

Ponts mixtes bois béton collés

Etude de l'interface sous chargement thermo-hygro-mécanique

C. QUINTERO REYES^a, R. DURIOT^b, G. POT^b, S. GIRARDON^b, L. DENAUD^b, C. LE ROY^c, C. AUBAGNAC^c, J. ROTH^c, F. RENAUDIN^d, N. SAUVAT^a, A. MILLIEN^a, F. DUBOIS^a

a. GC2D, Univ. Limoges, Egletons - nicolas.sauvat@unilim.fr

b. LaBoMaP, Arts & Métiers, Cluny - Louis.DENAUD@ensam.eu

c. Cerema Centre Est DL, Autun - Christophe.Aubagnac@cerema.fr

d. Cerema Est DOA, Metz - Fabien.Renaudin@cerema.fr

Résumé :

Dans ce papier sont présentés les premiers résultats d'une étude globale visant à consolider, puis proposer des règles de dimensionnement de ponts mixtes bois / béton collés. La liaison collée est explorée de manière expérimentale avec des essais de cisaillement utilisant du lamellé collé et du LVL. Afin d'anticiper le vieillissement de cette liaison, des essais ont été réalisés à différentes humidités. Dans une deuxième partie, le développement d'outils de simulation par éléments finis est présenté. La modélisation thermo-hydrigue est appliquée sur des temps longs à des sections correspondant aux nervures bois d'un pont. Les phénomènes mécaniques à prendre en compte sont listés.

Abstract :

In this paper are presented the first results of a global study aimed at consolidating, then to propose design rules for composite glued timber/ concrete bridges. The glued bond is experimentally explored with shear tests using glued laminated timber and LVL. In order to anticipate the ageing of this bond, tests were carried out at different humidity levels. In a second part, the development of finite element simulation tools is presented. Thermal and hydrical modelling is applied over long periods to sections corresponding to bridges's wood beams. The mechanical phenomena to be taken into account are listed.

Mots clefs : pont ; bois ; assemblage bois-béton ; collage ; interface ; LVL ; cisaillement simple

1. Introduction

Selon la synthèse d'un audit remis récemment au gouvernement, 7% des ponts du réseau routier national non concédé à des sociétés privées pourraient présenter "à terme, un risque d'effondrement". Nombre de ces ouvrages construits présentent des pathologies et leur remplacement apparaît parfois comme inévitable. Les ponts mixtes bois/béton sont une solution constructive alternative efficace, économique,

écologique de par son bilan carbone. De plus, ils peuvent permettre de valoriser des bois “locaux”, tel que le douglas, un bois naturellement durable dont la production française ne cesse de croître. Efficace par l’optimisation de la mixité des matériaux bétons et bois par collage qui permet d’économiser sur les quantités de matière mises en œuvre, et économique par la réduction du délai de construction. Les tabliers de pont en bois sont en outre plus légers que les tabliers initiaux en béton.

Le collage bois/béton a déjà fait l’objet d’un fort investissement scientifique, notamment 3 thèses portées par le laboratoire Navier. Pour aboutir à une mise en œuvre fiable et économique, des études complémentaires doivent pourtant être réalisées. Le matériau porteur en bois doit être dimensionné pour reprendre notamment les sollicitations locales de cisaillement et de compression transversale. Un matériau bois reconstitué, type LVL (Laminated Veneer Lumber) composé de feuilles de placage présente la possibilité d’être optimisé vis-à-vis de ces sollicitations comme tout matériau composite. L’optimisation de ces structures doit également passer par une modélisation plus fine de comportement long terme dépendant des conditions de température et d’humidité. Dans les Eurocodes, la durée de projet pour la vie d’un pont est de 100 ans, et il n’existe pas de combinaison d’actions intégrant les variations dimensionnelles dues à l’humidité.

Un consortium composé du Cerema, du LaBoMaP, et du GC2D développe une approche croisée pour valider ce type de réalisation. S’appuyant sur l’expertise du Cerema dans la conception des ponts, le LaBoMaP travaille à optimiser les éléments porteurs en LVL au niveau de la qualité de chaque lamellation, de l’orientation de chaque feuille de placage dans le multiplis composite, et enfin au niveau de la géométrie de la poutre. La diffusion hydrique dans les porteurs en bois, ainsi que des profils thermiques dans le tablier béton engendrent tous deux des variations dimensionnelles. L’intégration des champs de déformation thermique et hydrique permet de définir les conditions de sollicitations thermo-hydriques maximales rencontrées pour un ouvrage d’art. La différence de nature de matériaux, ainsi que les sensibilités différentes à l’environnement vont faire apparaître des contraintes de cisaillement dans l’interface collée. Ces contraintes seront différentes selon les directions d’orthotropie du matériau bois à l’interface.

Ce papier présente les premiers résultats d’essais de cisaillement. Les résultats des essais sont comparés selon le type d’élément porteur bois (classique lamellé-collé ou LVL). Dans une seconde partie, une analyse globale liste les phénomènes physiques et mécaniques influents sur les ouvrages mixtes collés. En identifiant les justifications déjà prises en compte dans les Eurocodes, les pistes nouvelles de développement, propres à la cinétique du collage, et au caractère hygroscopique du matériau bois sont identifiées. Les premiers résultats de diffusion hydrique sont présentés, ainsi que les principes de simulation numérique utilisant la méthode des éléments finis.

2. Comportement expérimental

2.1 Contexte

Les ponts mixtes bois-béton collaborant présentent un fonctionnement reposant sur les meilleures performances mécaniques de chacun des matériaux : le bois en traction/flexion et le béton en compression. Ce type de section composite est sollicité principalement en flexion. En conséquence, le bois est placé au niveau des fibres tendues, tandis que le béton est placé au niveau des fibres comprimées. La liaison entre ces deux matériaux pilote le comportement de la section globale. En effet, selon la raideur d’interface (reprenant l’effort de cisaillement), le comportement de la section se situe entre un système non-connecté et un système à connexion parfaite.

Dans le cadre de l’étude de ponts mixtes bois-béton collés, il est donc nécessaire de comprendre et de caractériser le comportement du système à l’interface afin de valider le comportement global de la section composite.

Des essais de cisaillement ont été réalisés dans ce but. Les deux principaux paramètres à mesurer pour caractériser ce type de connexion sont: la rigidité (notée k_s) ou le module de glissement (noté K_s), calculés dans le domaine élastique-linéaire (pente de la courbe effort de cisaillement / déplacement), et la résistance à rupture au cisaillement. De manière générale, une connexion collée est caractérisée par une rigidité élevée et une résistance au cisaillement importante relativement aux matériaux support. Il est à noter que le domaine plastique des adhésifs est très limité, ce qui conduit généralement à une rupture de type fragile du plan de collage.

