8d-8d)-1	4518	6777	11295
	20	10	0°/0°	C2-0°/0°-d10(8d-8d-8d)-2	"	"	"
	21	10	0°/0°	C2-0°/0°-d10(8d-8d-8d)-3	"	"	"
	22	16	0°/0°	C2-0°/0°-d16(8d-8d-8d)-1	10171	15275	25428
	23	16	0°/0°	C2-0°/0°-d16(8d-8d-8d)-2	"	"	"
	24	16	0°/0°	C2-0°/0°-d16(8d-8d-8d)-3	"	"	"
	25	20	0°/0°	C2-0°/0°-d20(8d-8d-8d)-1	14832	22249	37081
	26	20	0°/0°	C2-0°/0°-d20(8d-8d-8d)-2	"	"	"
	27	20	0°/0°	C2-0°/0°-d20(8d-8d-8d)-3	"	"	"

Tableau C.2-2: Informations associées à chacune des éprouvettes C2 testés.

### C.3 Essais sur les assemblages simples moisés, compression à 0° et 90°

Il s'agit d'éprouvettes d'assemblages à une seule broche. La membrure centrale est moisée perpendiculairement aux fibres des membrures extérieures, "compression à 0° et 90°". La Figure C.3-1 présente la configuration géométrique des éprouvettes en fonction de:

- diamètre  $d$  (10 mm, 16 mm, 20 mm) de la broche;
- rapport d'épaisseur des membrures (4d-4d-4d, 4d-8d-4d, 8d-8d-8d).

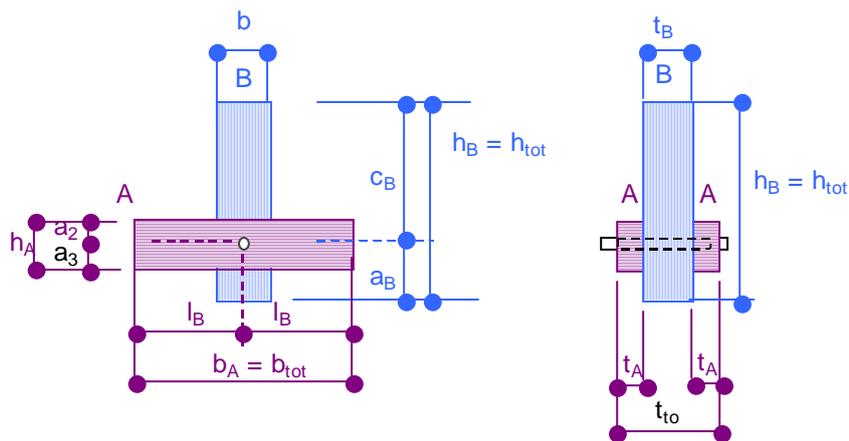


Figure C.3-1 Configuration des éprouvettes d'assemblages C3.

Les informations relatives à la configuration géométrique et au mode de chargement des éprouvettes sont données aux Tableau C.3-1 et Tableau C.3-2.

parties latérales		partie centrale	
$b_A$	6 * d	$b_B$	6 * d
$h_A$	6 * d	$h_B$	27 * d
$a_{2A}$	2 * d	$a_B$	7 * d
$a_{3A}$	4 * d	$c_B$	20 * d

Tableau C.3-1 Position de la broche dans les éprouvettes.

