

---

# Auto contraintes dues au retrait endogène dans une structure mixte bois-béton assemblée par collage « frais sur frais »

Robert Le Roy<sup>1,2</sup>, Adeline Confrère<sup>3</sup>, Louisa Loulou<sup>1</sup>, Sabine Caré<sup>1</sup>, Boumediene Nedjar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Est, Laboratoire Navier (UMR ENPC/CNRS/IFSTTAR), 6-8 avenue Blaise Pascal, cité Descartes, Champs sur Marne. Robert.leroy@enpc.fr

<sup>2</sup> Ecole Nationale Supérieure d'Architecture Paris Malaquais, 14 rue Bonaparte, 75006 Paris

<sup>3</sup> LGCIE, Université Lyon 1, INSA LYON, 82 bd Niels Bohr, 69622 Villeurbanne Cedex, France

---

*RÉSUMÉ.* La présente étude porte sur l'évaluation des autocontraintes au jeune âge, dues au retrait endogène du béton, développées dans le bois et le béton pour une poutre mixte réalisée suivant le principe du « collage frais sur frais ». Les effets du retrait accompagnant le durcissement du béton ont été évalués expérimentalement et par une approche analytique.

Des expériences sur des poutrelles de 1 mètre de longueur ont été conduites. Une modélisation par éléments finis accompagne ces essais en fournissant des informations locales au niveau des interfaces. Les conclusions de l'étude montrent que les auto contraintes normales dans le bois et le béton sont négligeables, alors que celles de cisaillement sont à prendre en compte dans l'optique d'un dimensionnement structurel.

*ABSTRACT.* This study deals with the evaluation of the self stresses, due to autogenous shrinkage of concrete, developed at early age in the wood and concrete parts of a composite beam completed according to the so called « fresh to fresh » method. Effects of shrinkage during the concrete hardening were assessed both experimentally and by an analytical calculation.

Experiments on 1 meter long composite beams were carried out. Finite Element modeling of the trials have given information at a local level. Finally, this study allowed to conclude that normal stresses in both concrete and wood parts were negligible, whereas those of shear should be account for a structural design.

*MOTS-CLÉS :* structure bois, poutre mixte, retrait endogène, auto contraintes, cisaillement, béton à haute performance.

*KEY WORDS:* wood structure, composite beam, autogenous shrinkage, self stresses, shear stress, high performance concrete.

---

## 1. Contexte de l'étude

Les structures mixtes bois-béton sont adoptées pour la réalisation de planchers neufs ou réhabilités, mais aussi pour des tabliers de ponts en bois. Les technologies couramment rencontrées sont conçues sur le principe de connecteurs discrets s'opposant au cisaillement d'interface [GAT 01, WEA 04]. Ce principe présente toutefois une connexion imparfaite car un glissement d'interface est souvent observé, glissement devant être pris en compte dans la modélisation du comportement des structures [PHA 08, GIR 09]. Une solution alternative consiste à réaliser une solidarisation par collage, dont l'avantage est de réaliser une connexion complète sans glissement avec une bonne tenue en fatigue [PHA 08, LER 09]. Elle a consisté dans l'étude de Pham [BRE 07, PHA 08, BEN 11] à coller sur la structure en bois une dalle mince en béton fibré ultraperformant durcie avec une colle structurale époxy. Des expérimentations récentes ont montré que ce type de liaison résiste bien aux variations hydriques du bois, moyennant quelques précautions d'ordre technologique [LOU 11].

La présente étude porte sur des vérifications d'une variante prometteuse. Celle-ci consiste à couler le béton frais sur la colle fraîche, selon le principe qui peut s'appeler « collage frais sur frais » [BRU 07]. La méthode présente au moins deux avantages : elle permet de s'affranchir des défauts géométriques des deux matériaux, ce qui conduit à une importante économie de colle, puisque l'épaisseur de celle-ci peut être bien contrôlée, et elle autorise une mise en œuvre aisée, laquelle peut se pratiquer aussi bien sur chantier qu'en usine. Cependant, pour valider cette méthode attractive, il est nécessaire d'évaluer les effets du retrait accompagnant le durcissement du béton, ainsi que ceux liés à la différence de cinétique de durcissement de la colle et du béton.