Afin de tester la liaison collée en cisaillement, plusieurs types d'essais en compression sont envisageables [7] : l'essai push-out, ou cisaillement à double recouvrement et l'essai de cisaillement simple sont présentés en **Figure 1**.

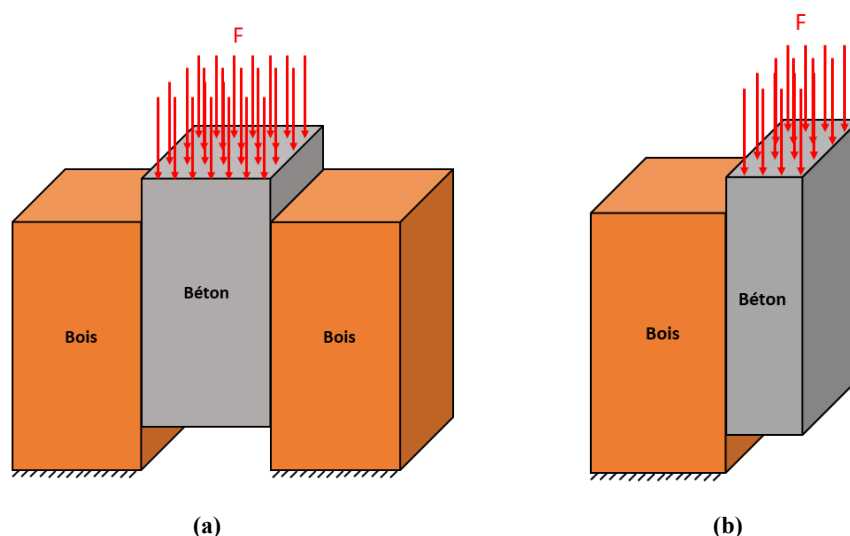


Figure 1 : Schémas des essais de cisaillement en compression, respectivement à double recouvrement ou push-out (a) et à simple recouvrement (b)

Le matériau bois utilisé pour une partie de ces essais est un composite de bois appelé lamibois ou LVL (Laminated Veneer Lumber) [8]. Il se compose de couches de placages, tous orientés dans la même direction des fibres. Dans notre cas, les feuilles de placage sont obtenues par une opération de déroulage de gros bois de douglas. Cette classe d'arbre, dont le diamètre est supérieur à 50 cm, est une ressource forestière en forte augmentation, notamment en ce qui concerne l'essence de douglas. Cependant, pour une partie de ces arbres, l'absence de sylviculture conduit à des bois de qualité difficile à valoriser [9]. La conséquence est l'obtention d'un bois à plus forte nodosité, dégradant les performances du matériau après transformation. Le déroulage de ces bois et la fabrication de panneaux ou de poutres de type LVL permet grâce à ce procédé une meilleure répartition des défauts dans la masse pour le rendre plus homogène. Il présente par ailleurs l'avantage de pouvoir ordonnancer ces placages et ainsi optimiser la position des plus gros défauts dans le matériau, mais aussi de pouvoir faire varier la direction des fibres (direction de plus grande rigidité et résistance) afin de correspondre à la répartition des efforts sur le système de type pont. Les essais seront comparés avec des éprouvettes comprenant du lamellé-collé, ce dernier étant utilisé principalement pour la mise en œuvre des ponts mixtes bois-béton.

2.2 Matériels et Méthodes

Dans le cadre des travaux présentés ici, les essais à simple cisaillement jusqu'à rupture ont été préférés aux essais push-out double pour leur masse les rendant plus facilement manipulables, leur rapidité de mise en œuvre et une économie des matériaux (colle, béton), tout ceci pour un faible différentiel de résultats constaté lors d'essais préliminaires. Il est à noter que les essais en double cisaillement ont tendance à sous-estimer la valeur de résistance à rupture, du fait que le joint de colle de plus faible résistance rompt en premier et la rupture du second joint n'est jamais atteinte. Ainsi, les essais en simple cisaillement permettent d'éviter un biais de mesure. Cependant, une excentricité de la charge est engendrée, ce qui a pour conséquence d'induire un faible moment de flexion parasite dans l'interface. Un système de mise et de maintien en position limitant au maximum ce phénomène a donc été nécessaire.

2.2.1 Caractéristiques des corps d'épreuve

Les corps d'épreuve sont constitués d'un élément de douglas prismatique (section 100×100 mm et 200 mm de long), d'un élément de béton (voir sa formulation dans le *Tableau 1*) prismatique (section 50×100 mm et 200 mm de long) et d'un adhésif (1.65 kg/m² pour un joint de colle de 1 mm).

Tableau 1: Formulation du béton utilisé dans la fabrication des éprouvettes

Composants	Poids au m ³ (en kg)
0/4	370
4/12,5	1030
Ciment	330
Eau	165
Sika 22S	2,06
BASF SKY 537	1,59

Un décalage longitudinal de 20 mm est opéré afin d'obtenir une surface de collage de 180×100 mm². En ce qui concerne les éprouvettes de LVL, elles sont collées selon 2 configurations : sur chant ou à plat. Pour le lamellé collé, le collage est effectué uniquement à plat. Dans tous les cas, le sens des fibres est toujours parallèle à l'axe d'application de la charge. Des schémas de ces corps d'épreuve sont présentés *Figure 2*.

Pour le bois utilisé ici, les placages du LVL (d'une épaisseur d'environ 3 mm) ont été collés entre eux sans recherche de gain de caractéristiques mécaniques. De plus, l'application de ce système bois/béton collaborant à un projet de pont en extérieur pose la question de la durabilité du bois aux attaques biologiques. Le douglas possédant une proportion importante de duramen, naturellement résistant aux insectes et aux champignons [9], c'est donc cette partie du bois qui a été choisie et exploitée pour les 2 types de produits bois dans ces essais.

Le comportement des corps d'épreuve en cisaillement simple est donc étudié, et a permis en fonction du type de rupture d'établir un plan d'étude d'optimisation.

