



*Dr. Patrick Racher
Département Génie Civil
CUST Univ. Blaise Pascal
Clermont-Ferrand, France*

Eléments mixtes dans les structures bois : Assemblages Bois-Métal et planchers Bois-Béton

Les éléments de structures bois mixtes : Assemblages Bois-Métal et planchers Bois-Béton

Introduction

Jusqu'à une date récente, les réalisations courantes mettaient en oeuvre des pièces massives, parfois des troncs d'arbres, sans calcul spécifique. Les métiers de la charpente bois s'appuyaient sur la transmission des connaissances (et des règles de l'Art) entre générations. Cette approche se traduisait généralement par des constructions assez largement surdimensionnées. L'évolution actuelle de la société a induit progressivement une maîtrise des coûts de construction, liée à une meilleure connaissance du matériau constitutif de l'ouvrage et aux nouvelles techniques de production ou de réalisation. Ceci est particulièrement vrai pour les structures en bois où un important effort a été accompli durant ces vingt dernières années. En terme de conception, ces évolutions se traduisent par l'emploi croissant d'éléments mixtes au sein des constructions bois :

Les assemblages bois-métal pour des critères de performance et d'esthétique,
Et les planchers bois-béton.

Dans le premier cas, il s'agit d'un thème clé pour le secteur bois-construction. Leur maîtrise progresse continûment en concert avec l'évolution des techniques constructives. La conception des assemblages constitue LA phase qui offre des horizons créatifs immensément plus étendus que dans tous les autres secteurs de la construction.



Figure 1: Liaison de pied d'arc (Nouméa, 1995)

Avec l'évolution des techniques, de nouvelles règles établissent des bases solides pour mieux utiliser la ressource et promouvoir la construction en bois. Elles permettent une analyse tant mécanique qu'économique pour une fiabilité requise.

Un bref rappel permet de préciser les différents facteurs qui conditionnent la conception des liaisons par broches ou boulons. Les règles de calcul sont décrites pour établir la capacité résistante

unitaire et la raideur d'assemblage. Cette approche est complétée par les justifications globales des liaisons au sein des ouvrages en bois ainsi que leur modélisation en calcul des structures.

Le second aspect de la mixité au sein des structures bois correspond aux planchers bois-béton. Ils suscitent un intérêt grandissant de par le gain de poids par rapport à un plancher béton et l'approche environnementale de la construction. Cette technique présente un fort potentiel d'emploi notamment dans le secteur de la réhabilitation.

Différents systèmes permettent de combiner la résistance en compression du béton et celle en traction du bois. Le comportement local de la connexion et global de planchers expérimentaux sont présentés.



Figure 2: Plancher Lignalithe

Ces études permettent une approche simplifiée en terme de conception. Pour conclure, une approche du comportement dynamique est abordée. Ce point est important, notamment en France, pour le développement de l'utilisation de ces planchers.

1. Assemblages bois-métal

Pour une structure donnée, la sélection d'un mode d'assemblage ne résulte pas seulement des conditions de sollicitation et de résistance. Ce choix doit tenir compte des spécificités d'un projet telles que les aspects architecturaux, le coût de la structure et le procédé de fabrication. La méthode d'exécution et les préférences du concepteur interviennent également dans cette phase.



Figure 3: Arc treillis (Lisbonne, 1998)

Une technique de plus en plus courante correspond à la réalisation d'assemblages mécaniques à l'aide de plaques métalliques internes et d'organes de type tige (pointes, boulons ou broches). Ils mobilisent un mode de transmission par insertion. Le fonctionnement de ces organes est analogue à celui d'une poutre sur appuis élastiques. Ainsi, le comportement du bois en portance locale et le comportement en flexion des organes conditionnent le transfert d'effort. Ce fonctionnement local est fortement conditionné par la géométrie de la liaison et les tolérances de fabrication.

