

# **Un connecteur innovateur pour garantir la ductilité des structures bois/béton**

**Samuel Cuerrier Auclair, Luca Sorelli, Alexander Salenikovich**

Département de génie civil, Université Laval, Québec, Canada

## **Résumé**

L'utilisation du bois dans la construction permet de réduire le poids des structures et d'améliorer l'empreinte écologique de ceux-ci, car le bois est considéré carboneutre, contrairement au béton et l'acier. Au Canada, les constructions en bois prennent de plus en plus d'importance dans le domaine de la construction non résidentielle. Cependant, le comportement fragile du bois freine les applications en génie civil. Dans ce contexte, il est primordial de trouver une solution pour que les structures de bois présentent un comportement structural ductile, car la ductilité permet la redistribution des efforts, d'augmenter la dissipation d'énergie en plus de donner des signes avant-coureurs de l'effondrement.

L'objectif principal du projet de recherche est double : (i) trouver un moyen d'assurer une rupture ductile des systèmes constructifs de poutres bois/béton ; (ii) développer un modèle numérique qui prédit le comportement d'une structure mixte en considérant la non-linéarité de la connexion et des matériaux.

Le modèle numérique développé a permis une compréhension approfondie des structures mixtes et du comportement d'un connecteur ponctuel. Avec le modèle, il est constaté que les connecteurs actuels ne sont pas conçus pour garantir une rupture ductile des poutres bois/béton. Il a donc été développé un nouveau type de connecteur bois/béton suffisamment rigide pour garantir une bonne action composite et ainsi réduire la flèche et suffisamment ductile avec une résistance modulable pour assurer une rupture ductile de la poutre. L'invention est protégée par un brevet provisoire pour permettre aux partenaires industriels d'innover les constructions mixtes au Québec.

Les résultats de projet vont permettre à l'ingénieur de réaliser une conception plus fiable des structures en bois/béton grâce à la rupture ductile de la poutre. Ce qui à long terme se traduira par de nouvelles applications en bois/béton dans le domaine de la construction au Québec.

## 1. Introduction

Les structures composites sont de plus en plus employées dans le domaine de la construction, car elles permettent d'aller chercher les forces de chacun des matériaux et optimiser les performances structurelles. Dans le cas plus particulier des structures bois/béton, le poids supplémentaire d'une dalle de béton sur une structure de bois est un bon moyen de diminuer sa fréquence de vibration. De plus, l'action composite du bois avec le béton est également un bon moyen de diminuer les flèches en plus de protéger le bois contre les intempéries.

Dans la dernière décennie, un nouveau connecteur nommé « HBV » a été développé par Bathon et al. [2] qui permet une forte action composite pour les structures bois/béton. Cependant, malgré que le connecteur présente un comportement ductile, le comportement de la poutre composite demeure fragile [1] puisque le bois rompt avant la plastification de la connexion.

Le but de cette recherche est donc de trouver un moyen d'assurer une rupture ductile d'une poutre composite bois/béton tout en ayant une bonne action composite.

## 2. Méthode d'analyse d'une poutre mixte

### 2.1 Hypothèse

À ce jour, plusieurs auteurs ont développé des méthodes pour considérer le comportement des poutres à action composite partielle [3,4] et quelques auteurs ont également proposé des méthodes pour tenir compte de la non-linéarité de la connexion entre le bois et le béton [3]. Les méthodes proposées sont développées suivant les hypothèses suivantes :

- 1- Chacune des couches de la poutre (bois et béton) suit la cinématique de la poutre Euler-Bernoulli, où celle-ci néglige les déformations de cisaillement.
- 2- Chacune des couches subit le même déplacement, la même rotation et la même courbure, ce qui veut dire qu'il n'a pas de décollement entre les deux matériaux.
- 3- La connexion d'interface (connexion entre le bois et le béton) est considérée continue le long de la poutre

En considérant les hypothèses énumérées, il est possible de définir 3 types d'action composite : totale, partielle ou nulle, tel que montré sur la figure 1.

