Assemblages Bois par organes-tiges sous sollicitations alternées

Bernard Crosnier*'**, Franck Cévaër*'**

* Département Génie Civil, Institut Universitaire de Technologie de Nîmes. **Laboratoire de Mécanique et Génie-Civil - UMR5508, Université de Montpellier II, cc048, Place E. Bataillon, 34096 Montpellier cedex 5. <u>crosnier@lmgc.univ-montp2.fr. cevaer@lmgc.univ-montp2.fr</u>

RÉSUMÉ. Les structures à ossature bois sont très largement utilisées en zones à fort risque sismique, d'une part, parce que ces systèmes constructifs permettent de réduire considérablement les charges verticales et par conséquent l'intensité des actions sismiques horizontales qui en découlent, et d'autre part, parce que le matériau bois présente des caractéristiques intéressantes au niveau amortissement et dissipation de l'énergie. Néanmoins, les points faibles de ces structures résident fréquemment au niveau des liaisons qui se dégradent rapidement sous des sollicitations alternées. Les qualités recherchées dans les assemblages des éléments de contreventements verticaux de ces structures sont :

- une ductilité statique **m** élevée (rapport entre la déformation ultime et la déformation élastique de l'assemblage),

- une faible dégradation de la rigidité Ku de l'assemblage sous sollicitations alternées,

- une absorption importante de l'énergie W d'origine sismique par déformation plastique de l'assemblage,

- une faible dégradation de la résistance de l'assemblage sous sollicitations alternées.

ABSTRACT. Wooden structures are widely used in seismic zones, because these structures permit to reduce vertical loads and consequently horizontal seismic actions, and wooden material is interesting for damping and energy dispersal. Nevertheless, a certain weakness of these structures is often due to deteriorating jointing under alternative promptings. The properties of satisfactory jointing of vertical braces are:

- a good static ductility **m**. (quotient of ultimate bending and of elastic bending),

- a minimal deteriorating of the stiffness Ku of the jointing, under alternative promptings,

- a relatively good dispersal of the energy W of seismic cause by plastic bending of jointing,

- a minimal deteriorating of the jointing under alternative promptings

MOTS-CLÉS: structures bois – assemblages – sismique.

Rencontres AUGC 2006 - La Grande Motte, pages 1 à 22

KEYWORDS : wood structures – jointing - seismic.

1. Introduction - position du problème

Les structures à ossature bois sont très largement utilisées en zones à fort risque sismique, d'une part, parce que ces systèmes constructifs permettent de réduire considérablement les charges verticales et par conséquent l'intensité des actions sismiques horizontales qui en découlent, et d'autre part, parce que le matériau bois présente des caractéristiques intéressantes au niveau amortissement et dissipation de l'énergie. Néanmoins, les points faibles de ces structures résident fréquemment au niveau des liaisons qui se dégradent rapidement sous des sollicitations alternées. Les qualités recherchées dans les assemblages des éléments de contreventements verticaux de ces structures sont :

- une ductilité statique élevée (rapport entre la déformation ultime et la déformation élastique de l'assemblage),

- une faible dégradation de la rigidité de l'assemblage sous sollicitations alternées,

- une absorption importante de l'énergie d'origine sismique par déformation plastique de l'assemblage,

- une faible dégradation de la résistance de l'assemblage sous sollicitations alternées.

2. Notations et définitions

Conformément à l'Eurocode 5, on définit les notations suivantes, nécessaires à l'étude du comportement des assemblages bois à organes-tiges travaillant au cisaillement :

t₁, t₂ : épaisseur des bois ou pénétration de l'organe tige en mm.

d : diamètre de l'organe tige en mm.

 $f_{h,i,k}$: portance locale caractéristique, au sein du bois i, en N/mm².

 β : rapport des portances locales caractéristiques = $f_{h,2,k}/f_{h,1,k}$

M_{y,k}: moment plastique caractéristique en N.mm.

R_k: résistance caractéristique de l'assemblage en N/mm².

 ρ_k : masse volumique du bois en kg/m³.

uy : déformation élastique de l'assemblage en mm.

 u_u : déformation ultime de l'assemblage en mm.

 μ_s : ductilité statique de l'assemblage = u_u / u_y

K_{ser}, K_u: rigidité des assemblages respectivement aux E.L.S. et aux E.L.U.

2.1. Classification des assemblages

La classification des assemblages peut se faire selon leur rigidité K, ou selon leur ductilité statique μ_s .



Figure 1. Modélisation des assemblages selon l'Eurocode 5.

2.1.1. Classification en fonction de la rigidité K

La classification des assemblages en fonction de leur rigidité K est la première classification qui vient à l'esprit. La rigidité K_{ser} représente la rigidité pour un chargement aux états limites de service, tandis que la rigidité K_u représente la rigidité aux états limites ultimes. Cette dernière est fondamentale dans le cas de sollicitations d'origine sismique.