L'étude présentée dans cet article se concentre sur l'effet du retrait endogène du béton sur les contraintes d'interface au jeune âge entre le bois et le béton. Des expériences sur des poutrelles de 1 mètre ont été conduites avec deux types de béton, différant l'un de l'autre par leur résistance et leur cinétique de durcissement. Une modélisation par éléments finis accompagne ces essais en fournissant des informations locales au niveau des interfaces.

## 2. Plan expérimental et matériaux

Le programme expérimental est composé de mesures de déformations de poutres mixtes, d'essais de flexion 4 points et de mesures de retrait endogène sur les bétons.

Les essais de retrait sont effectués sur des éprouvettes 4×4×16 suivant le mode opératoire conforme à la norme NF EN 1367-4, à la seule différence qu'elles sont protégées de la dessiccation par un revêtement en aluminium autocollant.

*Auto contraintes dues au retrait endogène dans une structure mixte bois-béton assemblée par collage  
« frais sur frais »*

Les effets du retrait sont réalisés sur des poutrelles mixtes bois-béton de section rectangulaire de 9 cm de largeur, 13,2 cm d'épaisseur de bois et 6 cm d'épaisseur de béton pour une longueur de 1 m. Les mesures de déformation sont effectuées en partie médiane par l'intermédiaire d'un dilatomètre à billes en 5 points de la section de bois et 2 points de la partie béton pour le BHP. La précision de la mesure est de 1  $\mu\text{m}$ .

Les mesures de résistance en flexion ont été conduites sur une presse Instron électromécanique de capacité de 100 kN. Les corps d'épreuve sont des poutrelles de 0,8 m de longueur, pour une hauteur de bois de 9 cm, une largeur 4,5 cm, une épaisseur de béton de 4 cm pour le BHP et de 3 cm pour le BFUP. L'expérimentation a été effectuée sur des essais de flexion 4 points, ces derniers étant équidistants de 22 cm.

Le BHP, dont le diamètre maximal des granulats est de 5 mm, a été formulé avec le logiciel Bétonlab avec l'objectif d'atteindre une résistance moyenne à 28 jours de 100 MPa et un module d'Young proche de 50 GPa. Le BFUP est de type Ductal avec fibres métalliques. L'assemblage entre bois et béton est réalisé par un adhésif structural à base de résine époxy. Le coulage du béton sur la colle est effectué environ une demi-heure après l'application de la colle sur le bois. Le comportement au jeune âge de la colle n'a pas été étudié dans le cadre de cette étude. En fonction des informations fournies par le fabricant nous considérons que la colle peut mobiliser des contraintes de cisaillement au minimum 10 heures après son mélange dans une ambiance à 20°C. Le bois est prélevé d'une poutre en lamellé collé en épicea de classe GL 28.

### **3. Résultats expérimentaux**

#### **3.1. Retrait endogène**

Les résultats sont affichés sur la figure 1. Les points de mesure sont échelonnés sur une faible durée, mais ils sont néanmoins peu dispersés. Les valeurs extrapolées pour le BFUP sont conformes, tout en étant légèrement supérieures, aux résultats de la littérature et à celles obtenues par ailleurs par le laboratoire Ifsttar sur des bétons de cette catégorie. De plus les simulations sont effectuées pour une échéance maximale de 200 heures. L'extrapolation permet de distinguer nettement les 2 comportements des bétons. Les courbes de retrait sont en effet bien distinctes en termes d'amplitude et de cinétique. Les âges du départ des déformations sont aussi très différents, i.e. 3 heures pour le BFUP et 22 heures pour le BHP. La cinétique de retrait endogène est très rapide pour le BFUP. Cela apporte une incertitude dans le calcul des déformations de la poutre mixte, pour lequel il ne nous faut considérer que la part de retrait produite postérieurement au durcissement de la colle. Les différences de cinétique et d'amplitude de retrait endogène des bétons sont cependant très intéressantes dans l'optique d'observer les conséquences, sur le comportement à vide des poutrelles, de l'effet conjugué du durcissement de la colle et du béton