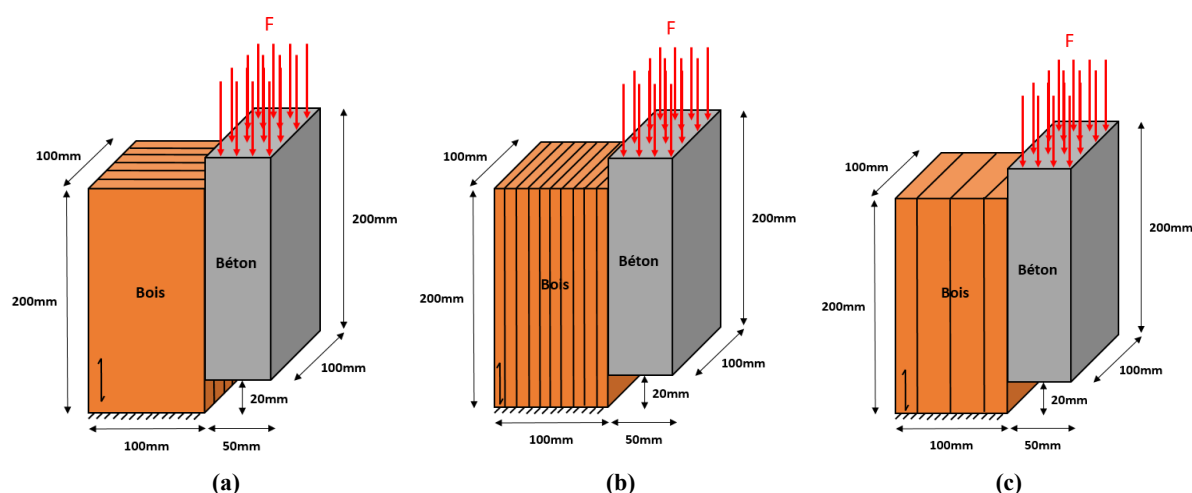
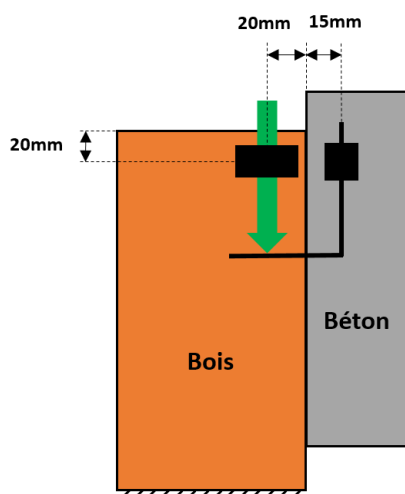


Figure 2: Illustration du collage du LVL respectivement sur chant (a) et à plat (b), du lamellé collé à plat (c), et dimensions des corps d'épreuves

L'adhésif d'interface utilisé, de type époxy (Sikadur 30), est mis en œuvre après le durcissement du béton. Les essais ont eu lieu minimum 7 jours après mise en œuvre de la colle afin de lui garantir les meilleures caractéristiques de résistance possibles, conformément à sa fiche technique [10]. Préalablement à cette opération, les surfaces à l'interface sont préparées afin de garantir l'adhésion. La surface de bois est poncée au papier de verre (de grain 120) et le béton est poncé au disque diamant afin d'en éliminer la laitance superficielle. L'objectif de cette préparation de surface est d'optimiser les forces de liaison adhésif/béton en créant une rugosité de surface, en rendant la surface plane et chimiquement propre et en retirant la laitance superficielle.

2.2.2 Mise et maintien en position du corps d'épreuve

Les essais de cisaillement simple induisent un moment de flexion parasite. La mise et le maintien en position du corps d'épreuve par un système adéquat est impératif pour limiter ce phénomène. Ce



dispositif est présenté

. Il est constitué d'un sabot métallique de dimensions intérieures 400×100×100 mm. Le corps d'épreuve y est positionné et bloqué en translation dans le plan perpendiculaire à l'axe d'application de la charge par les parois du moule et par des vis de serrage qui permettent la translation d'une plaque métallique jusqu'à contact avec l'un des blocs. Ce dispositif de maintien n'applique aucune force significative sur l'éprouvette.

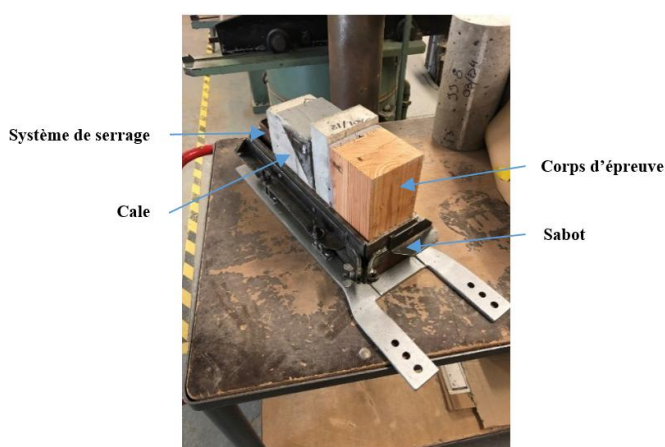


Figure 4: Dispositif de mise et maintien en position du corps d'épreuve mixte collé

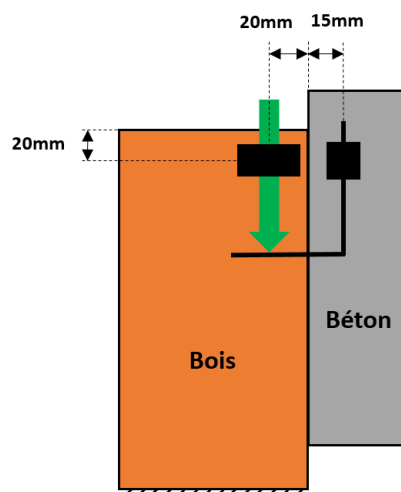


Figure 3: Placement des capteurs de déplacements sur les corps d'épreuve

2.2.3 Procédure de chargement, instrumentation et calculs

La procédure de chargement se compose de trois phases : une précharge pilotée en effort est appliquée avec une vitesse constante de 300 N/s jusqu'à un plateau de 30 kN conservé pendant 60 s, puis la montée en charge se poursuit avec une vitesse constante de 500 N/s jusqu'à la rupture. La machine d'essai de compression utilisée est de marque Mohr & Federhaff. Sa capacité de chargement est de 1000 kN. Les mesures de déplacement sont effectuées par 2 capteurs, situés symétriquement de part et d'autre du corps d'épreuve. Le schéma de la *Figure 3* présente un de ces 2 capteurs.

Des jauges de déformations ont aussi été installées dans l'interface de collage afin d'observer la répartition verticale des déformations et leur symétrie, mais elles ne se seront pas présentées ici.

Pour l'exploitation des résultats, 2 paramètres sont donc étudiés pour caractériser la connexion : la rigidité k_s et la résistance à rupture au cisaillement. En ce qui concerne cette dernière, il est préférable d'utiliser la contrainte tangentielle de résistance au cisaillement, afin de pouvoir comparer les résultats à des valeurs de référence. La formule utilisée est décrite dans l'Équation 1.

$$\tau_{moyenne} = \frac{F_{rupture}}{S_{collée}}$$

Équation 1: Calcul de la contrainte moyenne tangentielle de résistance au cisaillement

Pour le calcul des coefficients de rigidité k_s , la méthode utilisée a consisté à exploiter les courbes d'effort en fonction du déplacement et de calculer la pente de la partie linéaire de la courbe dans le domaine élastique. Cependant, devant la grande disparité de l'allure des courbes obtenues et des domaines linéaires réduits, la plage de points utilisés a été limitée. Le calcul s'est donc effectué pour des valeurs d'efforts comprises entre 32 kN et 37 kN compris.