2.1.2. Classification en fonction de la ductilité statique \mathbf{m}_s

La classification des assemblages en fonction de la ductilité statique μ_s , voir figure 1, présente beaucoup plus d'intérêt dans le cas de sollicitations d'origine sismique, car elle permet déjà d'appréhender l'aptitude de l'assemblage à accepter des déformations plastiques. La courbe (c) est caractéristique du comportement d'un assemblage collé ($\mu_s = 1$), alors que la courbe (d) est caractéristique d'un assemblage autorisant des déformations plastiques avant l'obtention de la ruine.

2.2. Les différents modes de ruine des assemblages par organes-tige cisaillés

On désigne par organe-tige cisaillé, les clous, vis, tirefonds, boulons et axes travaillant au cisaillement. Ces liaisons qui mettent en présence un matériau très déformable (le bois), et un matériau rigide (l'acier), peuvent être le siège de plusieurs modes de ruine.

- Il peut y avoir plastification au sein d'un des deux bois assemblés, ou dans les deux bois. Ce premier scénario définit les ruines de mode 1 (3 résistances caractéristiques pour les assemblages travaillant en simple cisaillement, et uniquement 2 résistances caractéristiques pour les assemblages travaillant en double cisaillement du fait de la symétrie de comportement). Les ruines de mode 1 se caractérisent par une valeur de μ_s peu élevée (comprise entre 1 et 3) et on adopte la valeur minimale assurée, soit $\mu_s = 1$.

- Il peut y avoir formation d'une rotule plastique dans l'organe-tige au sein de l'un des deux bois assemblés. Ce deuxième scénario définit les ruines de mode 2 (2 résistances caractéristiques pour les assemblages travaillant en simple cisaillement, et uniquement 1 résistance caractéristique pour les assemblages travaillant en double cisaillement du fait de la symétrie de comportement). Les ruines de mode 2 se caractérisent par une valeur de μ_s moyenne (supérieure à 3 et inférieure à 6) et on adopte la valeur minimale assurée, soit $\mu_s = 3$.

- Il peut y avoir formation de rotules plastiques dans l'organe-tige au sein des deux bois assemblés. Ce troisième scénario définit les ruines de mode 3 (1 résistance caractéristique pour les assemblages travaillant en simple ou double cisaillement). Les ruines de mode 3 se caractérisent par une valeur de μ_s élevée (supérieure 6) et on adopte la valeur minimale assurée, soit $\mu_s = 6$.

	$ \begin{aligned} f_{h,1,k} t_1 d \\ f_{h,2,k} t_2 d \end{aligned} $
	$\frac{f_{\underline{\mathbf{x}},\underline{1},\underline{\mathbf{x}}}}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right]$
$R_k = \min$	$1,1 \frac{f_{k,l,k} t_l d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{j,k}}{f_{k,l,k} d t_l^2}} - \beta \right]$
	$1,1 \frac{f_{A,1,k} t_2 d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2 (1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta) M_{y,k}}{f_{A,1,k} d t_2^2}} - \beta \right]$
Į	$1,1 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2 M_{y,k}} f_{h,l,k} d$

Figure 2. Résistances caractéristiques des organes-tiges en simple cisaillement.



Figure 3. Ruines caractéristiques des organes-tiges en simple cisaillement.



Figure 4. Résistances caractéristiques des organes-tiges en double cisaillement.



Figure 5. Ruines caractéristiques des organes-tiges en double cisaillement.

2.3. Optimisation des assemblages à organes-tige cisaillés, sous sollicitations alternées

Les paramètres régissant le comportement des assemblages à organes-tige cisaillés sont multiples, et le choix des paramètres de conception est rendu difficile par la complexité des calculs de pré-dimensionnement. Néanmoins, sous sollicitations alternées d'origine sismique, les organes tiges doivent rester parfaitement ancrés au

sein des bois assemblés. On doit donc éviter au maximum la formation de zones plastifiées dans les bois. Cela revient à faire des choix conceptuels favorisant l'apparition des ruines de mode 3, et les rotules plastiques formées au sein de l'organe-tige doivent pouvoir se former et se déformer durant les cycles de chargement-déchargement, sans l'apparition de mécanismes au sein de l'assemblage. Ceci nécessite d'adopter une disposition d'organes-tige présentant au moins deux directions de clouage distinctes (dans tous les essais, deux directions perpendiculaires d'organes-tige sont adoptées).

2.3.1. Prévision d'un mode de ruine

Les grandeurs qui régissent l'apparition de tel ou tel mode de ruine sont :

- les portances locales caractéristiques f h,1,k et f h,2,k. Elles sont caractéristiques de l'apparition des modes de ruine n°1 et 2, et ont pour expression :

 $f_{h,i,k} = 0,082.\rho_{ki}.d^{-0.3}$ (en N/mm²) pour les organes-tige assemblés sans pré-perçage des bois, et $f_{h,i,k} = 0,082.\rho_{k,i}.(1-0,01.d)$ pour ceux assemblés avec pré-perçage.