### 3.2. Déformation des poutrelles

Les déformations des poutrelles ont été suivies pendant quelques centaines d'heures. Les figures 2 et 3 montrent un exemple de données obtenues sur les 2 échantillons aux échéances de 100 heures et de 200 heures. On constate que le retrait produit comme prévu une mise en flexion de la poutre. Le retrait du béton étant gêné, celui-ci se trouve être soumis à un effort normal de traction, tandis que le bois est comprimé sous l'effet d'un effort normal d'intensité identique au précédent. La courbure apparaît du fait de l'excentrement de résultante de traction du béton. De plus, cette courbure amplifie la déformation du béton en fibre supérieure, laquelle devient dans le cas présent légèrement supérieure à la part de retrait libre considérée à la même échéance.

La géométrie des poutres a été choisie pour que le centre de gravité de la section se situe au niveau de l'interface entre le bois et le béton, soit à 6 cm de la face supérieure. Les mesures des figures 2 et 3 donnent, de manière prévisible, une fibre moyenne située plus bas, entre 10 cm et 12 cm de la face supérieure de la poutre à l'échéance de 100 heures.

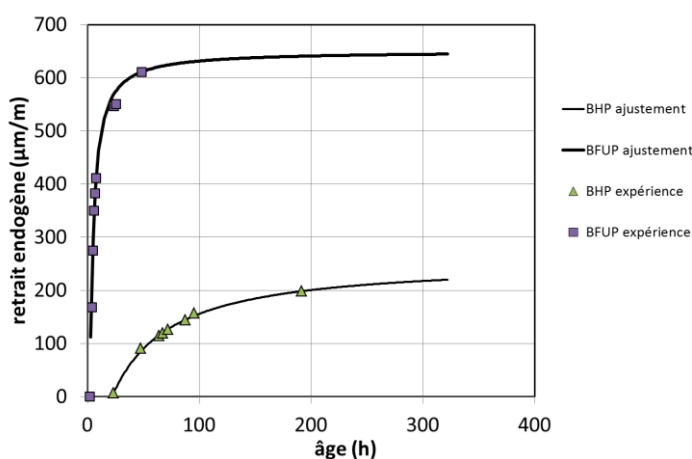


Figure 1. Evolution du retrait endogène des 2 bétons et courbes d'ajustement.

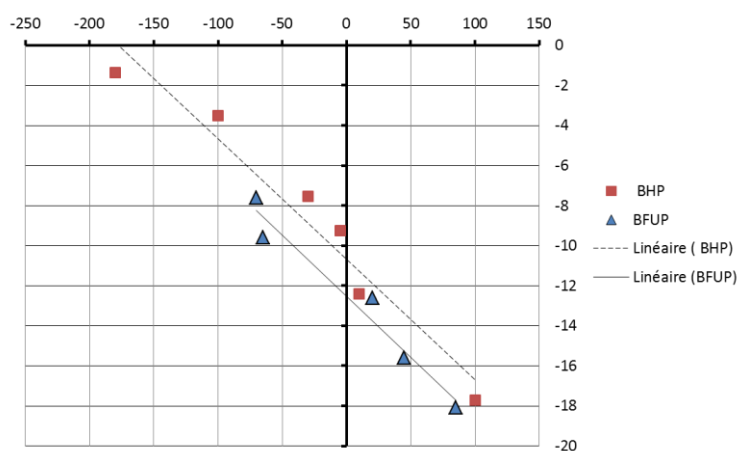
### 4. Analyses analytique et numérique des effets du retrait

Une modélisation élaborée demanderait d'une part de considérer la loi de comportement rhéologique du béton et de la colle en cours de durcissement, avec prise en compte des effets de fluage vieillissant, et d'autre part de tenir compte de la cinétique de développement du retrait. Nous proposons ici une première approche plus simple.