2.2.4 Description des essais

Trois types d'essais ont été menés, pour répondre à plusieurs questionnements sur le comportement en cisaillement de corps d'épreuve mixtes béton LVL collés.

- Premièrement, il s'agissait de comparer le comportement du LVL face au lamellé collé pour des essais de cisaillement simple. Pour cela, 8 corps d'épreuves secs ont été constitués, dont 4 éprouvettes en lamellé-collé et 4 en LVL de douglas.
- Deuxièmement, il a aussi été choisi d'estimer l'impact de l'orientation du LVL sur le comportement mécanique (raideur et résistance) du corps d'épreuve par la réalisation d'une variation du plan de collage des 4 éprouvettes contenant du LVL avec 2 collages sur chants et à plat.
- Dernièrement, l'objectif était d'évaluer l'impact des variations d'humidité sur la section composite LVL. En effet, la classe de service de l'ouvrage est la classe 2 [11] correspondant au cas d'une charpente abritée soumise à des variations hygrométriques, dont l'humidité moyenne en service est stabilisée entre 13% et 20% d'humidité. Il est donc primordial de prendre en compte ce facteur d'environnement. Pour cela, 4 corps d'épreuves (dont 2 collés sur chant, et 2 à plat) ont été entièrement immergés à température ambiante (20 °C) dans l'eau. Des relevés quotidiens, massiques et dimensionnels, ont été notés jusqu'à stabilisation de ces paramètres (variation inférieure à 5 % pour la masse). Là encore, les configurations sur chant et à plat du collage du LVL ont été testées. Les conclusions sur l'élément limitant à rupture entre le bois, la colle et le béton ont ainsi pu être déterminés. Cette imbibition brutale et prolongée sur plusieurs semaines d'éprouvettes bois/béton n'a pas pour but de donner des informations sur le comportement de l'ouvrage dans de telles conditions puisque la classe de service ne prévoit évidemment pas ce cas. Cependant, des essais très proches sont développés dans la norme de définitions, classification et spécifications du LVL [8], ayant recours à des éprouvettes imbibées [12]. Ainsi, il a été décidé d'adopter une approche similaire qui est permet de tester le comportement de la liaison dans un cas extrême.

2.3 Résultats et discussions

2.3.1 Résultats

Il est à noter que les essais des éprouvettes LVL à plat imbibées n'ont pas pu être exploités pour déterminer une rigidité à cause de leur trop faible résistance à la rupture. De plus, l'acquisition d'un des essais avec du lamellé-collé n'a pas fonctionné, seule la valeur de la résistance à la rupture est disponible.

Le mode de rupture des corps d'épreuve est très majoritairement cohésif dans le bois : ce matériau est donc l'élément limitant pour ce type d'essais.

La raideur moyenne de cisaillement du bois attendu en choisissant un module d'élasticité transversal moyen G du bois de 600 MPa et en prenant en compte la distance horizontale e de 20mm entre le plan de collage et la jauge de mesure de déplacement est de 450kN/mm, comme explicité dans l'Équation 2.

$$k_s = \frac{F}{u} = G \times \frac{S_{eff}}{e}$$

$$k_s = 600 \times \frac{\frac{5}{6} \times 180 \times 100}{20} = 450 \text{ kN/mm}$$

Équation 2: Calcul de la raideur moyenne de cisaillement du bois pour une section rectangulaire