- le moment plastique caractéristique M_{y,k} (en N.mm), qui s'exprime :

 $M_{y,k} = 180.d^{2,6}$ pour les organes-tige lisses $M_{y,k} = 270.d^{2,6}$ pour les organes-tige à obstacle (ex: clous torsadés) En fait, la résistance caractéristique d'un assemblage dépend de ρ_{ki} , de d, du type d'organe-tige, du type de montage (pré-perçage ou non), de t₁, de t₂, et du type de sollicitation (simple ou double cisaillement).

2.3.2. Abaque de Möller corrigé

Devant la complexité des choix à effectuer pour privilégier un mode de ruine plutôt qu'un autre, la version originale de l'EC5 proposait un abaque sous forme adimensionnelle, dit abaque de Möller.



Figure 6. Abaque de Möller corrigé, pour **b**=1, en simple cisaillement.

Cet abaque permettait de prévoir le mode de ruine, mais la méthode de détermination exprimée en valeurs de calcul R_d a depuis été invalidée. La démarche en valeurs caractéristiques R_k nous a conduits à proposer un abaque de Möller corrigé. Ceci constitue un outil permettant d'orienter le concepteur dans ses choix pour favoriser tel ou tel type de ruine caractéristique.

3. Programme d'étude et conditions d'essai :

Sous sollicitations alternées d'origine sismique, les organes-tige doivent rester parfaitement ancrés au sein des bois assemblés. On doit éviter au maximum la formation de zones plastifiées dans les bois. Les choix conceptuels doivent favoriser l'apparition des ruines de mode 3, et les rotules plastiques formées au sein de l'organe-tige doivent pouvoir se former et se déformer durant les cycles de chargement-déchargement, sans l'apparition de mécanismes au sein de l'assemblage. Ceci nécessite d'adopter une disposition d'organes-tige présentant au moins deux directions de clouage distinctes.

Les qualités recherchées dans les assemblages soumis à des sollicitations dynamiques alternées, sont :

- une ductilité statique élevée (rapport entre la déformation ultime u_u et la déformation élastique u_v de l'assemblage),

- une faible dégradation de la rigidité de l'assemblage sous sollicitations alternées,

- une absorption importante de l'énergie d'origine sismique par déformation plastique de l'assemblage,

- une faible dégradation de la résistance de l'assemblage sous sollicitations alternées.

3.1. Programme d'étude

Les études expérimentales en cours concernent des assemblages à 4 couvrejoints, à organes-tige lisses simplement ou doublement cisaillés comportant deux directions d'organes-tige distinctes (perpendiculaires) afin d'éviter la formation de mécanisme au sein des assemblages après la formation des premières rotules plastiques.



Figure 7. Eprouvette type et machine d'essai de 25kN

3.2. Les conditions d'essai

3.2.1. Les cycles d'étude

Les cycles d'étude ont été effectués à vitesse de déformation contrôlée de 1, 3 ou 9 mm/mn.

Ces cycles de chargement-déchargement ont été réalisés par amplitude croissante et les limites imposées sont, soit des limites en force maximale imposée, soit des limites en déformation maximale imposée.

Assemblage Bois par organes-tiges sous sollicitations alternées 9



Figure 8. 2 cycles en force maximale imposée, suivis de 2 cycles en déformation maximale imposée, et chargement conduisant à la ruine.

3.2.2. Les paramètres d'essai :

La première campagne d'essais a eu pour but de mettre en exergue les paramètres de conception qui permettent de conduire à l'apparition de ruines de mode 3, modes de ruines assurant aux assemblages une tenue correcte sous sollicitations dynamiques.

La deuxième campagne d'essais a eu pour but d'optimiser les assemblages par organe-tige, afin de favoriser un comportement recherché. (Rigidité élevée, faible dégradation au cours des cycles, absorption élevée de l'énergie d'origine sismique,...)

3.2.2.1. Première campagne d'essais

Les paramètres d'essai sont :

- le diamètre des clous et leur type (lisse ou torsadé),
- le type de montage (pré-perçage ou non),
- les pénétrations t₁ et t₂,.
- la masse volumique des bois

3.2.2.2. Deuxième campagne d'essais :

Les paramètres d'essai sont :

- la nature des couvre-joints (bois ou acier),

- la nature de l'organe-tige (clou simplement cisaillé ou axe travaillant en double cisaillement).



Figure 9. Présentation des 30 essais effectués lors de la deuxième campagne.

Les essais de chargement cyclique ont été réalisés en déplacement maximal imposé, avec respectivement 2 cycles de + 0,1/0,2/0,5 et 1 mm, avant un chargement conduisant à la ruine de l'assemblage.

3.3. Exploitation des essais

3.3.1. Première campagne d'essai : assemblages par clous simplement cisaillés

A titre d'exemple, l'exploitation complète d'un essai effectué sur un assemblage comprenant 12 clous lisses de diamètre d = 2,4 mm, assemblés avec pré-perçage, et travaillant en simple cisaillement, est donnée ci-après, figure 10. Le matériau d'assemblage (bambou hmellé-collé) a une masse volumique caractéristique ρ_k de 680 kg/m³, et les pénétrations t₁ et t₂ des organes-tiges sont respectivement de 21 et 29 mm.