C.3 Essais sur les assemblages simples moisés, compression à 0° et 90°

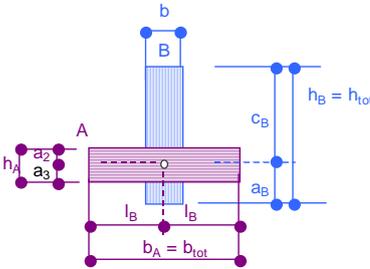
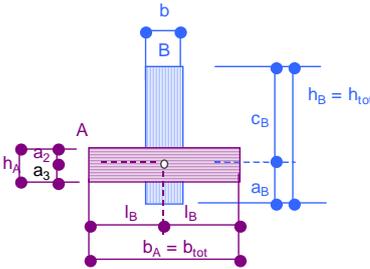
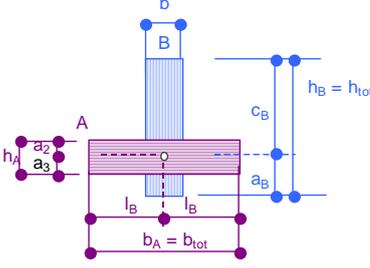
SCHEMA	d	Angle	Désignation	Charge estimée			
				0,4 Fmax	0,6 Fmax	Fmax	
	mm	°	échantillon	N	N	N	
 <p>Série C3-1</p>	28	10	0°/90°	C3-0°/90°-d10(4d-4d-4d)-1	3175	4763	7938
	29	10	0°/90°	C3-0°/90°-d10(4d-4d-4d)-2	"	"	"
	30	10	0°/90°	C3-0°/90°-d10(4d-4d-4d)-3	"	"	"
	31	16	0°/90°	C3-0°/90°-d16(4d-4d-4d)-1	7092	10638	17731
	32	16	0°/90°	C3-0°/90°-d16(4d-4d-4d)-2	"	"	"
	33	16	0°/90°	C3-0°/90°-d16(4d-4d-4d)-3	"	"	"
	34	20	0°/90°	C3-0°/90°-d20(4d-4d-4d)-1	10216	15324	25541
	35	20	0°/90°	C3-0°/90°-d20(4d-4d-4d)-2	"	"	"
	36	20	0°/90°	C3-0°/90°-d20(4d-4d-4d)-3	"	"	"
 <p>Série C3-2</p>	37	10	0°/90°	C3-0°/90°-d10(4d-8d-4d)-1	3175	4763	7938
	38	10	0°/90°	C3-0°/90°-d10(4d-8d-4d)-2	"	"	"
	39	10	0°/90°	C3-0°/90°-d10(4d-8d-4d)-3	"	"	"
	40	16	0°/90°	C3-0°/90°-d16(4d-8d-4d)-1	7092	10638	17731
	41	16	0°/90°	C3-0°/90°-d16(4d-8d-4d)-2	"	"	"
	42	16	0°/90°	C3-0°/90°-d16(4d-8d-4d)-3	"	"	"
	43	20	0°/90°	C3-0°/90°-d20(4d-8d-4d)-1	10216	15324	25541
	44	20	0°/90°	C3-0°/90°-d20(4d-8d-4d)-2	"	"	"
	45	20	0°/90°	C3-0°/90°-d20(4d-8d-4d)-3	"	"	"
 <p>Série C3-3</p>	46	10	0°/90°	C3-0°/90°-d10(8d-8d-8d)-1	4041	6061	10102
	47	10	0°/90°	C3-0°/90°-d10(8d-8d-8d)-2	"	"	"
	48	10	0°/90°	C3-0°/90°-d10(8d-8d-8d)-3	"	"	"
	49	16	0°/90°	C3-0°/90°-d16(8d-8d-8d)-1	8938	13407	22345
	50	16	0°/90°	C3-0°/90°-d16(8d-8d-8d)-2	"	"	"
	51	16	0°/90°	C3-0°/90°-d16(8d-8d-8d)-3	"	"	"
	52	20	0°/90°	C3-0°/90°-d20(8d-8d-8d)-1	12886	19328	32214
	53	20	0°/90°	C3-0°/90°-d20(8d-8d-8d)-2	"	"	"
	54	20	0°/90°	C3-0°/90°-d20(8d-8d-8d)-3	"	"	"

Tableau C.3-2 Informations associées à chacun des échantillons C3 testés.

## C.4 Essais sur les assemblages simples moisés, à deux broches, compression à 0°

Il s'agit d'éprouvettes d'assemblages à deux broches de diamètre  $d_{16}$  ( $d = 16$  mm). Les membrures se moisent parallèlement aux fibres, "compression à 0°". La Figure C.4-1 présente la configuration géométrique des éprouvettes:

- Variable: espacement entre les deux broches, 7d et 10d
- Fixe: diamètre 16mm, rapport d'épaisseur des membrures:  $t = 4d-4d-4d$