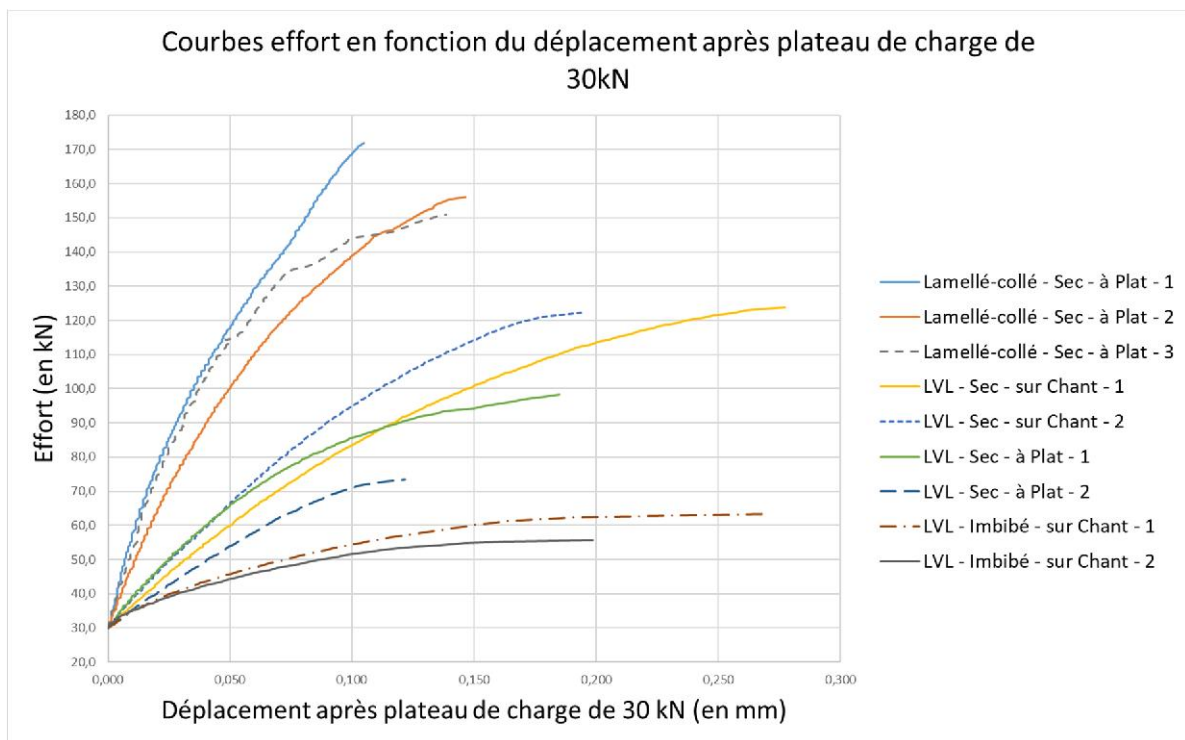


Figure 5: Courbes des efforts en fonction du placement des essais

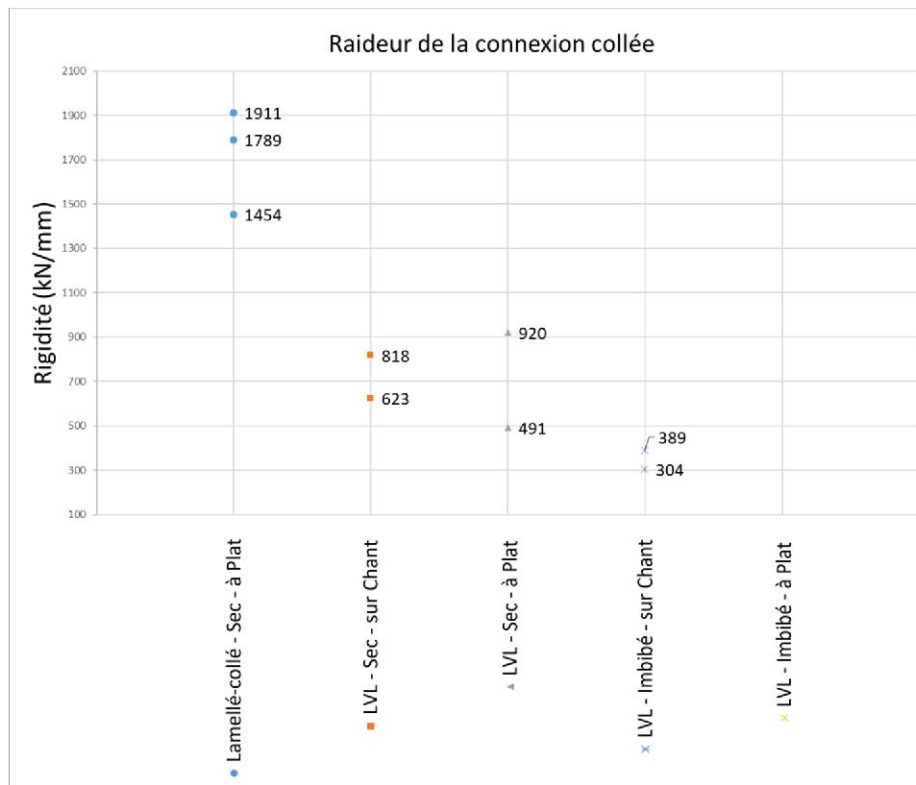


Figure 6 : Valeurs de rigidité de la connexion collée en fonction des différentes configurations d'essais

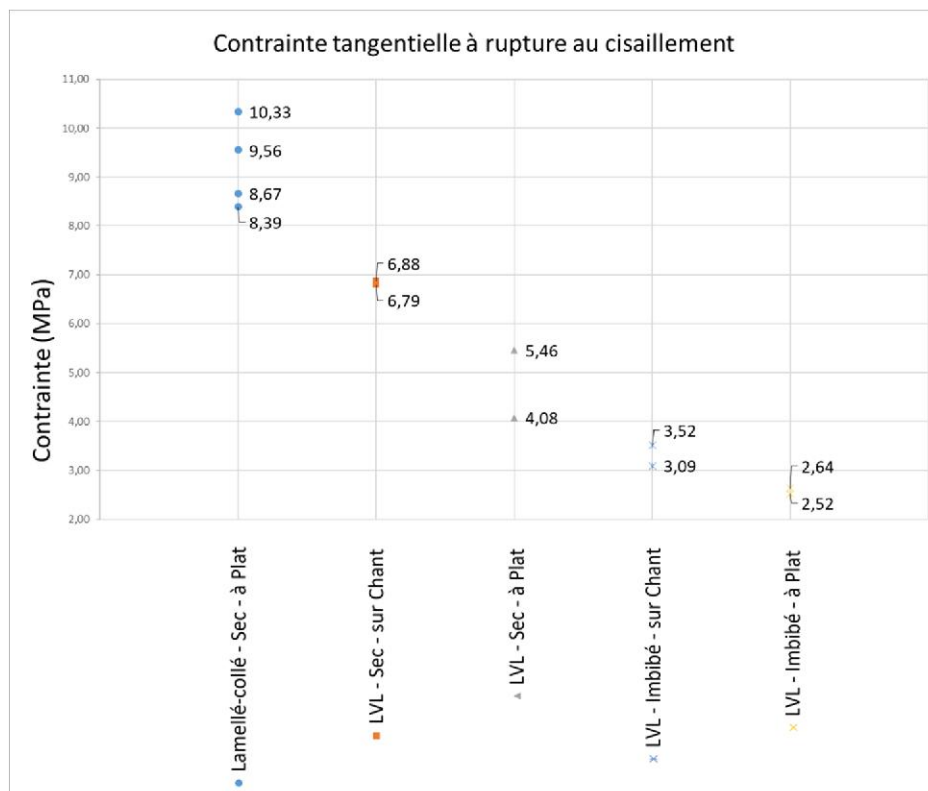


Figure 7: Valeurs de contrainte tangentielle à la rupture de cisaillement de la connexion collée en fonction des différentes configurations d'essais

En effectuant ce même calcul pour le béton avec un module d'élasticité de 34000 MPa, la valeur de raideur k_s de $255 \cdot 10^3$ kN/mm, bien supérieure à celle du bois. La raideur du bois est du même ordre de

grandeur que les rigidités expérimentales observées sur le LVL. Cela confirme donc que le matériau bois pilote effectivement en déplacement le corps d'épreuve et constitue l'élément limitant en termes de résistance en cisaillement.

Malgré le faible nombre de corps d'épreuve testés, certaines conclusions peuvent être formulées à partir des résultats, en premier lieu en les comparant entre eux. Le **Tableau 2** présente les calculs du coefficient de rigidité k_s en fonction des modules de cisaillement de la norme NF EN 14080 [13] et de la fiche technique des caractéristiques des LVL Kerto S [14] (aucune information pour le LVL de douglas n'étant disponible dans la littérature), et les compare aux valeurs des essais. Idem pour la comparaison des contraintes de résistance au cisaillement.

On note premièrement que les caractéristiques de rigidité et de résistance des éprouvettes en bois lamellé-collé surpassent celles du LVL sur les essais de corps d'épreuves sec. Ce constat est surprenant étant donné les modules de cisaillement théoriquement très proches dans la littérature. On constate ainsi que les valeurs expérimentales de rigidité bois/béton sont toutes supérieures aux données techniques des matériaux bois seuls respectifs. Cependant, on note que les valeurs expérimentales de résistance au cisaillement du lamellé-collé sont supérieures à celles du LVL collé sur chant. L'utilisation d'un duramen de douglas présentant un certain nombre de défauts (telles que des fissures radiales issues du déroulage et une forte concentration de gros nœuds) peut en être la cause.

Deuxièmement, la configuration de collage à plat donne des valeurs de résistances à ruptures systématiquement plus faibles que pour le collage sur chant. C'est effectivement bien ce qui est observé sur le LVL [14], avec un rapport d'environ 1,8 entre les configurations. Dans le cas du collage LVL de douglas/béton, celui-ci est d'environ 1,4.