Pour les liaisons bois-métal avec des plaques d'épaisseur $t_s \leq d$, la résistance par plan de cisaillement est alors :

$$\text{Plaque centrale : } R_d = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_m} \min \left[\begin{array}{l} f_{h,1} t_1 d \\ f_{h,1} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,k}}{f_{h,1} t_1^2 d}} - 1 \right] \\ 2,2 \sqrt{M_{y,k} f_{h,1} d} \end{array} \right]$$

$$\text{Plaques latérales (} t_s \leq d \text{): } R_d = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_m} \min \left[\begin{array}{l} 0,5 f_{h,2} t_2 d \\ 1,1 \sqrt{2 M_{y,k} f_{h,2} d} \end{array} \right]$$

avec : f_h , la résistance en portance locale du bois
 M_y , le moment plastique de la broche ou du boulon.

Suivant les démarches traditionnelles, une première voie consiste à considérer l'effet des interactions au sein des assemblages sur la distribution des efforts entre organes. Cette approche se traduit en terme de nombre efficace d'organes de liaison. Pour des assemblages sollicités en double cisaillement, la capacité résistante d'un assemblage comportant n boulons ou broches en ligne est alors définie par :

$$R_{n,d} = n_{\text{ef}} R_d \quad \text{avec} \quad n_{\text{ef}} = n^{0,9} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13 d}}$$

où a_1 est l'espacement longitudinal des organes.

Globalement, ces différentes relations correspondent à une réduction de 5% par organe, soit $n_{\text{ef}} = n(1-0,05n)$.

Avec la mise en oeuvre d'assemblage compact ou d'un grand nombre d'organes, la résistance au déchirement des éléments peut conditionner la capacité résistante de la liaison. Pour un groupe d'organes, cette rupture de bloc met en jeu les résistances en cisaillement et

en traction sur des plans perpendiculaires. Ces plans schématisent les zones de concentration de contraintes induites par les différentiels de raideur au sein d'une liaison. La figure 4 illustre les deux grandes familles de rupture de bloc pour les assemblages bois .

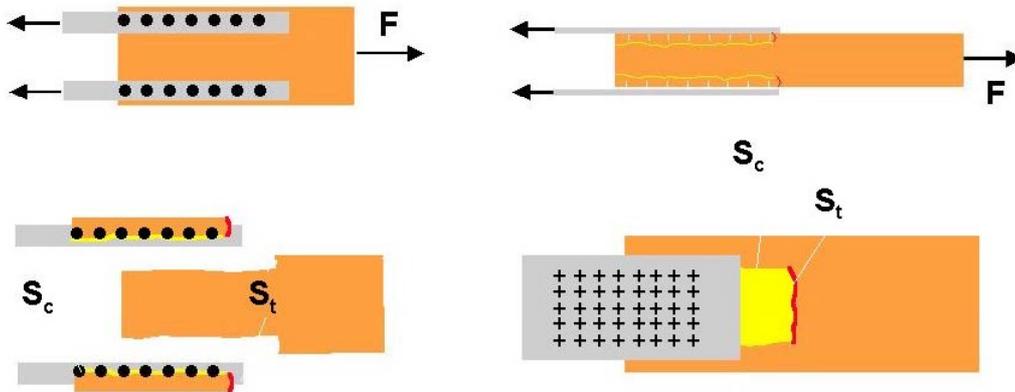


Figure 4 - Rupture de bloc dans les assemblages: (a) rupture en traction sur la surface nette S_t , (b) rupture en cisaillement de la surface nette S_c .

Dans le cas de matériau fragile en cisaillement et en traction tel que le bois, ce mode de ruine est séquentiel avec une rupture initiée sur le plan le plus résistant. De plus, la résistance des deux plans résistants ne peut pas être cumulée.

La capacité résistante de la liaison est alors établie en considérant les sections nettes en cisaillement S_c et en traction S_t :

$$R_{bloc,d} = \text{Max} [S_t f_{t,0,d} ; S_c 0,75f_{v,d}]$$

Ce nouveau critère a fait l'objet d'une validation dans le cadre de la construction de l'une des plus importante structures bois en Europe : le Pavillon de l'Utopie à Lisbonne (Perrin et al, 1998).