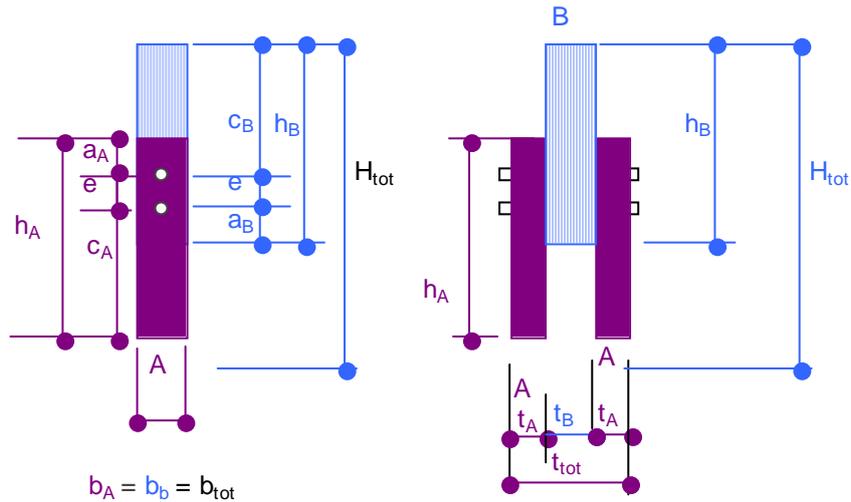


Figure C.4-1 Configuration géométrique des éprouvettes d'assemblage C4.

Les informations relatives à la configuration géométrique et au mode de chargement des éprouvettes sont données aux Tableau C.4-1 et Tableau C.4-2.

	parties latérales		partie centrale
$b_A$	6 * d	$b_B$	6 * d
$h_A$	27 * d	$h_B$	27 * d
$a_A$	7 * d	$a_B$	7 * d
$c_A$	13 * d	$c_B$	13 * d

Tableau C.4-1 Position des broches dans les éprouvettes.

SCHEMA	d	angle com- press	désignation échantillon	Charge estimée			
				0,4 Fmax	0,6 Fmax	Fmax	
	mm	°		N	N	N	
	55	16	0°/0°	C4-0°/0°-d16(4d-4d-4d)-e=7d-1	18540	27810	46349
	56	16	0°/0°	C4-0°/0°-d16(4d-4d-4d)-e=7d-2	"	"	"
	57	16	0°/0°	C4-0°/0°-d16(4d-4d-4d)-e=7d-3	"	"	"
	58	16	0°/0°	C4-0°/0°-d16(4d-4d-4d)-e=10d-1	18540	27810	46349
	59	16	0°/0°	C4-0°/0°-d16(4d-4d-4d)-e=10d-2	"	"	"
	60	16	0°/0°	C4-0°/0°-d16(4d-4d-4d)-e=10d-3	"	"	"

Tableau C.4-2 Informations associées à chacun des échantillons C4 testés.



## C.5 Essais sur les assemblages simples moisés, à deux broches, compression à 0° et à 90°

Il s'agit d'éprouvettes d'assemblages à deux broches de diamètre d16 ( $d = 16$  mm). La membrure centrale est moisée perpendiculairement aux membrures extérieures, "compression à 0° et 90°". La Figure C.5-1 présente la configuration géométrique des éprouvettes:

- Variable: les deux broches sont disposées parallèlement aux fibres des membrures extérieures; l'espacement entre deux broches est: 7d et 10d.
- Fixe: diamètre 16mm, rapport d'épaisseur des membrures:  $t = 4d-4d-4d$

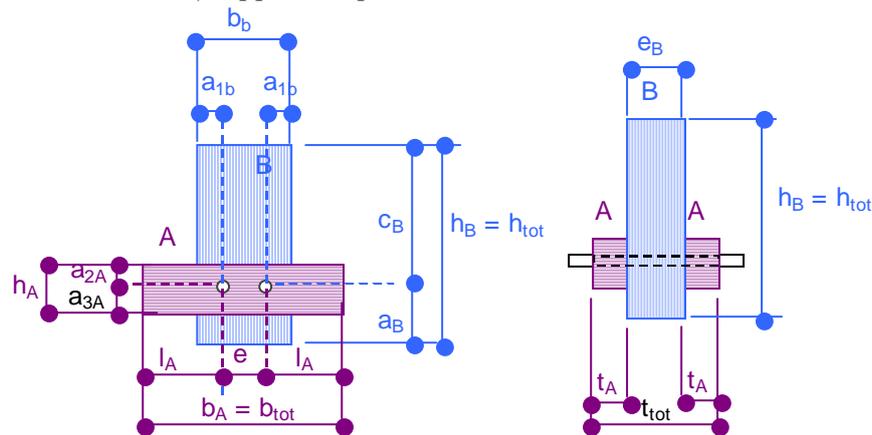


Figure C.5-1 Configuration géométrique des éprouvettes d'assemblage C5.