Tableau 2: Comparaisons des valeurs d'essais de contrainte de résistance au cisaillement et de coefficient de raideur avec des données techniques de produits d'ingénierie bois

Matériau	Complément	Résistance au cisaillement (MPa)		Module de cisaillement G (MPa)	Coefficient de rigidité k_s (kN/mm)	
		Valeur caractéristiques issues de littérature (bois seul)	Valeur moyenne des corps d'épreuve bois/béton de ces essais	Valeur moyenne issues de littérature (bois seul)	Valeurs calculées à partir de G et de l'Équation 2 (bois seul)	Valeur moyenne des corps d'épreuve bois/béton de ces essais
Lamellé-collé	/	3,5 (GL24h)	10,5	650 (GL24h)	487.5	1718
LVL sans pli croisé	Sur chant,	4,1 (Kerto S ®)	6.8	600 (Kerto S ®)	450	721
	À plat, parallèle au fil du bois	2,3 (Kerto S ®)	4,8	600 (Kerto S ®)	450	705

Concernant les rigidités entre le LVL collé sur chant et à plat, le faible nombre d'éprouvettes testées, l'absence de valeur pour la configuration de LVL imbibé collé à plat, et les résultats constatés ne nous permettent pas encore de conclure.

Enfin, les éprouvettes imbibées obtiennent des valeurs de résistance bien moins importantes que les essais secs. Une augmentation importante de l'humidité des corps d'épreuves diminue les caractéristiques mécaniques du bois, correspondant à ce qui est décrit dans la littérature [15]. Cependant, la rupture restant cohésive, le comportement de l'interface reste compatible avec les objectifs du projet,

3. Modélisation de la cinétique et du comportement thermo-hygro-mécanique de l'interface collée

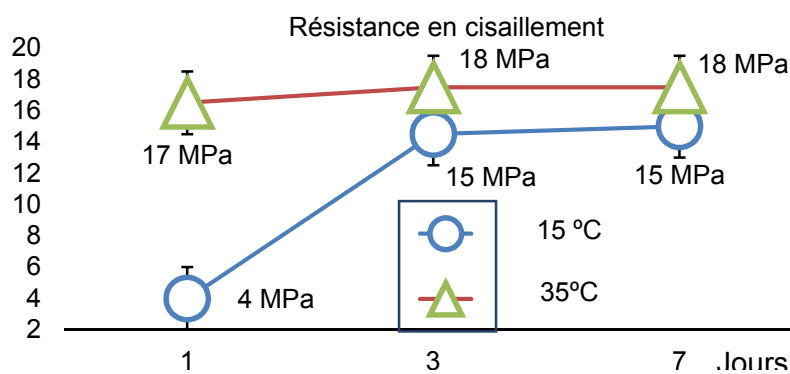
Les méthodes de calcul de l'ingénieur utilisées aujourd'hui pour justifier le comportement de tels ouvrages sont basées sur un comportement élastique des matériaux, ou équivalent élastique en utilisant des valeurs dégradées des rigidités par exemple pour prendre en compte les effets viscoélastiques de fluage. Les effets thermiques sont définis de manière très forfaitaire, et aucune équivalence hydrique n'est proposée dans les Eurocodes pour des matériaux hygroscopiques.

3.1 Cinétique de la mise en œuvre de la dalle collée sur place.

Dans le cas d'un hourdis béton coulé en place, les phénomènes de prise de la colle d'une part, et de prise et de durcissement du béton d'autre part, se traduisent par une augmentation des rigidités mécaniques des matériaux. La polymérisation de la colle, comme la prise hydraulique du béton, sont des phénomènes dont la cinétique est dépendante de la température. Pour le béton, la rigidification progressive s'accompagne d'un retrait. Ces différentes cinétiques sont susceptibles de créer une première sollicitation de cisaillement dans l'interface collée par des retraits empêchés, dont dépendra la qualité de la mise en œuvre. Ce préchargement initial pourra s'additionner aux contraintes de cisaillement générées par les divers chargements, mécaniques, thermiques, hydriques, qui solliciteront l'ouvrage durant son exploitation.

3.1.1 Cinétique du collage

L'adhésif retenu est un adhésif structural époxydique de chez Sika ; Sikadur 30 [10]. Il est imperméable aux liquides et à la vapeur d'eau et le durcissement n'est pas affecté par l'humidité. Il est conçu pour une utilisation à une température comprise de +8 et +35 °C. Aucun retrait n'est associé à la montée en rigidité. Cependant la vitesse de prise est très dépendante des conditions ambiantes de température, **Figure 8**. Suivant les conditions de mise en œuvre sur site, les cinétiques de durcissement de la colle et du béton pourront varier, et probablement influencer la qualité du collage en réception de l'ouvrage.



3.1.2 Prise du béton et retrait associé

Les phénomènes de retrait à court terme associés à la prise du béton sont bien connus et sont déjà pris en compte dans le dimensionnement des ouvrages [16], [17]. Les retraits endogène, de dessiccation et thermique peuvent être calculés en fonction du temps et de l'humidité ambiante pour le retrait de dessiccation.

3.1.3 Proposition de modélisation

Les échelles de temps de rigidification de la colle et du béton sont du même ordre de grandeur. Dans le cas d'un coulage en place, le retrait à court terme du béton peut engendrer des déformations différentielles. Il conviendra de vérifier que les performances de la colle sont compatibles, et qu'il n'y

a pas de risque de fissuration de l'interface et donc de réduction de surface effective de collage due aux conditions climatiques de mise en œuvre.

Ces phénomènes étant relativement rapides, de l'ordre de quelques jours pour la plus grande partie, les variations dimensionnelles des éléments bois n'interviennent probablement que peu lors de cette phase. Par contre, la modélisation de la diffusion hydrique dans des éléments bois de section massive montre des effets sur le comportement à long terme.

3.2 Diffusion hydrique et thermique

La justification des effets thermiques sur les ponts, entraînant des variations dimensionnelles, est déjà encadrée par les Eurocodes [18]. Les composantes des températures extrêmes du pont se déduisent des températures extrêmes de l'air sous abris. Dans le cas des structures mixtes acier – béton, des gradients thermiques dans l'épaisseur sont également pris en compte.

Pour des ponts mixtes bois – béton, ce cadre normatif reste à déterminer. Si, pour les cas extrêmes thermiques, les phases transitoires sont négligées, cette simplification ne pourra pas s'appliquer à l'étude hydrique tant les temps de diffusion de l'eau dans le bois sont importants. Il en ressort que des champs hétérogènes d'humidité interne doivent être calculés pour identifier précisément :

- Les variations dimensionnelles à l'interface collée, dans le sens longitudinal comme transversal, et la perturbation possible du champ de cisaillement ;
- Les conséquences sur le comportement thermo-sensible de la colle ;
- Les conséquences sur le comportement mécanique hygro-sensible du bois, sur les propriétés élastiques comme sur le comportement visqueux.