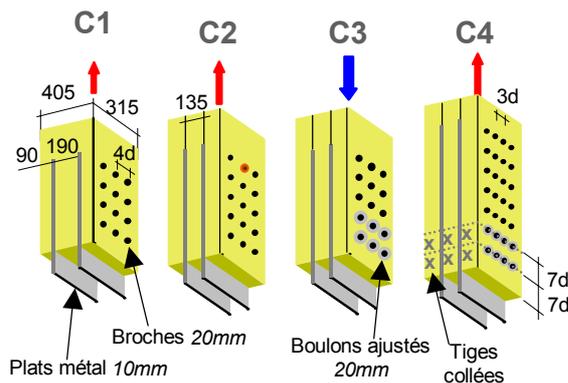


Figure 5 – Assemblages bois-métal testés.

La figure 5 présente certains des assemblages testés par l'axe Génie Civil du C/U/S/T/. La capacité résistante des liaisons a été évaluée en traction et en compression parallèle au fil du bois.

Les éléments testés ont une longueur de 3,5 m, une largeur de 405 mm et une hauteur de 315 mm. Ils sont produits par contre-collage de deux (C1) ou trois (C2, to C4) éléments en bois lamellé-collé GL28h (EN1194). Les broches et les boulons sont de classe 6.8. Pour les essais, les plats métalliques ont une limite élastique minimale de 660N/mm².

Les essais ont été réalisés sur la dalle d'essais du C/U/S/T/ dont la capacité est d'environ 1,2 MN.m. Après étalonnage, un bras de levier permet d'atteindre un niveau de chargement supérieur à 3 MN.



Figure 6 – Dispositif d'essais en traction.

La figure 6 présente l'ensemble du dispositif expérimental. Les essais sont effectués selon la norme EN26891.

Après essai, le taux d'humidité et la densité apparente sont mesurées pour chaque pièce lamellé-collée :

$$H_{\text{moy}} = 11,5\%,$$

$$\rho_{\text{moy}} = 460\text{kg/m}^3$$

et $\rho_k = 415\text{kg/m}^3$.

Cette dernière valeur est en accord avec la norme EN1194 pour la classe GL28h. En complément, la qualité des broches et boulons est contrôlée par des essais de traction. Ils se traduisent par une résistance moyenne en traction égale à 670 N/mm^2 .

L'un des objectifs de cette expérimentation est d'évaluer l'influence de la configuration géométrique générale de l'assemblage sur son comportement. La liaison C1 constituant la configuration de base, les broches ont une longueur réduites dans le cas des assemblages C2 et C3 pour répondre aux exigences incendie. Dans le cas de la série C4, 8 tiges filetées collées sont mises en oeuvre pour renforcer la liaison.

L'un des objectifs de cette expérimentation est d'évaluer l'influence de la configuration géométrique générale de

l'assemblage sur son comportement. Le comportement Effort-Glisement et le mode de rupture sont enregistrés. La figure 7 décrit l'allure générale des courbes obtenues pour chaque série. Elle montre que les assemblages testés présentent un comportement ductile seulement dans le cas de sollicitation en compression.