Les informations relatives à la configuration géométrique et au mode de chargement des éprouvettes sont données aux Tableau C.5-1 et Tableau C.5-2.

parties latérales		partie centrale	
$b_A$	$27*d$	$b_B$	$6*d + e$
$h_A$	$6*d$	$h_B$	$27*d$
$a_{2A}$	$2*d$	$a_B$	$7*d$
$a_{3A}$	$4*d$	$c_B$	$20*d$
$2l_A$	$27*d - e$	$a_{1B}$	$3*d$

Tableau C.5-1 Position des broches dans les éprouvettes.

SCHEMA	d	angle com- press	désignation échantillon	Charge estimée			
				0,4 Fmax	0,6 Fmax	Fmax	
<p>Série C5-1 et C5-2</p>	61	16	0°/90°	C5-0°/90°-d16(4d-4d-4d)-e=7d-1	14184	21277	35461
	62	16	0°/90°	C5-0°/90°-d16(4d-4d-4d)-e=7d-2	"	"	"
	63	16	0°/90°	C5-0°/90°-d16(4d-4d-4d)-e=7d-3	"	"	"
	64	16	0°/90°	C5-0°/90°-d16(4d-4d-4d)-e=10d-1	14184	21277	35461
	65	16	0°/90°	C5-0°/90°-d16(4d-4d-4d)-e=10d-2	"	"	"
	66	16	0°/90°	C5-0°/90°-d16(4d-4d-4d)-e=10d-3	"	"	"

Tableau C.5-2 Informations associées à chacun des échantillons C5 testés.



## C.6 Essais sur les assemblages simples moisés, à deux broches, compression à 0° et à 90°

Il s'agit d'éprouvettes d'assemblages à deux broches de diamètre d16 ( $d = 16 \text{ mm}$ ). La membrure centrale est moisée perpendiculairement aux membrures extérieures, "compression à 0° et 90°". La Figure C.5-1 présente la configuration géométrique des éprouvettes:

- Variable: les deux broches sont disposées perpendiculairement aux fibres des membrures extérieures; l'espacement entre deux broches est: 7d et 10d;
- Fixe: diamètre 16mm, rapport d'épaisseur des membrures:  $t = 4d-4d-4d$

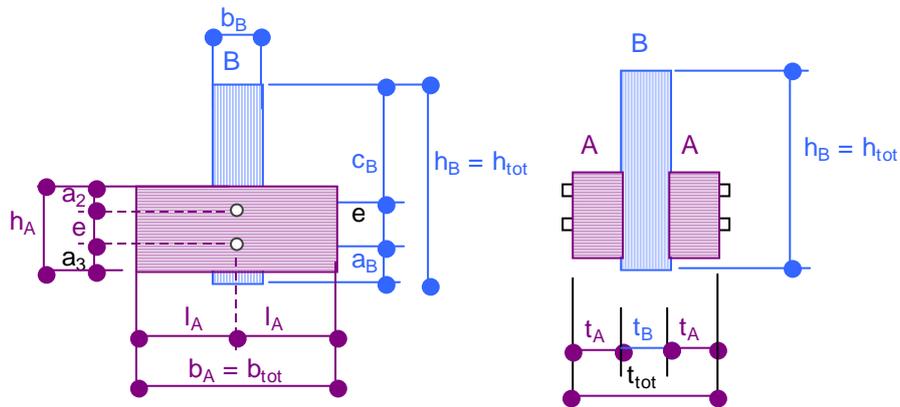


Figure C.6-1 Configuration géométrique des éprouvettes d'assemblage C6.

Les informations relatives à la configuration géométrique et au mode de chargement des éprouvettes sont données aux Tableau C.6-1 et Tableau C.6-2.

parties latérales		partie centrale	
$b_A$	$27*d$	$b_B$	$6*d$
$h_A$	$6*d + e$	$h_B$	$27*d$
$a_{2A}$	$3*d$	$a_B$	$7*d$
$a_{3A}$	$3*d$	$c_B$	$20*d - e$

Tableau C.6-1 Position des broches dans les éprouvettes.