En guise d'exemple, la **Figure 9 a)** présente un champ hydrique sur une poutre de section 600 x 800 mm², avec les propriétés du Douglas pour une sollicitation illustrée **Figure 9 b)** résultat d'une simulation par éléments finis [19]. La diffusion est nulle sur la face supérieure représentant la surface collée. La périphérie de la poutre présente des valeurs très élevées à cet instant de la modélisation, correspondant à une sollicitation extérieure proche de 100% HR. L'épaisseur concernée par les variations annuelles ne dépasse pas 20 mm. Le cœur de la poutre reste quant à lui à des valeurs d'humidité beaucoup plus basses. La partie supérieure de la poutre, sous la zone d'interface étanche à la diffusion de vapeur, est toutefois modélisée ici avec les mêmes conditions aux limites en température que les autres faces. On y voit nettement l'influence de la température qui accélère les phénomènes de diffusion hydrique. Cette influence thermique et hydrique dans la zone d'interface est la donnée d'entrée de l'étude mécanique.

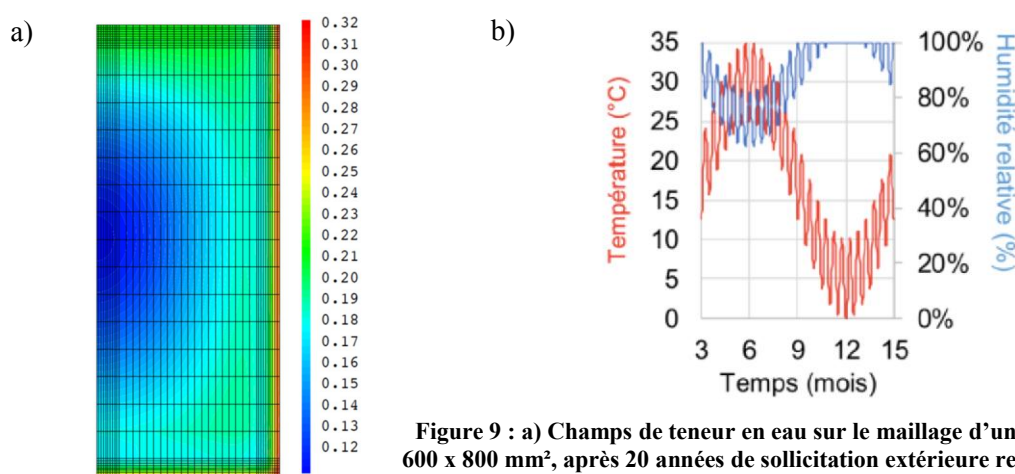


Figure 9 : a) Champs de teneur en eau sur le maillage d'une demi poutre 600 x 800 mm², après 20 années de sollicitation extérieure représentée en b)

3.3 Comportement mécanique

3.3.1 Variations dimensionnelles

La modélisation d'un ouvrage mixte avec deux matériaux, béton et bois, dont les cinétiques thermiques et hydriques sont très différentes, permettra de préciser les situations dimensionnantes à prendre en compte dans la vie d'un ouvrage. L'image de l'action thermique T_k , définie comme la différence entre deux températures extrêmes, l'objectif de cette étude est de proposer les conditions de calcul d'une charge d'humidité M_k , pour « Moisture ».

3.3.2 Comportement long terme

3.3.2.1 Prise en compte du fluage

La prise en compte réglementaire du fluage du béton et du bois est basée sur le même principe ; la rigidité instantanée est réduite à long terme par la valeur X :

$$E_{long\ terme} = \frac{E_{instantané}}{1 + X}$$

Avec :

- dans le cas du béton : $X = \psi_L \times \phi_t$
où ψ_L dépend du type de charge, et ϕ_t est une fonction de fluage. Par simplification, dans le cas des ponts, on retient une unique valeur pour $1 + \psi_L \times \phi_t$ égale à 3.
- dans le cas du bois : $X = k_{def}$
où k_{def} dépend de la classe de service, c'est-à-dire à l'ambiance hygrothermique autour de l'ouvrage. Les poutres en bois étant protégées par le tablier béton des intempéries, la classe de service 2 est aujourd'hui retenue. Dans ce cas, la valeur de $1 + k_{def}$ égale à 1,8. Cette valeur pourrait toutefois être modulée par les effets des embruns routiers, et par la massivité de la section.

3.3.2.2 Approche rhéologique

L'utilisation d'un modèle de Kelvin Voigt généralisé a déjà fait ses preuves pour modéliser le comportement différé du bois, **Figure 10** [20].

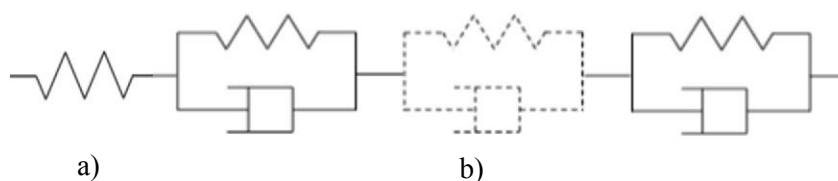


Figure 10 : Modèle rhéologique utilisé pour a) le comportement instantané et b) le comportement différé

Le premier ressort traduit un comportement hydroélastique, permettant un adoucissement ou une rigidification de la matrice de rigidité [21]. Le comportement viscoélastique des cellules de Kelvin Voigt, dont le nombre est à ajuster en fonction du temps et des conditions d'humidité (**Figure 11**) peut être également corrigé par un terme d'hygroactivation. Cette modification peut s'appliquer sur les temps d'ouverture de chaque cellule, et traduire ainsi une accélération fictive du temps par humidification [20]

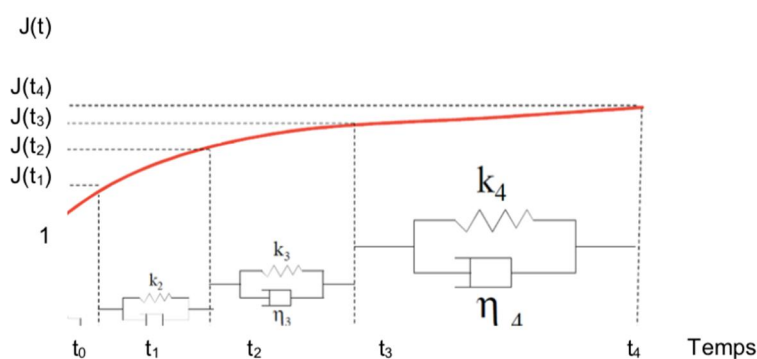


Figure 11 : Évolution de la fonction de fluage $J(t)$ pour chaque cellule de Kelvin Voigt

3.3.3 Modélisation du joint collé

La modélisation par éléments finis sur le logiciel CASTEM sera complétée par une gestion de l'interface via des éléments de joint. Ces éléments de joint sont capables de traduire le comportement élastique thermo ou hygro sensible, mais également une possibilité d'endommagement [22].