Assemblage Bois par organes-tiges sous sollicitations alternées 11



Figure 10. Essai à simple couvre-joint, clous lisses de diamètre 2,4 mm, montés avec pré-perçage : t1 = 21 mm, t2 = 29mm, masse volumique des bois 680 kg/m3

3.3.1.1. En fonction de la ductilité statique :

La ductilité statique μ_s obtenue lors de cet essai est supérieure à 4,6, ce qui laisse présager d'un mode de ruine à prédominance marquée de mode 2 (3 < μ_s < 6).

3.3.1.2. En fonction de l'énergie absorbée par formation de rotules plastiques :

Le tableau ci-dessous donne pour chaque cycle de chargement-déchargement, d'une part l'énergie développée lors de la phase de chargement, et l'énergie absorbée par déformation plastique de l'assemblage.

	W chargement (J)	W absorbée (J)	Wabsorbée (%)
Cycle 1	5,18	3,95	76
Cycle 2	9,09	5,56	61
Cycle 3	7,58	4,79	63
Cycle 4	9,72	6,22	64

Tableau 1. Energie développée au sein de l'assemblage durant chaque cycle

On constate que l'énergie absorbée par la déformation plastique de l'assemblage (donc non transmise au reste de la structure) est relativement importante (de 61 à

76%). De plus, on peut noter une très faible dégradation de l'énergie absorbée par l'assemblage au cours des différents cycles.

3.3.1.3. En fonction de la dégradation de la résistance au cours des cycles de chargement :

Le tableau ci-dessous donne pour chaque cycle, la rigidité K_u de l'assemblage en MN/m.

	Rigidité K _u (MN/m)
Cycle 1	3,26
Cycle 2	3,53
Cycle 3	3,57
Cycle 4	3,62
Cycle 5	3

Tableau 2. Rigidité K_{μ} (MN/m) de l'assemblage

On constate que la rigidité reste sensiblement constante au cours des 4 premiers cycles, et cela même pour des déformations importantes au sein de l'assemblage (cycles 3 et 4 : déformations de + ou – 2 mm). La rigidité moyenne sur l'ensemble des cycles est de 3,4 MN/m, et il faut attendre le dernier cycle conduisant à la rupture pour constater une diminution de l'ordre de 20 % de la rigidité. Néanmoins, la rigidité K_u de l'assemblage reste faible.

3.3.1.4. En fonction de la résistance ultime R_u, par rapport à la résistance de calcul R_d :

La résistance ultime R_u de l'assemblage est de 13 kN. Compte-tenu des hypothèses faites pour l'assemblage, à savoir :

- 12 clous lisses de diamètre 2,4 mm, assemblés avec pré-perçage, travaillant en simple cisaillement.

- épaisseur des bois assemblés et pénétration de l'organe-tige : $t_1 = 21 \text{ mm}$ et $t_2 = 29 \text{ mm}$,

- masse volumique des bois : $\rho_k = 680 \text{ kg/m}^3$,

- taux d'humidité des bois < 12 %,

- actions appliquées de type instantané (actions sismiques).

On peut déterminer l'ensemble des résistances caractéristiques R_k de l'assemblage/ par organe-tige, correspondant respectivement aux 3 modes possibles de ruine. (Vérifications effectuées selon les prescriptions de l'Eurocode 5)

Avec :

Portance locale caractéristique des matériaux assemblés : $f_{h,1,k} = f_{h,2,k} = 54,4$ N/mm². $\beta = f_{h,2,k}/f_{h,1,k} = 1$ Moment plastique caractéristique de l'organe-tige : My,k= 1753 N.mm.

Ruines de mode 1 :	Ruines de mode 2 :	Ruine de mode 3
$- R_{k1a} = 1349 N$	$- \mathbf{R}_{k2a} = 1096 \text{ N}$	$-R_{k3} = 744 \text{ N}$
$- R_{k1b} = 2743 N$	$- \mathbf{R}_{k2b} = 1410 \text{ N}$	
$-R_{k1c} = 3659 N$		

La ruine caractéristique R_k à retenir est donc la ruine de mode 3, avec $R_{k3} = 744$ N/organe-tige. L'assemblage comprenant 12 organes-tige, sa résistance caractéristique totale est donc de 8,93 kN.



Figure 11. Prédiction de la résistance caractéristique de mode 3, à l'aide de l'abaque de Möller modifié.