SCHEMA	d	angle compress	désignation échantillon	Charge estimée			
				0,4 Fmax	0,6 Fmax	Fmax	
<p>Série C6-1 et C6-2</p>	67	16	0°/90°	C6-0°/90°-d16(4d-4d-4d)-e=7d-1	14184	21277	35461
	68	16	0°/90°	C6-0°/90°-d16(4d-4d-4d)-e=7d-2	"	"	"
	69	16	0°/90°	C6-0°/90°-d16(4d-4d-4d)-e=7d-3	"	"	"
	70	16	0°/90°	C6-0°/90°-d16(4d-4d-4d)-e=10d-1	14184	21277	35461
	71	16	0°/90°	C6-0°/90°-d16(4d-4d-4d)-e=10d-2	"	"	"
	72	16	0°/90°	C6-0°/90°-d16(4d-4d-4d)-e=10d-3	"	"	"

Tableau C.6-2 Informations associées à chacun des échantillons C6 testés.



# Annexe D Méthode de prédiction analytique de la rigidité élastique des assemblages à broches

## D.1 Introduction

Soit un assemblage soumis à la fois à flexion et cisaillement (Figure D-1). En régime élastique, la réponse de l'assemblage peut être déterminée par la superposition des effets dus à la flexion et au cisaillement (à savoir au §7.3.2.2).

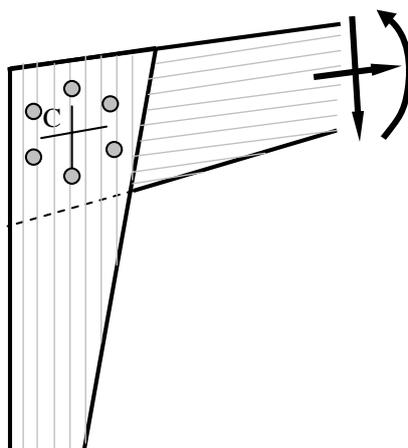


Figure D-1 Effors ( $M_j$ ,  $N_j$ ,  $T_j$ ) agissant sur un assemblage.

En général, pour un assemblage soumis en même temps aux effets de flexion et de cisaillement, l'amplification de la flèche transversale de l'élément structural concerné due au comportement semi-rigide de l'assemblage et provoquée par  $M_j$  est souvent beaucoup plus importante que celle provoquée par  $N_j$  et  $T_j$ . Cela conduit à négliger les effets de  $N_j$  et  $T_j$  par rapport à l'effet de  $M_j$  dans la modélisation du comportement semi-rigide de l'assemblage. Dans une analyse de structure, l'assemblage est donc souvent représenté par un ressort en flexion caractérisé par le comportement flexionnel de l'assemblage.

Dans le cas d'un assemblage soumis seulement au cisaillement, ou dans le cas où les effets de cisaillement sont jugés importants, le comportement semi-rigide de l'assemblage en cisaillement doit être pris en compte.

Ce chapitre est destiné à résumer les étapes à suivre en vue de la prédiction du comportement élastique d'un assemblage mécanique à broches grâce aux modèles analytiques proposés dans les derniers chapitres de la thèse.

## D.2 Assemblages en cisaillement, moisés à 0°-0°

Soit un assemblage en cisaillement dont les rangées de broches sont disposées sur une ligne parallèle à la direction d'application de la force (Figure D-2):

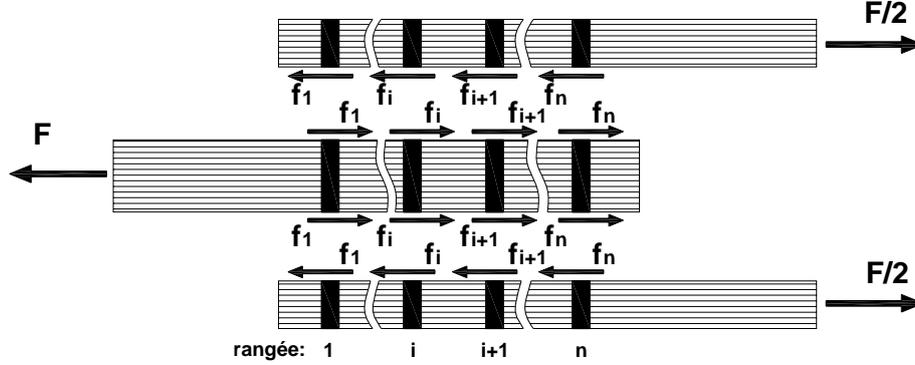


Figure D-2 Assemblage en cisaillement simple constitué de plusieurs rangées de broches disposées sur une ligne parallèle à la force appliquée.