4. Conclusion

Ce papier synthétise les premiers résultats d'une démarche croisée entre expérimentation et modélisation. Les essais constituent une étude préliminaire. Ces résultats permettent de placer un LVL de douglas de qualité médiocre par rapport à un lamellé-collé GL24h.

Plusieurs axes d'optimisation du LVL se dessinent. Tout d'abord, il est nécessaire de prendre en compte la qualité des placages. La nature très hétérogène du douglas justifie une caractérisation de ces derniers et un tri de ceux comportant trop de défauts qui nuiraient à l'intégrité mécanique du produit. Des mesures automatisées par scanner permettront un tri par taille et par répartition de nœuds, ce qui existe déjà en industrie pour d'autres essences de bois. De plus, lors de la superposition de placages, une attention pourra être portée sur le positionnement afin d'éviter une concentration sur plusieurs plis des nœuds. Ensuite, il serait intéressant de réitérer ces essais avec des éléments de LVL présentant une variation dans l'orientation des feuilles de placages. En effet, nous avons pu constater de meilleures résistances pour le collage sur chant qu'à plat. Dans notre contexte de développement de produit lamellé pour des nervures de ponts à poutres, cette voie d'optimisation sera vraisemblablement exploitée afin de répondre à l'ensemble des sollicitations s'exerçant sur les poutres. Réitérer ces essais avec une éprouvette de LVL à plusieurs orientations de placages nous donnerait plus de précision sur sa tenue en cisaillement.

Une amélioration peut aussi être apportée à la procédure de chargement des essais. En effet, ajouter une phase de déchargement après le plateau à 30 kN permettrait d'observer une partie linéaire plus marquée, ce qui favoriserait la précision de calcul des raideurs k_s . Enfin, un nombre de corps d'épreuve plus important pour une meilleure représentativité est à prévoir.

Les outils de modélisation par éléments finis sont en cours de développement. La modélisation de la diffusion hydrique et thermique donne des résultats intéressants, qu'il faudra affiner avec des valeurs de diffusion mesurées dans des échantillons de LVL selon les trois directions d'orthotropie. Les champs hydriques et thermiques obtenus permettront de définir plus précisément les déformations différentielles entre les deux matériaux (cinétiques différentielles de fluage/relaxation, dilatation et contraction thermique du béton et le retrait-gonflement du bois), qui vont générer des champs de contrainte de cisaillement dans l'interface.

Enfin, l'agrégation de ces approches permettra de proposer un modèle des essais de cisaillement, pour aboutir en perspective à la modélisation de la liaison collée entre bois et béton, dans le sens longitudinal du pont, ainsi que dans la direction transversale.

Références

[1] Réseau routier national non concédé : résultats d'audits Ministère de la Transition écologique et solidaire, 10 juillet 2018.

- [2] La connexion par collage des passerelles mixtes acier et béton, Revue de construction métallique, n°1, 2017.
- [3] Projet National MIKTI - Ponts mixtes acier et béton, Un guide pour des ouvrages innovants- Chapitre II.7 - La connexion par collage- Presse des ponts- 2010.
- [4] Hoia Son, PHAM, 2007, Optimisation et comportement en fatigue de la connexion bois-BFUP pour de nouveaux ponts mixte, doctorat École Nationale des ponts et Chaussées. (direction de thèse: Laboratoire Navier)
- [5] Nguyen Trung, V.A, 2010. Multirenforcement du bois lamellé-collé. Doctorat École Nationale des ponts et Chaussées (direction de thèse: Laboratoire Navier)
- [6] Louisa Loulou, 2013, Durabilité d'un assemblage mixte bois-béton collé sous chargement hydrique, Doctorat université Paris-Est (direction de thèse: laboratoire Navier)
- [7] GENDRON Benoit, Ponts composites bois-béton en portée simple : théorie, essais et conception, thèse, Université Laval Québec, 2016. Disponible sur : <https://corpus.ulaval.ca/jspui/bitstream/20.500.11794/26803/1/32472.pdf>
- [8] NF EN 14279+A1 (mai 2009) : Lamibois (LVL) – Définitions, classification et spécifications (Indice de classement : B54-190)
- [9] CIRAD.2012. <https://tropix.cirad.fr/FichiersComplementaires/FR/Temperees/DOUGLAS.pdf>. [En ligne] 2012.
- [10] Product Data Sheet Sikadur® -30, May 2017, Version 02.01, 020206040010000001
- [11] NF EN 1995-1-1 (novembre 2005) : Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : Généralités – Règles communes et règles pour les bâtiments + Amendement A1 (octobre 2008) + Amendement A2 (juillet 2014) (Indice de classement : P21-711-1)
- [12] NF EN 314-1 (juin 1993) : Contreplaqué – Qualité du collage – Partie 2 : Exigences (Indice de classement : B51-338-2)
- [13] NF EN 14080 (août 2013) : Structures en bois - Bois lamellé collé et bois massif reconstitué - Exigences (Indice de classement : P21-501)
- [14] « VTT certificate for structural laminated veneer lumber » n°184-03, 24 mars 2009, organisme de certification (S017, EN 45011) accrédité par FINAS
- [15] Association des ingénieurs de l'école supérieure du bois, « Manuel de l'ingénierie bois », Paris, Editions Eyrolles, 2013, 682p
- [16] NF EN 1992-1-1 « Eurocode 2 – Calcul des structures en béton – Partie 1.1 : règles générales et règles pour les bâtiments » (Octobre 2005) et son amendement A1 (Février 2015) + Annexe Nationale
- [17] NF EN 1994-2 « Eurocode 4 - Calcul des structures mixtes acier-béton - Partie 2 : règles générales et règles pour les ponts » (Février 2006) + Annexe Nationale

[18] NF EN 1991-1-5 « Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1.5 : Actions générales – Actions thermiques » (Mai 2004) + Annexe Nationale

[19] Maximin Varnier (2019) « Comportement thermo-hygro-mécanique différé des feuillus – Des Sciences du bois à l'ingénierie ». Doctorat de l'Université de Limoges

[20] VARNIER Maximin, SAUVAT Nicolas, MONTERO Cédric, DUBOIS Frédéric, GRIL Joseph – « Long-term mechanical behavior of hardwood species in outdoor conditions », 11th International Conference on the Mechanics of Time Dependent Materials, Milano, 2018

[21] J. M. Husson, F. Dubois, et N. Sauvat, « A finite element model for shape memory behavior », Mech. Time-Depend. Mater., vol. 15, no 3, p. 213-237, août 2011.

[22] Rhama KTARI (2016) « Mécanismes et modélisations de dégradation et décollement des interfaces de couches de chaussées » Doctorat de l'Université de Limoges