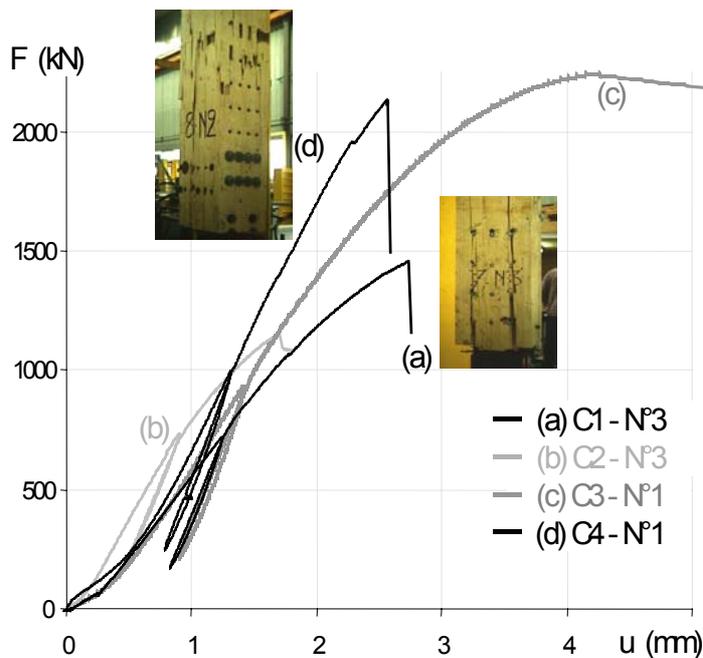


Figure 7 – Comportement des liaisons testées.

Tous les spécimens atteignent un mode de rupture résultant d'un cisaillement de file ou d'une rupture de bloc. Ce dernier mode est observé en cisaillement ou en traction dans le cas de la série C4. De plus, les essais ont montré que la résistance en cisaillement de bloc peut gouverner les assemblages sollicités en compression.

Dans le cas d'assemblages en cisaillement multiple, cette expérimentation révèle que la rupture de bloc peut se développer sur la totalité de l'élément assemblé ou sur une section partielle. Le mode de chargement et la configuration des éléments bois sont des facteurs importants.

Tableau 1
Comparaison des capacités résistantes mesurées et calculées (MN).

<i>Assemblage</i>		<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>
<i>Essais</i>	$R_{m, Exp}$	1,33	1,20	2,18	2,11
	$R_{k, Exp}$	1,06	0,96	1,83	1,66
<i>Rupture de bloc</i>	$R_{k, Block}$	1,31	1,03	1,61	1,46
<i>Résistance unitaire</i>	$R_{k,1}$	0,105	0,108	0,108 / 0,118	
<i>Capacité totale</i>	$R_{k, n}$	1,26	1,51	1,68	3,11
<i>Capacité effective</i>	$R_{k, ef}$	0,94	1,21	1,34	2,40

D'un point de vue dimensionnement, ces résultats montrent l'importance du critère de rupture de bloc pour les assemblages ayant un grand nombre d'organes en ligne. Au-delà de 5 boulons ou broches en ligne, la rupture de bloc est la condition prépondérante pour des assemblages comportant plusieurs lignes.

2. Planchers bois-béton

Dans les structures bois, les planchers constituent une seconde catégorie de composants au sein de laquelle la notion d'éléments composites se développe.

La construction mixte a connu son essor au milieu du 19^{ème} siècle. Actuellement, les tendances conceptuelles accordent un intérêt croissant à l'association de différents matériaux. Cette approche vise à optimiser l'utilisation de chacun des matériaux mis en oeuvre au regard de critères économiques, esthétiques ou mécaniques. Même si la préférence va à l'association du béton et de l'acier, la nouvelle loi sur l'air en France et les dispositions environnementales prises en Europe encouragent le développement de structures associant le bois et le béton.

Pour les planchers, la combinaison du béton en compression et du bois en traction crée un ensemble répondant aux exigences de la construction contemporaine. Tout en intégrant des qualités esthétiques, il est en effet possible d'obtenir des éléments mixtes mécaniquement efficaces, rigides et légers. Ainsi, l'utilisation de planchers bois-béton permet une réduction d'environ 40% des charges permanentes par rapport à une solution traditionnelle en béton. Ces atouts permettent d'envisager un vaste domaine d'emploi notamment dans le secteur de la réhabilitation.

(a)



(b)



Figure 8 – Section (a) et éléments (b) composites.