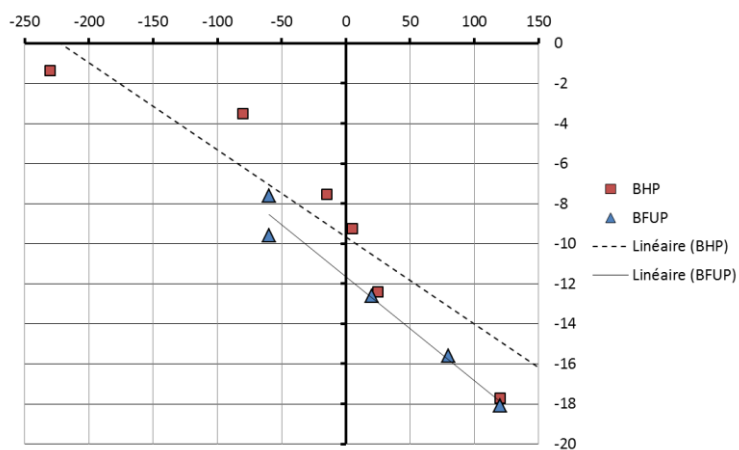
*Auto contraintes dues au retrait endogène dans une structure mixte bois-béton assemblée par collage*  
*« frais sur frais »*

#### 4.1. Modèle du bilame

Le modèle du bilame est traité dans la littérature, par exemple par Timoshenko [TIM 90], pour résoudre les problèmes de déformations d'une structure mixte sous l'effet de variations de température, ce que nous pourrions faire pour notre problème. Ici nous adaptons l'approche pour calculer les effets mécaniques du retrait endogène du béton. Considérant un comportement élastique linéaire des matériaux et imposant une amplitude de retrait au béton, nous sommes en mesure de calculer les déformations et les contraintes en tous points à partir de l'équilibre des sections. Les paramètres sont définis sur la figure 4.



**Figure 2.** Déformations de la section médiane à l'âge de 100 heures.



**Figure 3.** Déformations de la section médiane à l'âge de 200 heures.

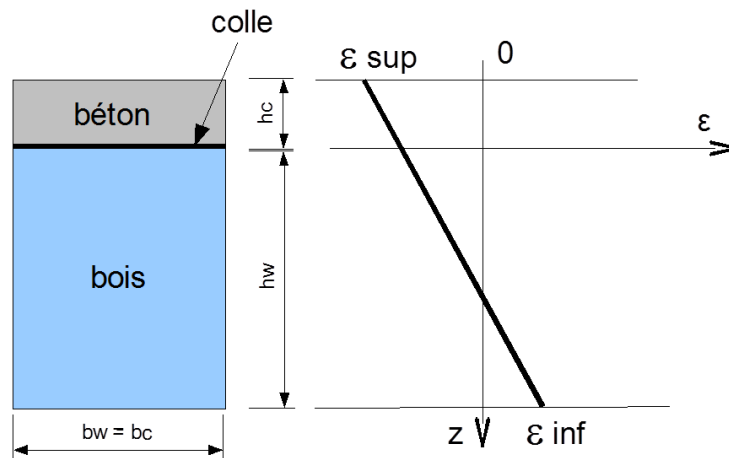
Considérons  $N_c$ ,  $N_w$ ,  $M_c$ ,  $M_w$ ,  $E_c$ ,  $E_w$ , respectivement les efforts normaux, les moments fléchissants et les modules d'Young du béton et du bois,  $R$  la courbure de la poutre et  $\varepsilon_r$ , l'amplitude de retrait endogène du béton produit à partir du durcissement de l'adhésif. En écrivant que les efforts normaux sont égaux en amplitude dans le béton et le bois, qu'il y a absence de glissement à l'interface et que la somme des moments dans le bois et le béton est égale au moment provoqué par les 2 efforts normaux, nous obtenons les équations suivantes :

$$N_c = N_w = N$$

$$-\varepsilon_r + \frac{N_c}{E_c b_c h_c} + \frac{h_c}{2R} = -\frac{N_w}{E_w b_w h_w} - \frac{h_w}{2R}$$

$$N \left( \frac{h_c + h_w}{2} \right) = M_c + M_w \text{ et}$$

$$M_w = \frac{E_w I_w}{R}, \quad M_c = \frac{E_c I_c}{R}$$



**Figure 4.** Définition des paramètres et déformation d'une section de la poutre.

La résolution de ce système d'équations nous donne l'ensemble des informations de déformations et de contraintes normales dans la section. Les déformations pour les échéances de 100 heures et 200 heures sont données dans les tableaux 1 et 2 et comparées aux mesures. Les prévisions du modèle sont assez proches des valeurs expérimentales du béton. Le modèle sous-estime cependant de plus de 50% les déformations du bois. Les simulations montrent par ailleurs que les déformations