Les hypothèse et le mode l'analyse de la distribution des efforts entre les composantes constitutives de ce type d'assemblage ont été présentées au §9.4.2. A l'issue de ce paragraphe, la rigidité élastique d'un assemblage en cisaillement, moisé à 0°-0°, a été via la détermination de  $[\Delta]$  dans la formule (9.18):

$$K_{ac} = \frac{1}{[\Delta]}$$

$[\Delta]$  est un paramètre qui caractérise la souplesse de l'assemblage. Il peut être déterminé par la formule (9.17) suivante:

$$[\Delta] = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{N_{ci}^* p_i}{E_c A_c} + \frac{N_{c,n-1}^*}{K_{n1}}$$

$N_{ci}^*$  est l'effort normal agissant sur le tronçon  $i$  entre deux rangées  $i$  et  $i+1$  de la membrure centrale lorsque  $F$  est unitaire. Les  $N_{ci}^*$  ( $i = 1, n$ ) sont obtenus par résolution du système d'équations (9.14):

$$-\frac{1}{K_i} N_{c,i-1}^* + \left( \frac{p_i}{E_c A_c} + \frac{p_i}{2E_l A_l} + \frac{1}{K_i} + \frac{1}{K_{i+1}} \right) N_{ci}^* - \frac{1}{K_{i+1}} N_{c,i+1}^* = \frac{p_i}{2E_l A_l} \quad (i = 1, n-1)$$

$K_i$  est la rigidité élastique du comportement local "broche-bois" de la rangée  $i$ . Appelons  $m_i$  le nombre de broches de la rangée  $i$ , on a donc:

$$K_i = m_i \cdot K_{lc}$$

$K_{IC}$  est la rigidité élastique du binôme "broche-bois" avec une seule broche. Sa valeur peut être estimée par la formule (9.1) proposée au §9.4.1 :

$$K_{IC} = F(k_1, k_2, E_a I_a, t_1, t_2)$$

$k_1$  ( $k_2$ ),  $E_a I_a$ ,  $t_1$  ( $t_2$ ) sont respectivement la rigidité élastique de la composante d'"embedding" de la membrure latérale (centrale), la rigidité en flexion de la composante "broche" et l'épaisseur de la membrure latérale (centrale).

La rigidité élastique des composantes d'"embedding"  $k_i$  et  $k_2$ , avec angle de compression des fibres  $0^\circ$ , peut être estimée directement par le modèle 2D analytique proposé au §8.5.1:

$$k_i = F(E_1, E_2, v_{12}, G_{12}) \quad (i = 1, 2)$$

Dans la pratique, on cherche normalement à garder la section des éléments assemblés (de même classe de bois) constante, donc  $E_i A_i = 0.5 E_c A_c$ , la distance entre les rangées constante, donc  $p_i = p$ , et le nombre de connecteur de chaque rangée constant, donc  $m_i = m$  et  $K_i = K_{mc} = m K_{1c}$ . Si tout ceci est respecté, la rigidité élastique de l'assemblage peut être estimée, selon le nombre de rangées de broches comme suit (tableau 9-1):

Nombre des rangées	Rigidité de l'assemblage
2	$\frac{2}{1 + \frac{K_{mc} p}{E_c A_c}} K_{mc}$
3	$\frac{3 + 2 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c}}{1 + 4 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + 2 \left( \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} \right)^2} K_{mc}$
4	$\frac{4 \left( 1 + \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} \right)}{1 + 8 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + 6 \left( \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} \right)^2} K_{mc}$
5	$\frac{5 + 10 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + 4 \left( \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} \right)^2}{1 + 14 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + 22 \left( \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} \right)^2 + 8 \left( \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} \right)^3} K_{mc}$

### D.3 Assemblages en cisaillement, moisé à $0^\circ$ - $\alpha^\circ$

Soit un assemblage en cisaillement dont la membrure centrale forme un angle  $\alpha$  avec les membrures latérales, Figure D-3:

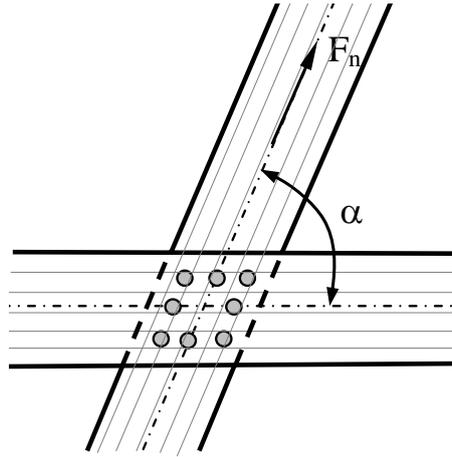


Figure D-3 Assemblage en cisaillement simple constitué de plusieurs rangées de broches, moisé à  $0^\circ$ - $\alpha^\circ$ .

Les hypothèses et le mode d'analyse de la distribution des efforts entre les composantes constitutives de ce type d'assemblage ont été présentées au §9.4.3. A l'issue de ce paragraphe, la rigidité élastique d'un assemblage en cisaillement, moisé à  $0^\circ$ - $\alpha^\circ$ , a pu être estimée au travers de la détermination de  $[\Delta]$  dans la formule (9.18):

$$K_{ac} = \frac{1}{[\Delta]}$$

$[\Delta]$  est un paramètre qui caractérise la souplesse de l'assemblage. Il peut être estimé par la formule (9.17) proposée:

$$[\Delta] = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{N_{ci}^* p_i}{E_c A_c} + \frac{N_{cn-1}^*}{K_{n1}}$$

$N_{ci}^*$  est l'effort normal agissant sur le tronçon  $i$  entre deux rangées  $i$  et  $i+1$  de la membrure centrale lorsque  $F$  est unitaire. Les  $N_{ci}^*$  ( $i = 1, n$ ) sont obtenus après résolu du système d'équations (9.24) suivant:

$$-\frac{1}{K_i} N_{c\ i-1}^* + \left( \frac{p_i}{E_c A_c} + \frac{p_i}{2E_l A_l} + \frac{1}{K_i} + \frac{1}{K_{i+1}} \right) N_{ci}^* - \frac{1}{K_{i+1}} N_{c\ i+1}^* = \frac{p_i}{2E_l A_l} \quad (i = 1, n-1)$$

$K_i$  est la rigidité élastique du comportement local "broche-bois" de la rangée  $i$ . Appelons  $m_i$  le nombre de broches de la rangée  $i$ , on a donc:

$$K_i = m_i \cdot K_{1c}$$

$K_{1c}$  est la rigidité élastique du comportement "broche-bois" avec une seule broche. Sa valeur peut être estimée par la formule (9.1) proposée au §9.4.1:

$$K_{1c} = F(k_1, k_2, E_a I_a, t_1, t_2)$$

$k_1$  ( $k_2$ ),  $E_a I_a$ ,  $t_1$  ( $t_2$ ) sont respectivement la rigidité élastique de la composante d'"embedding" de la membrure latérale (centrale), la rigidité en flexion de la composante "broche" et l'épaisseur de la membrure latérale (centrale):

- La rigidité élastique de la composante d'"embedding"  $k_1$  de la membrure latérale, avec angle de compression aux fibres  $\alpha^\circ$ , peut être estimée au moyen de la formule (8.1) proposée au §8.2.5:

$$k_1 = k_0 \cos^2 \alpha + k_{90} \sin^2 \alpha ;$$

$k_0$  et  $k_{90}$ , les rigidités de la composante d'"embedding" à  $0^\circ$  et  $90^\circ$ , peuvent être déterminées par le modèle 2D analytique proposé au §8.5.1 :

$$k_{0(90)} = F(E_1, E_2, \nu_{12}, G_{12})$$

- La rigidité élastique de la composante d'"embedding"  $k_2$  de la membrure centrale, avec angle de compression aux fibres  $0^\circ$ , peut être estimée directement par le modèle proposé au §8.5.1:

$$k_2 = F(E_1, E_2, \nu_{12}, G_{12})$$

Dans la pratique, on cherche normalement à garder la section des éléments assemblés (de même classe de bois) constante, donc  $E_l A_l = 0.5 E_c A_c$ , la distance entre les rangées constante, donc  $p_i = p$ , et le nombre de connecteurs de chaque rangée constant, donc  $m_i = m$  et  $K_i = K_{mc} = m K_{lc}$ . Si tout ceci est respecté, la rigidité élastique de l'assemblage peut être estimé, selon le nombre de rangées des broches comme suit:

Nombre de rangées	Rigidité de l'assemblage
2	$\frac{2 + \frac{K_{mc} p}{E_c A_c}}{1 + \frac{K_{mc} p}{E_c A_c}} K_{mc}$
3	$\frac{\left(1 + \frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right) \left(3 + \frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)}{1 + 3 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + \left(\frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)^2} K_{mc}$
4	$\frac{\left(2 + \frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right) \left(2 + 4 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + \left(\frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)^2\right)}{1 + 6 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + 5 \left(\frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)^2 + \left(\frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)^3} K_{mc}$

5	$\frac{\left(1 + 3 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + \left(\frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)^2\right) \left(5 + 5 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + \left(\frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)^2\right)}{1 + 10 \frac{K_{mc} p}{E_c A_c} + 15 \left(\frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)^2 + 7 \left(\frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)^3 + \left(\frac{K_{mc} p}{E_c A_c}\right)^4} K_{mc}$
---	---

## D.4 Assemblages en flexion

Soit un assemblage en flexion dont la membrure centrale B forme un angle  $\gamma$  avec les membrures latérales A, Figure D-4:

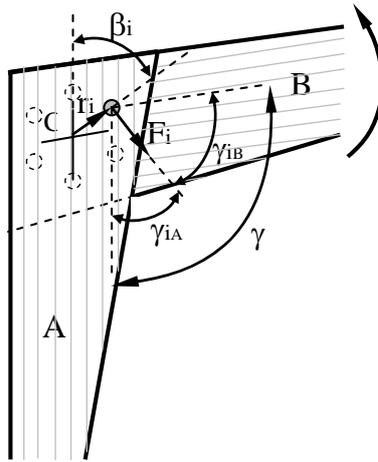


Figure D-4 Assemblage en flexion.

Les hypothèses et le mode d'analyse de la distribution des efforts entre les composantes constitutives de ce type d'assemblage ont été présentées au §10.3. A l'issue de ce paragraphe, la rigidité élastique d'un assemblage en flexion a pu être estimée par la formule suivante (10.5):

$$K_{af} = \sum_i K_{\gamma_{iA}, \gamma_{iB}} r_i^2$$

$K_{\gamma_{iA}, \gamma_{iB}}$  est la rigidité élastique du binôme "broche-bois" de la broche i. Elle peut être déterminée par la formule (9.1) proposée au §9.4.1:

$$K_{\gamma_{iA}, \gamma_{iB}} = F(k_{\gamma_{iA}}, k_{\gamma_{iB}}, E_a I_a, t_A, t_B)$$

$k_{\gamma_{iA}}$  ( $k_{\gamma_{iB}}$ ),  $E_a I_a$ ,  $t_A$  ( $t_B$ ) sont respectivement la rigidité élastique de la composante d'"embedding" activée dans la membrure latérale A (centrale B), la rigidité en flexion de la composante "broche" et l'épaisseur de la membrure latérale A (centrale B).

La rigidité élastique  $k_{\gamma_{iA}}$  (resp.  $k_{\gamma_{iB}}$ ) de la composante d'"embedding" d'angle  $\gamma_{iA}$  (resp.  $\gamma_{iB}$ ) peut être estimée au moyen de la formule (8.1) proposée au §8.2.5:

$$k_{\gamma_i} = k_0 \cos^2 \gamma_i + k_{90} \sin^2 \gamma_i$$

où  $\gamma_i$  est égal à  $\gamma_{iA}$  (resp.  $\gamma_{iB}$ ),  $k_0$  à  $k_{0A}$  (resp.  $k_{0B}$ ) et  $k_{90}$  à  $k_{90A}$  (resp.  $k_{90B}$ ).

Les valeurs de  $k_{0A}$  (resp.  $k_{0B}$ ) et  $k_{90}$  (resp.  $k_{90B}$ ), les rigidités de la composante d'"embedding" à  $0^\circ$  et  $90^\circ$ , peuvent être déterminées par le modèle 2D analytique proposé au §8.5.1 pour chaque membrure latérale (A) et centrale (B):

$$k_{0(90)} = F(E_1, E_2, \nu_{12}, G_{12})$$