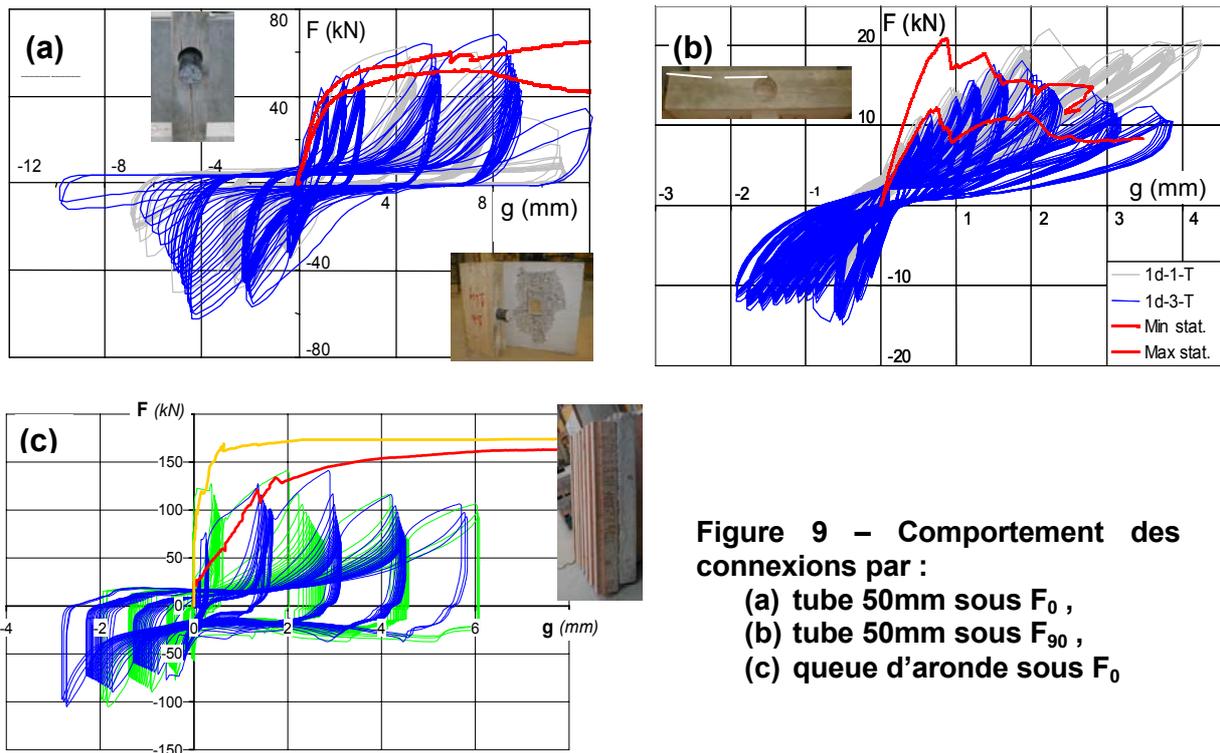
Parmi les produits développés en France, il faut distinguer sur le plan mécanique :

- Les sections composites constituant des produits tels que le plancher Lignadalle (figure 8-a),
- Et les éléments mixtes comme le plancher Sylvabat (figure 8-b).

La compétitivité de ces différentes technologies requiert la maîtrise de leur comportement mécanique sous sollicitations statiques et dynamiques. Dans ce cadre, les travaux réalisés au C/U/S/T/ abordent le comportement de ces systèmes bois-béton de l'échelle locale de la connexion jusqu'à l'échelle globale des planchers. L'objectif vise à élargir le marché po-

tentiel de ce procédé de construction quelque soit la sismicité du site (par exemple, la région alpine).

Dans une première approche, le comportement local de la connexion doit être caractérisé pour des sollicitations longitudinales ou transversales, statiques ou dynamiques. D'une largeur de 60 cm, les éprouvettes comportent une connexion par tube ou 7 queues d'aronde en béton. Les essais statiques sont effectués selon la norme EN26891. Pour le cas de sollicitations dynamiques alternées, la norme EN 12152 est modifiée en intégrant 20 cycles par palier de déformation. Cette approche est retenue afin de permettre le développement des mécanismes induits par la perte de cohésion interne du béton. Pour les deux systèmes, la figure 9 présente les comportements enregistrés et les modes de rupture observés. Pour une connexion par tube (figures 9-a et 9-b), les mécanismes correspondent à une fissuration du bois sous sollicitations statiques et à une désagrégation du béton dans le cas d'efforts dynamiques. Dans le cas d'une liaison uniquement par queues d'aronde, le frottement bois-béton conditionne la rupture pour les deux modes de sollicitation.