La détermination des résistances de calcul $R_{\rm d}$ /par organe-tige conduit à : - pour les ruines de mode 1 :

 $\begin{array}{ll} R_d = K_{mod} * R_k / \ensuremath{\gamma_M} & avec : K_{mod} = 1,1 \mbox{ (classe de service 1) } et \ensuremath{\gamma_M} = 1,3 \\ \mbox{- pour les ruines de mode 2 :} \\ R_d = K_{mod} * R_k / \ensuremath{\gamma_M} & avec : K_{mod} = 1,1 \mbox{ (classe de service 1) } et \ensuremath{\gamma_M} = 1,2 \\ \mbox{- pour la ruine de mode 3 :} \\ R_d = R_k / \ensuremath{\gamma_M} & avec : \ensuremath{\gamma_M} = 1,1 \end{array}$

Ruines de calcul 1	mode 1 : Ruines de calcul mode 2 :	Ruine de calcul mode 3 :
$-R_{d1a} = 1141 \text{ N}$	$- R_{d2a} = 1004 N$	$- R_{d3} = 677 N$
$-R_{d1b} = 2321 N$	$- R_{d2b} = 1292 N$	
$-R_{d1a} = 3096 \text{ N}$		

La ruine de calcul R_d à retenir est donc la ruine de mode 3, avec $R_{d3} = 677 \text{ N/organe-tige}$. L'assemblage comprenant 12 organes-tige, sa résistance de calcul totale est donc de 8124 N. Or, la résistance ultime R_u est de 13 kN, ce qui conduit à un coefficient de 1,6 pour le rapport R_u/R_d .



Figure 12. Ruine de mode 3, obtenue dans du bambou lamellé-collé et des organestige lisses simplement cisaillés

La première campagne d'essais concemant les assemblages à organes-tige cisaillés sous sollicitations dynamiques alternées a permis de cerner les paramètres de conception fondamentaux qui permettent d'obtenir une faible dégradation de la résistance des assemblages, associée à des ruines de mode 3, caractérisées par une absorption importante d'énergie par formation de rotules plastiques au sein de l'organe-tige. Néanmoins, les rigidités d'assemblage restent modérées (quelques MN/m) mais sensiblement constantes durant les cycles de charge-décharge.

Les dispositions constructives qui favorisent l'apparition de ruines de mode 3 sont :

- l'utilisation d'organes-tige de type lisse, et de diamètre réduit, assemblés après pré perçage des bois.

- une disposition constructive interdisant les mécanismes, par l'adoption d'au moins deux directions distinctes d'organes-tige.

- l'utilisation de bois denses ayant une masse volumique caractéristique élevée.

- l'adoption de pénétrations d'organes-tige importantes. A noter que la valeur minimale de 8 fois le diamètre de l'organe-tige pour t₂ prescrite par l'Eurocode 5, pour des assemblages courants, apparaît comme très insuffisante dans le cas des assemblages sollicités de manière alternative, car malgré l'apparition de ruine de type 3, la valeur de la ductilité statique reste < 6 ($\mu_s > 4,6$ malgré une pénétration t₂ de 12 fois le diamètre d).

3.3.2. Deuxième campagne d'essai : Influence de la nature du couvre-joint et de la nature de l'organe-tige.

Durant cette campagne d'essais, on s'est intéressé à l'étude de l'influence de ces 2 paramètres de conception, sur le comportement mécanique de l'assemblage sous sollicitations alternées. L'ensemble des 30 essais réalisés est rappelé dans le tableau suivant :

Couvre-	Assemblage par clous	Assemblage par Axes
joint	simplement cisaillés	doublement cisaillés
	12 essais monotones avec des	6 essais (3 monotones et 3
BOIS	clous lisses (L) ou crantés (C), de	cycliques) avec des axes filetés
	diamètre d (2,4 - 3 et 4 mm),	(F) de diamètre $d = 4$ mm,
	montés avec pré-perçage (PP), de	assemblés dans des bois de
	longueur 50 ou 70 mm, assemblés	masse volumique caractéristique
	dans des bois de masse	ρ_k (512, 612, et 680 kg/m ³).
	volumique caractéristique ρ_k	
	$(512, 612, \text{et } 680 \text{ kg/m}^3).$	
	6 essais (3 monotones et 3	6 essais (3 monotones et 3
ACIER	cycliques) avec des clous lisses	cycliques) avec des axes filetés
	(L) de diamètre $d = 3$ mm,	(F) de diamètre $d = 4$ mm,
	assemblés dans des bois de	assemblés dans des bois de
	masse volumique caractéristique	masse volumique caractéristique
	ρ_k (512, 612, et 680 kg/m ³).	ρ_k (512, 612, et 680 kg/m ³).

Tableau 3. Synoptique des 30 essais réalisés lors de la deuxième campagne.

3.3.2.1. En fonction de la ductilité statique μ_s :

Tous les essais effectués avec des clous simplement cisaillés donnent des ductilités statiques relativement faibles (valeur moyenne : 5,6), quel que soit le type de couvre-joint, avec toutefois une grande dispersion en ce qui concerne les essais à couvre-joint bois. Les paramètres de conception favorisant les valeurs les plus élevées de la ductilité statique, sont :

- l'adoption de diamètre d d'organe-tige, faible.
- une pénétration t_2 dans le bois, élevée. (Rapport t_2/d au moins égal à 12)

L'utilisation de clous crantés assure une meilleure tenue de l'assemblage au cours des cycles, mais inversement, facilite l'obtention de ruines de mode 2 ou 1 qui se caractérisent par l'apparition de zones plastiques au sein des bois.