*Auto contraintes dues au retrait endogène dans une structure mixte bois-béton assemblée par collage « frais sur frais »*

sont assez peu sensibles aux valeurs des modules d'Young, ce qui écarte l'hypothèse d'un mauvais jeu de données. Nous pouvons simplement avancer que les différences proviennent à la fois de la dispersion des mesures et de la simplicité du modèle au regard de la complexité des phénomènes en jeu.

Par ailleurs, bien que les valeurs de retrait pris en compte pour les 2 bétons soient très différentes, les déformations de la poutre « BFUP » sont assez proches de celles « BHP », et ce malgré un écart important d'amplitude de retrait. Autrement dit, la part de retrait endogène produite par le BFUP avant durcissement de la colle peut se déduire de la part de retrait à prendre en compte, ce qui est bénéfique vis-à-vis des déformations liées aux autocontraintes. En prenant en compte les valeurs expérimentales de retrait dans leur ensemble, les contraintes maximales théoriques dans le bois et le béton sont respectivement de 2 MPa en traction et 7 MPa en compression. Bien que faibles, ces contraintes seraient à prendre en compte dans un dimensionnement aux ELU.

échéance (h)	ordonnée (cm)	déformations expérimentales sur poutre ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	delta retrait expérimental béton ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	modèle bilame ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )
100	0	-224	-170	-188
	-0,19	141		61
200	0	-224	-177	-198
	-0,19	141		64

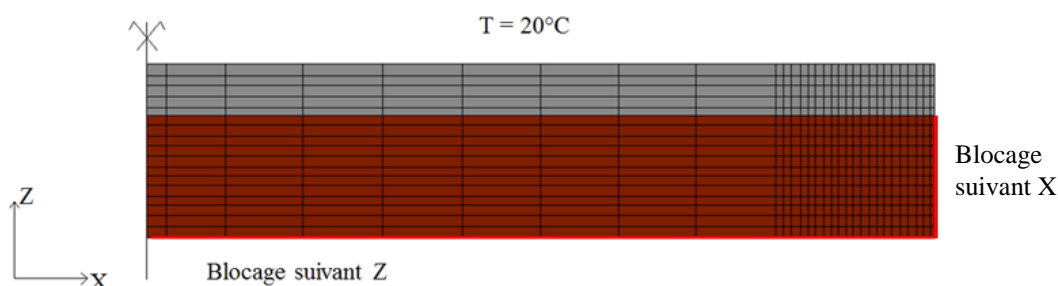
**Tableau 1.** *BFUP. Comparaison des déformations aux fibres extrêmes de la section médiane et comparaison avec le modèle analytique.*

échéance (h)	ordonnée (cm)	déformations expérimentales sur poutre ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	delta retrait expérimental béton ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	modèle bilame ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )
100	0	-177	-156	-173
	-0,19	138		56
200	0	-226	-178	-223
	-0,18	177		72

**Tableau 2.** *BHP. Comparaison des déformations aux fibres extrêmes de la section médiane et comparaison avec le modèle analytique.*

## 5. Analyse numérique

Une analyse numérique aux éléments finis a été effectuée à l'aide du logiciel CESAR-LCPC dans le but d'évaluer les contraintes de cisaillement d'interface, contraintes qui devraient naître aux extrémités du corps d'épreuve. Un calcul thermomécanique est effectué de manière découplée. La modélisation en thermique est tout d'abord réalisée dans son ensemble. La modélisation mécanique qui suit, vient lire les résultats du calcul thermique et s'en sert pour obtenir l'état des contraintes dans la structure. Par symétrie, seule une moitié de la poutre est modélisée. Des éléments quadratiques Quad8 ont été utilisés pour le maillage, avec raffinement de celui-ci aux bords. Sur la figure 5, la partie grise, correspondant au béton, est bloquée horizontalement de  $t=0$  à  $t=12h$ , pendant le maintien du coffrage, puis débloquée à partir de  $t=12h$ , au décoffrage. L'interface entre béton et bois est représentée par un élément colle d'épaisseur 2 mm.