Le tableau 3 résume les mesures de résistance et de raideur statiques. Pour une connexion tubulaire, il existe un rapport de 0,3 entre les capacités résistantes dans la direction transversale et longitudinale.

Tableau 2
Raideurs et résistances
statiques des connexions.

Type	Effort	f_{c28} (MPa)	K (kN/mm)	F_{max} (kN)	g_u (mm)
Tube D=50mm – C24 ancrage 40mm	C_0	26,4	28,2	60	11
	C_{90}		23,5	16,2	1
Tube D=50mm– GL24 ancrage 40mm	C_0	26,4	39,5	61	9
	C_{90}		28,0	21,7	1
Tube D=70mm– GL24 ancrage 70mm	C_0	26,4	38,5	75	9
	C_{90}		40,0	27	1
7 queues d'aronde C24	C_0	32	150	190	1,5
	C_{90}		220	210	1

Suite aux essais cycliques, il est à noter que la perte de résistance durant une séquence de 20 cycles est très faible jusqu'à un seuil égal à 40% de la résistance statique. Au-delà, la réduction d'effort par séquence est inférieure à 20%.

En complément de cette analyse locale, le comportement dynamique de ces systèmes bois-béton a été abordé à l'échelle 1. Afin de limiter les effets de bord résultant des phénomènes de flexion transversale, les planchers testés comportent :

- Pour le procédé Sylvabat, 4 poutres espacées de 1,20m et connectées à une dalle de 7cm d'épaisseur,
- Et, dans le cas du système Lignadal, 3 prédalles bois de 1,20m de large.



Figure 10 – Essai de plancher

Pour chaque système, trois essais ont été réalisés avec différentes configurations.

La portée des planchers est égale à 5,88m entre axes d'appuis. Un cadre articulé en tête de vérin permet la répartition transversale des efforts (Figure 10).

Le mode de chargement s'effectue en déplacement contrôlé selon un signal ondulé d'amplitude croissante et de minimum constant.

Considérant le plancher Sylvabat N°1, il a été dimensionné pour une charge d'exploitation statique égale à 250 daN/m².

A partir des éprouvettes prélevées lors du bétonnage, les caractéristiques du béton ont pour valeurs moyennes : $f_{c28} = 31\text{Mpa}$ et $f_{t28} = 2,7\text{Mpa}$. De même, le module d'élasticité moyen des poutres est égal à 11300MPa.

La relation Moment-Flèche au centre est illustrée sur la figure 11. Cette figure présente également l'évolution du glissement à l'interface bois-béton. Après l'analyse sur éprouvettes, le fonctionnement du plancher mobilise un troisième mode de ruine correspondant à la rupture en flexion des poutres en bois lamellé-collé (figure 13).