Figure 13. Essai avec clous lisses simplement cisaillés (à gauche : $\mathbf{m} = 4,1$), et essai avec axes doublement cisaillés (à droite : $\mathbf{m} = 21,8$). Masse volumique caractéristique des bois : 612 kg/m³

Tous les essais effectués avec des axes doublement cisaillés conduisent à des ruines de mode 3 très marqué (μ_s moyen de l'ordre de 15, quel que soit le type de couvre-joint).

3.3.2. 2. En fonction de la rigidité K_u de l'assemblage, sous chargement statique :

Tous les essais réalisés avec des couvre-joints en acier conduisent à des rigidités d'assemblage K_u élevées, sous chargement monotone ($K_{u moyen}$ de l'ordre de 19 MN/m).

Couvre- joint	Assemblage par clous simplement cisaillés	Assemblage par Axes doublement cisaillés
BOIS	$4 < K_u (MN/m) < 12,3$ Bois	$1,8 < K_u (MN/m) < 7,2$
	$16,6 < K_u (MN/m) < 32,9 Bambou$	
ACIER	$14,4 < K_u (MN/m) < 19,9$	$17 < K_u (MN/m) < 22,5$



Les plus faibles rigidités sont obtenues dans le cas d'assemblages à couvrejoints en bois et à axes doublement cisaillés ($K_{u moyen}$ de l'ordre de 3,6 MN/m).

Pour les assemblages à couvre-joints en bois et à organe-tiges simplement cisaillés de très grandes dispersions de rigidité sont observées, et seuls les assemblages réalisés avec un matériau à fibres longues (bambou) conduisent à des rigidités élevées ($K_{u moyen}$ de l'ordre de 23 MN/m).

3.3.2.3. En fonction de l'évolution de la rigidité K_u de l'assemblage, au cours des cycles de chargement-déchargement :



Figure 14. Essai avec clous lisses simplement cisaillés (à gauche : $K_{u \ moyen} = 16, 1$ MN/m), et essai avec axes doublement cisaillés (à droite : $Ku_{moyen} = 8, 7$ MN/m). Masse volumique caractéristique des bois : 512 kg/m³, et couvre-joints acier.

Tous les essais réalisés avec des couvre-joints en acier conduisent à des rigidités d'assemblage K_u élevées, sous chargement alterné (tableau n° 5). Les meilleurs comportements sont obtenus avec les organe-tiges travaillant en simple cisaillement (s.c.) où la dégradation de la rigidité est la plus faible, et ceci, quelle que soit la masse volumique caractéristique des bois assemblés (division de la rigidité de l'ordre de 2)

a - Essai 520 (clous s.c.)	$K_{u \text{ monotone}} = 19,8 \text{ MN/m}$	$\mu_{\rm s} = 6,6$
Cycle d'amplitude (+- mm)	K _u (MN/m)	W absorbée (%)
0,1	23,8	59
0,2	18,6	64
0,5	12,5	70
1	9,6	71
Valeur moyenne	16,1	66
	,	
b - Essai 523 (axes d.c.)	$K_{u \text{ monotone}} = 22,5 \text{ MN/m}$	$\mu_{\rm s} = 10,5$
b - Essai 523 (axes d.c.) Cycle d'amplitude (+- mm)	$K_{u \text{ monotone}} = 22,5 \text{ MN/m}$ $K_u (\text{MN/m})$	$\mu_s = 10,5$ W absorbée (%)
b - Essai 523 (axes d.c.) Cycle d'amplitude (+- mm) 0,1	$K_{u \text{ monotone}} = 22,5 \text{ MN/m}$ $K_{u} (\text{MN/m})$ 14,2	$\begin{array}{l} \mu_s = 10{,}5\\ W \ absorbée \ (\%)\\ 80 \end{array}$
b - Essai 523 (axes d.c.) Cycle d'amplitude (+- mm) 0,1 0,2	$K_{u \text{ monotone}} = 22,5 \text{ MN/m}$ $K_{u} (\text{MN/m})$ 14,2 9,8	μ _s = 10,5 W absorbée (%) 80 75
b - Essai 523 (axes d.c.) Cycle d'amplitude (+- mm) 0,1 0,2 0,5	$K_{u \text{ monotone}} = 22,5 \text{ MN/m}$ $K_{u} (\text{MN/m})$ 14,2 9,8 6,2	μ _s = 10,5 W absorbée (%) 80 75 78
b - Essai 523 (axes d.c.) Cycle d'amplitude (+- mm) 0,1 0,2 0,5 1	$K_{u \text{ monotone}} = 22,5 \text{ MN/m}$ $K_{u} (\text{MN/m})$ 14,2 9,8 6,2 4,7	μ _s = 10,5 W absorbée (%) 80 75 78 78 76

Tableau 5. Essai avec clous lisses simplement cisaillés (a), et essai avec axes doublement cisaillés (b). Masse volumique caractéristique des bois : 512 kg/m³, et couvre-joints acier.