**Figure 5.** Maillage retenu et conditions aux limites thermo-mécaniques après  $t=12h$

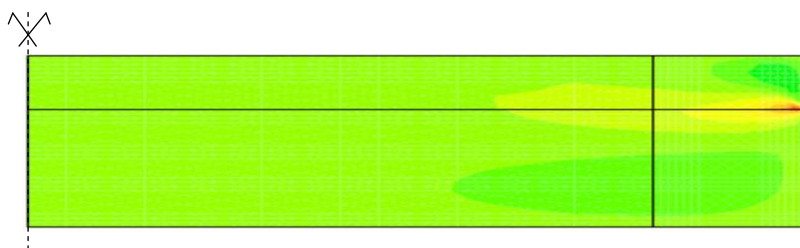
La modélisation a pris en compte le comportement anisotrope du bois et le vieillissement du béton (évolution temporelle du retrait, de l'exothermie et des propriétés mécaniques). Le comportement de l'adhésif a été considéré comme élastique linéaire, ce qui est évidemment une hypothèse forte. Mais ce calcul nous permet d'obtenir une valeur par excès des contraintes d'interface. Pour l'exemple donné sur la figure 6, nous pouvons constater l'apparition de cisaillement aux extrémités sous l'effet du retrait. Les contraintes de cisaillement théoriques dans le bois, l'ensemble du retrait ayant été pris en compte, sont de 0,28 MPa pour la poutre « BHP-bois » et de 0,64 MPa pour celle « BFUP-bois ». Cette dernière valeur est néanmoins surestimée du fait qu'une bonne partie du retrait endogène s'est déjà produite lorsque la colle s'est solidifiée. La contrainte de calcul en cisaillement du bois lamellé collé, selon la classe de résistance, la classe de service, et la durée de l'action considérée peut varier de 1 à 2 MPa environ. Cette contrainte calculée



*Auto contraintes dues au retrait endogène dans une structure mixte bois-béton assemblée par collage « frais sur frais »*

représente 14 % et 33% de la résistance de calcul du bois GL28 respectivement pour le BHP et pour le BFUP. La valeur de 33% est néanmoins surestimée pour les raisons évoquées plus haut.

Nous concluons que les valeurs calculées deviennent non négligeables au regard d'un dimensionnement et qu'une étude plus poussée mérite d'être menée pour affiner ces premiers résultats. Néanmoins, ceux-ci ne compromettent par autant le principe du collage « frais sur frais » car des dispositions constructives locales peuvent le cas échéant être appliquées aux extrémités pour reprendre ces concentrations de cisaillement.

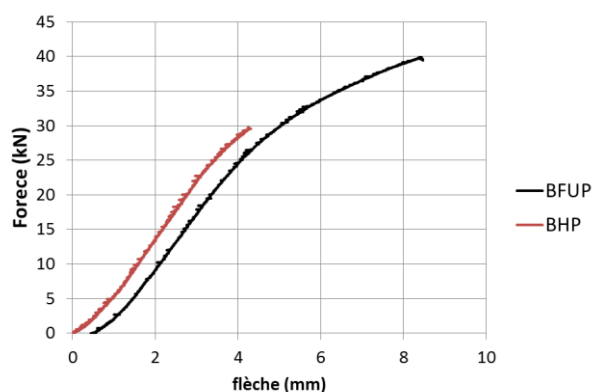


**Figure 6.** Contraintes de cisaillement l'interface sous l'effet du retrait du béton. Calcul CESAR-LCPC.

## 6. Essais de flexion

Afin de contrôler la résistance de l'assemblage, nous avons procédé à des essais de flexion 4 points conformes à ceux décrits dans le paragraphe 2. Les résultats sont affichés sur la figure 7. Les ruptures se sont produites à l'une des extrémités des poutres en cisaillement au niveau de l'interface, et ce pour les 2 corps d'épreuve, mais de manière cohésive, i.e. dans le bois. Autrement dit, aucune rupture au sein de la colle n'a été constatée. Les contraintes de cisaillement à rupture dans l'interface sont respectivement de 3,2 MPa pour la poutre « BHP » et de 6,2 MPa pour la poutre « BFUP ». Ce résultat est très intéressant car nous obtenons des performances aussi grandes que celles observées pour la thèse de Pham [Pham 08, Le Roy *et al.* 09], pour laquelle, le collage avait été réalisé à partir de dalles en BFUP déjà durcies.