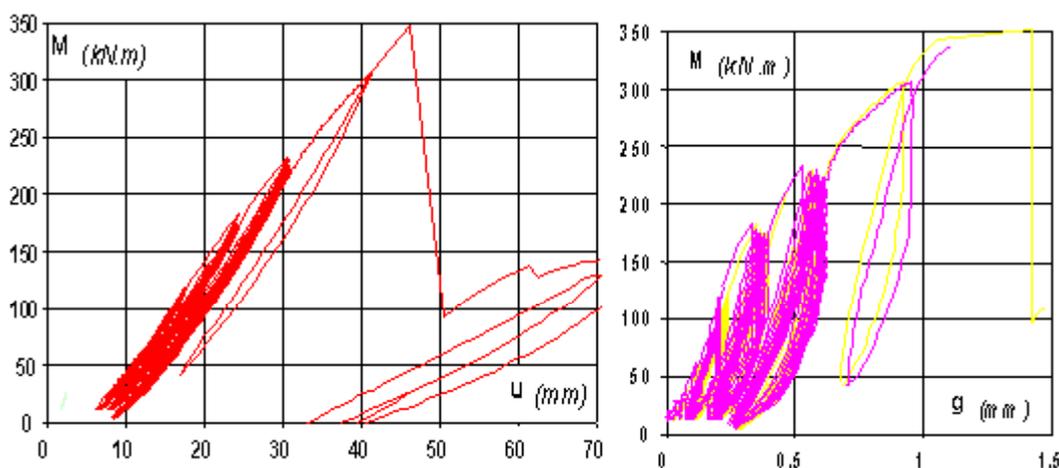


Figure 11 - Plancher Sylvabat : flèche (u) et glissement bois-béton (g).

Pour l'ensemble des séquences cycliques, ces courbes montrent que le niveau de charge par séquence ou la rigidité du système varient peu. Pour une limitation des déformations en service égale à $L/300$, on observe un glissement de l'ordre de 0,4mm. Ce critère est associé à un rapport proche de 3 entre le moment ultime au cours des cycles et le moment à l'état limite de service.

Parmi les trois planchers testés, le plancher N°1 Lignadal comporte des planches continues ($h=12\text{cm}$) constituant une prédalle bois de 15cm de hauteur totale. L'épaisseur de la dalle béton est égale à $(11+3)\text{cm}$. Cette configuration correspond au rapport maximal entre la rigidité du béton et celle du bois. Les caractéristiques du béton mis en oeuvre ont pour valeurs moyennes : $f_{c28} = 36\text{Mpa}$ et $f_{t28} = 3,0\text{Mpa}$.

Les courbes Moment-flèche et Moment-glissement (Figure 12) illustrent la rigidité du système jusqu'à un niveau de déformation d'environ $L/100$ correspondant à 90% du moment ultime. Ce seuil correspond à la propagation de ruptures partielles des interfaces bois-béton induisant un glissement d'environ 1mm entre les deux matériaux (figure12). Ces ruptures concernent le frottement bois-béton ainsi que les queues d'arronde sollicitées en cisaillement et traction transversale de par la raideur importante du béton. La ruine finale correspond aux ruptures successives des planches en flexion (figure 13).

Cet essai reflète la rigidité importante de ce procédé à prédalles bois dont le niveau de charge et le comportement restent constants jusqu'à 45 mm de flèche (soit $L/130$). Comme précédemment, à une limitation de déformations égale à $L/300$ correspond un glissement de l'ordre de $0,15\text{mm}$. Pour ce critère, un rapport supérieur à $3,5$ est obtenu entre le moment ultime au cours des cycles et le moment à l'état limite de service.

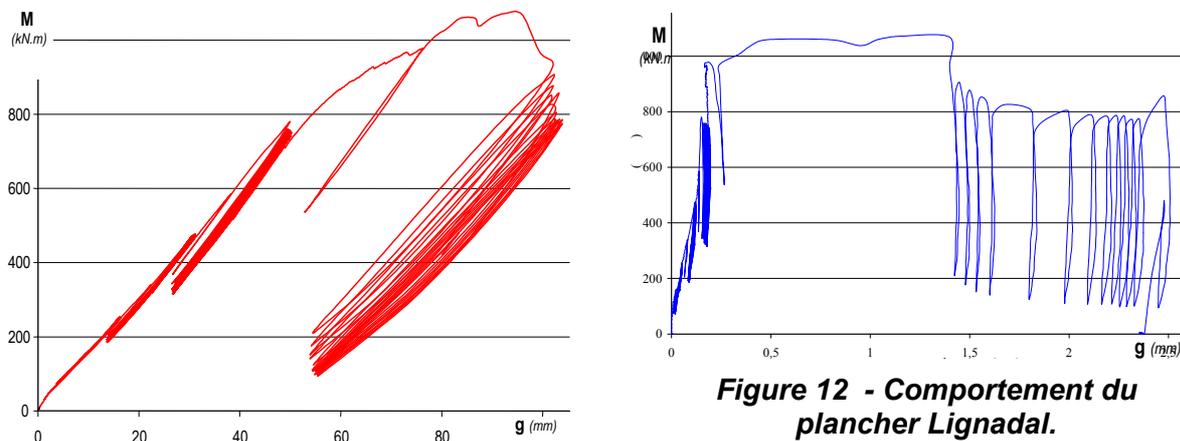


Figure 13 – Modes de rupture des planchers Sylvabat et Lignadal.