3.3.2.4. En fonction de l'énergie W absorbée au cours des cycles

Toutes les configurations d'essais utilisées, conduisent à un pourcentage d'énergie absorbée par l'assemblage importante. Les valeurs élevées obtenues, qui sont dans tous les cas bien supérieures à celles observées dans la littérature, sont essentiellement dues à l'adoption systématique d'organes-tiges travaillant au cisaillement suivant au moins deux axes distincts, afin d'éviter l'apparition de mécanismes au sein de l'assemblage, dès la fin du premier cycle de chargement. Une telle disposition constructive oblige chaque organe-tige à absorber de l'énergie à chaque cycle, par déformation plastique (tableau 5).

On veillera toutefois, à favoriser les dispositions constructives qui, tout en évitant les risques de ruptures fragiles, permettent aux assemblages d'avoir d'une part, un comportement élastique fortement marqué sous de faibles sollicitations, et d'autre part, un comportement élasto-plastique fortement marqué sous des sollicitations correspondant à des séismes de fortes amplitudes lors desquels on accepte des déformations importantes et des absorptions d'énergie conséquentes au niveau des assemblages (figure 15).



Essai 522	$K_{u \text{ monotone}} = 19,9 \text{ MN/m}$	$\mu_{s} = 6,2$
Cycle d'amplitude (+- mm)	K _u (MN/m)	W absorbée (%)
0,1	21,8	28
0,2	19,3	57
0,5	15,3	58
1	13,9	60
Valeur moyenne	17,6	50,7

Figure 15. Essai avec clous lisses simplement cisaillés et couvre-joints acier. Masse volumique caractéristique du bambou : 680 kg/m³

Les essais réalisés avec des axes filetés travaillant en double cisaillement et des couvre-joints en bois ont permis d'atteindre les absorptions d'énergie les plus élevées (figure 16), mais d'une part, le comportement élasto-plastique de l'assemblage survient même pour de faibles niveaux de sollicitation, et d'autre part, ceci s'accompagne d'une dégradation importante de sa rigidité au cours des cycles de chargement-déchargement.



Essai 514	$K_{u \text{ monotone}} = 18 \text{ MN/m}$	$\mu_{\rm s} = 8,1$
Cycle d'amplitude (+- mm)	K _u (MN/m)	W absorbée (%)
0,1	15,8	70
0,2	8,6	88
0,5	4,7	94
1	2,8	95
Valeur moyenne	8	86,7

Figure 16. Essai avec axes filetés doublement cisaillés et couvre-joints bois. Masse volumique caractéristique du bois : 512 kg/m³

4. Conclusion

4.1. Bilan des études effectuées

La première campagne d'essais concernant les assemblages à organes-tige cisaillés sous sollicitations dynamiques alternées a permis de cerner les paramètres de conception fondamentaux qui permettent d'obtenir d'une part, des rigidités élevées d'assemblage et d'autre part, une faible dégradation de sa résistance associée à une absorption importante d'énergie par formation de rotules plastiques au sein de l'organe-tige.

Les dispositions constructives qui favorisent l'apparition de ruines de mode 3 sont :

- l'utilisation d'organes-tige de type lisse, et de diamètre réduit, assemblés après pré perçage des bois.

- une disposition constructive interdisant les mécanismes, par l'adoption d'au moins deux directions distinctes d'organes-tige.

- l'utilisation de bois denses ayant une masse volumique élevée.

- l'adoption de pénétrations d'organes-tige importantes. A noter que la valeur minimale de 8 fois le diamètre de l'organe-tige pour t₂ prescrite par l'Eurocode 5, pour des assemblages courants, apparaît comme très insuffisante dans le cas des assemblages sollicités de manière alternative, car malgré l'apparition de ruine de type 3, la valeur de la ductilité statique reste <6 (μ_s = 4,6 malgré une pénétration t₂ de 12 fois le diamètre d).

- à noter que l'utilisation d'organe-tiges crantés favorise la faible dégradation de la rigidité de l'assemblage au cours des cycles de chargement, mais favorise l'apparition de ruines de type 2, ce qui conduit à une dégradation plus rapide d'un des deux bois assemblés.

La deuxième campagne d'essais concernant les assemblages à organes-tige cisaillés sous sollicitations dynamiques alternées a été menée en s'intéressant à l'incidence de deux groupements de paramètres, à savoir :

- l'influence du type de cisaillement (simple ou double cisaillement)

- l'influence du type de couvre-joint (bois ou acier).

Les 36 essais réalisés ont permis de cerner les paramètres de conception suivants :

- <u>En fonction de la ductilité statique</u> : Les meilleurs comportements sont obtenus avec les organes-tige de type axe. Quel que soit le type de couvre-joint, on obtient des ductilités statiques de l'ordre de 15, conduisant à des ruines de type 3 fortement prononcées. Ceci conduit à un bon comportement des assemblages sous sollicitations cycliques, avec un bon ancrage des organes-tiges au sein des bois.