Il apparaît par conséquent que les cinétiques de retrait et particulièrement l'échéance de départ du retrait n'a pas d'influence sur la performance mécanique de l'assemblage, même si la colle n'a pas encore durci au moment de la prise du béton.



**Figure 7.** Courbe force-flèche des essais de flexion 4 points.

## 7. Conclusions

A l'issue de cette étude, nous apportons une première validation de l'efficacité mécanique de l'assemblage d'une poutre mixte bois-béton par collage frais sur frais du béton sur un adhésif structural. Les contraintes normales provoquées par le retrait du béton sont mises en évidence, expérimentalement et théoriquement. Bien qu'assez faible en intensité, il convient d'en tenir compte dans un dimensionnement. Enfin, les différences de cinétiques entre le retrait (durcissement) du béton et le durcissement de l'adhésif ne compromettent pas la solidité de l'assemblage, et laisse donc une certaine latitude pour le choix des bétons pouvant être collés par cette méthode.

Des travaux théoriques sont à poursuivre pour prendre en compte le comportement rhéologique des matériaux, et en particulier les fluages avec vieillissement.

## 8. Bibliographie

- [BEN 11] BEN MEKKI O., TOUTLEMONDE F., "Experimental Validation of a 10-m-Span Composite UHPFRC–Carbon Fibers–Timber Bridge Concept", *Journal of Bridge Engineering ASCE* / January-February, 148-157, 2011.
- [BRE 07] LE ROY R., FORET G., PHAM H.S., Structure porteuse bois-béton, Brevet d'invention n°07 59320, numéro de publication internationale WO 2009/071832 A2,

*Auto contraintes dues au retrait endogène dans une structure mixte bois-béton assemblée par collage  
« frais sur frais »*

demandeurs : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2007.

[BRU 07] BRUNNER M., ROMER M., SCHNÜRIGER M., “Timber-concrete-composite with an adhesive connector (wet on wet process)”, *Materials and Structures*, 40:119–126, 2007

[GAT 01] GATTESCO N., “Experimental study on different dowel techniques for shear transfer in wood-concrete composite beams”, *Creative systems in Structural and Construction Engineering*, 2001.

[GIR 09] GIRHAMMAR U. A., "A simplified analysis method for composite beams with interlayer slip," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 51, pp. 515-530, 2009.

[LER 09] LE ROY R., PHAM H.S., FORET G., “New wood composite bridges”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol.13, n°9, pp. 1125-1139, 2009.

[LOU 11] LOULOU L., CARE S., LE ROY R., BORNERT M., F BERTRAND., CHATAIGNER S., B NEDJAR., « Etude de la durabilité des assemblages collés bois-béton soumis à des chargements hydriques », *20ème Congrès Français de Mécanique, Besançon*, 2011.

[PHA 08] PHAM H.S., *Optimisation et comportement en fatigue de la connexion bois-BFUP pour de nouveaux ponts mixtes*, thèse de l'ENPC, spécialité matériaux et structures, 2008.

[TIM 90] TIMOSHENKO S.P., *Résistance des matériaux*, tome 1, page 208, Dunod 1990, premier tirage édition américaine, *Strength of materials*, D. Van Nostrand Company, 1930.

[WEA 04] WEAVER C. A., DAVIDS W. G., DAGHER H. J., “Testing and analysis of partially composite fiber-reinforced polymer-glulam-concrete bridge girders”, *Journal of bridge engineering*, vol. 9, n°4, pp. 316-325., 2004.

Remerciements : les auteurs remercient la société SIKA pour son aide matérielle.