En considérant des interfaces rigides, le rendement de ces deux planchers peut être quantifié par le coefficient global de réduction de l'inertie de la section totale homogénéisée : $(EI)_{\text{eff}} = k_{EI} (EI)_{\text{tot}}$. Ainsi, pour les essais réalisés, il vient :

$$k_{EI} = \begin{array}{l} 0,55 \text{ à } 0,6 \text{ pour le système Sylvabat,} \\ 0,7 \text{ à } 0,75 \text{ pour le plancher Lignadal.} \end{array}$$

Conclusion

Cet article aborde deux domaines pour lesquels l'association de différents matériaux est en forte progression:

- Les assemblages avec l'utilisation de plats internes en métal,
- Et les planchers où la légèreté du bois utilise au mieux la raideur du béton comprimé.

Dans le premier domaine, un nouveau critère de dimensionnement a été établi pour prendre en compte des modes de rupture fragile induits par la concentration d'efforts. Les résultats obtenus ont permis le calcul des assemblages pour la conception du pavillon Utopia à Lisbonne. Depuis EXPO'98, cet ouvrage magnifique démontre le potentiel du matériau bois en tant que matériau de construction.

Concernant les planchers bois-béton, des interrogations subsistent quant à leur utilisation selon la sismicité du site de construction. Dans ce contexte, des études multi-échelles sont actuellement en cours au C/U/S/T/. Bien que dimensionnés sous sollicitations statiques, les planchers testés présentent un comportement dynamique permettant d'envisager leur utilisation en zone sismique. En complément aux travaux actuels, l'un des futurs points à traiter réside dans la liaison périphérique du diaphragme composite.

Références

Biger J.P., Bocquet J.F., Racher P. , " Testing and designing the joints for the pavilion of Utopia",

Bocquet, J.F., " Modélisation des déformations locales du bois dans les assemblages brochés ou boulonnés". Ph.D. Thesis, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France, 1997.

Ceccotti A. , "Timber to concrete structures", STEP/Eurofortech, Timber Engineering Volume 2, Lecture E13, Centrum Hout, Almere, The Netherlands 1995

CEN, EN26891, 1994. "Joint made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics ", 1994.

CEN, EN12512, "Timber structures – Test methods – Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners", 1977

Fournely E., Lecrompt C., Racher P., Sauvat N. "Behaviour of a timber-concrete connection, application to shear specimens and floors under going repeated loads", COST C12-WG1 Mixed building technology, Beld Septembre 2001.

Gehri, E., " Design of joints and frame corners using dowel-type fasteners ". Paper 29-7-6, CIB-W18 Timber structures, Bordeaux, France, 1996.

Lecrompt, C., "Comportement cyclique du plancher mixte Sylvabat – Paramètres nécessaires à un calcul sismique", mémoire d'ingénieur CUST, Juillet 2001.

Perrin, J.P., Quost, D., Bocquet, J.F., Racher, P., Biger, J.P., " The Pavilion of Utopia ". Proceedings of the World Conference on Timber Engineering, Montreux, Switzerland. Vol. 2, p. 80-87, 1998.

Quenneville, J.H.P., " Predicting the failures modes and strength of brittle bolted connections ". Proceedings of the World Conference on Timber Engineering, Montreux, Switzerland. Vol. 2, p. 137-144, 1998.

Racher, P., "Mechanical timber joints - General ". STEP/Eurofortech, Timber Engineering Volume 1, Lecture C1, Centrum Hout, Almere, The Netherlands, 1994.

Rivera, N., "Comportement du plancher bois-béton Lignadal sous sollicitations dynamiques", mémoire d'ingénieur CUST, Juillet 2001.