- <u>En fonction de la rigidité $K_{\underline{u}}$ des assemblages</u> : Les rigidités $K_{\underline{u}}$ les plus élevées sont obtenues avec les organes-tige travaillant en simple cisaillement et avec les

couvre-joints acier ($K_u = 15$ MN/m au lieu de 8 avec les axes et couvre-joints bois). A noter que tous les essais réalisés avec des couvre-joints de type acier conduisent à des rigidités élevées d'assemblage.

- <u>En fonction de la dégradation de la rigidité au cours des cycles de chargement</u> : De même, la diminution de rigidité est plus faible au cours des cycles, avec ce groupement de paramètres (réduction d'un rapport de 2 entre le premier et le dernier cycle, au lieu d'une réduction de l'ordre de 4)

- En fonction de l'énergie absorbée par formation de rotules plastiques : Les meilleurs comportements des assemblages sont obtenus avec les couvre-joints de type bois, et avec les organes-tige de type axe. En effet, dans ce cas, le pourcentage d'énergie absorbée atteint les 85 % (au lieu de 60 %) et ce pourcentage reste élevé au cours des différents cycles pratiqués. Néanmoins, le comportement élasto-plastique de l'assemblage apparaît dès les premiers cycles, de faible amplitude. Afin d'éviter des ruines par fatigue, il est préférable de choisir des paramètres de conception qui conduisent d'une part, à un comportement élastique de l'assemblage sous de faibles niveaux de sollicitation, et qui d'autre part permettent l'absorption d'énergie d'origine sismique pour de forts niveaux de sollicitations, niveaux pour lesquels on peut accepter des déformations importantes d'assemblages dans la mesure où il n'y a pas de risque de ruine par rupture fragile. Les meilleurs comportements ont été obtenus avec les assemblages à organe-tige travaillant en simple cisaillement, et avec des couvre-joints en acier et notamment avec les matériaux fibreux ayant les plus grandes masses volumiques caractéristiques ρ_k (cas du bambou, avec $\rho_k = 680 \text{ kg/m}^3$). Ce groupement de paramètres permet également d'obtenir des ductilités statiques $\mu_s > 6$, garantissant la formation de rotules plastiques propres au mode de ruine n°3, et conduit à des assemblages à forte rigidité K_u, et l'altération de la rigidité au cours des cycles de chargement restant relativement faible.

4.2. Perspectives d'études

Les essais réalisés avec les organes-tige sollicités en cisaillement donnent des résultats encourageants, d'une part au niveau des ductilités statiques élevées obtenues, et d'autre part, au niveau de l'énergie absorbée par déformation plastique de l'organe-tige. Par contre, les rigidités ultimes des assemblages de type axe sont à améliorer par l'utilisation d'axes lisses parfaitement ajustés. La poursuite des travaux sera orientée dans cette direction, en étudiant le comportement des assemblages d'une part, sous un nombre plus élevé de cycles, et d'autre part sous des niveaux de cycles plus différenciés.

La poursuite des essais devrait permettre d'étudier :

- l'incidence de la vitesse de chargement-déchargement ce qui peut être fondamental dans le cas de sollicitations d'origine sismique, la gamme des vitesses actuellement explorée n'étant pas suffisamment significative (de 1 à 9 mm/mn).

- l'optimisation de la disposition des organes-tige en multipliant leurs directions, afin de ne pas avoir au sein de l'assemblage de centre instantané de rotation unique.

- la qualité requise des bois, au-delà de la nécessité d'utiliser des bois de masse volumique élevée. En effet, les meilleurs comportements observés concernent le matériau bambou qui est un matériau fibreux à fibres longues.

- de conduire à des essais de qualification de cadres d'ossatures bois, qu'il s'agisse de cadres contreventés en K, ou de cadres de type voile.

Remerciements

Ce travail constitue une analyse comparative menée sur trois années de travaux de projets de fin d'études d'étudiants de l'I.U.T. génie civil de Nîmes. Les auteurs remercient ces étudiants pour leur contribution et la rigueur apportée lors de la réalisation des essais.

5. Bibliographie

- Rilem Technical Committees 109-TSA, "Behaviour of timber structures under seismic actions", Materials and structures, n° 27, pp. 157-184, 1994.
- EUROCODE 5, Calcul des structures en bois Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments, 1995.
- *Construction bois : Calcul des structures en bois.* Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments, Editions Eyrolles, Paris, 1996.
- STEP1, Structures en bois en états limites Matériaux et bases de calcul, tome 1, SEDIBOIS, 1996.

« Rapport final du programme de recherche Européen C.O.S.T », 1997.

- STEP2, Structures en bois en états limites Calcul de structures, tome 2, SEDIBOIS, 1997.
- EUROCODE 8, Conception et dimensionnement des structures pour la résistance aux séismes, document d'application nationale, 1998.