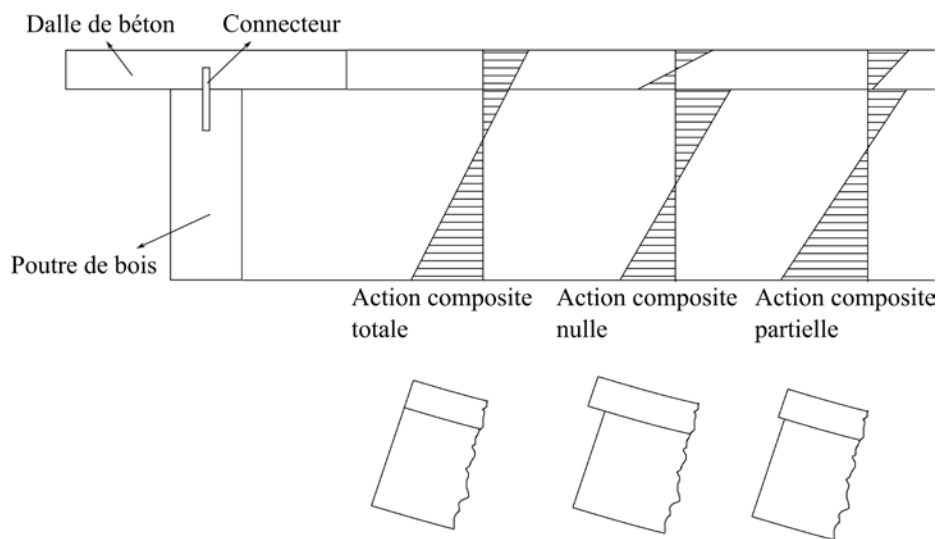


Figure 1: Type d'action composite

## 2.2 Modèle mathématique

Selon les hypothèses mentionnées, les équations gouvernantes (eqs. (1) et (2)) pour une poutre à action composite peuvent être développées par équilibre des forces et selon une cinématique de glissement qui est causée par la rotation de la poutre et par l'effort normal sur chacune des couches.

$$\frac{d^2}{dx^2} \left( EI_0 \frac{d^2 w(x)}{dx^2} + r \cdot N(x) \right) = q(x) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{1}{K} \frac{dN(x)}{dx} \right) - \frac{1}{EA^*} N(x) + r \frac{d^2 w(x)}{dx^2} = 0 \quad (2)$$

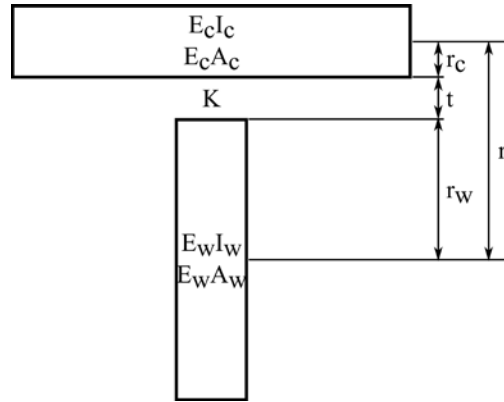


Figure 2 : Vue sectionnelle d'une poutre composite

Où,

$$EI_0 = E_c I_c + E_w I_w \quad (3)$$

$$EA^* = \left( \frac{1}{E_c A_c} + \frac{1}{E_w A_w} \right)^{-1} \quad (4)$$

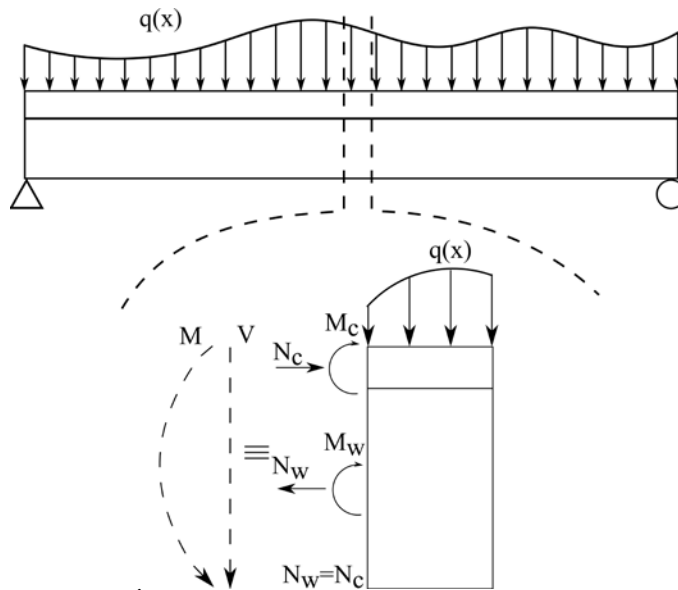


Figure 3: Équilibre des forces internes d'une poutre composite

Où  $E_c$  et  $E_w$  sont les modules de Young du béton et du bois respectivement;  $I_c$  et  $I_w$  sont les inerties flexionnelles de la section de béton et de bois respectivement;  $A_c$  et  $A_w$  sont les aires de la section de béton et de bois respectivement. À partir des équations (1) et (2), il est constaté qu'il a quatre variables qui gouverne le comportement d'une poutre composite, soit  $EI_0$ ,  $EA^*$ ,  $r$ ,  $K$ . Les trois premières variables concernent la géométrie de la poutre et les propriétés des matériaux utilisés, tandis que la dernière concerne la rigidité de la connexion. Avec une méthode numérique appropriée, telle que les méthodes des éléments finis, il est possible de résoudre les équations gouvernantes tout en considérant la fissuration du béton, le glissement entre le bois et le béton ainsi que la plastification des connecteurs.

### 2.3 Modèle à trois étapes

Le modèle à trois étapes permet de prédire le comportement d'une structure composite directement à partir de la géométrie de la poutre composite et du connecteur ponctuel utilisé. Il devient donc possible de prévoir et de garantir la ductilité désirée de la structure. Les deux premières étapes servent à prévoir de comportement du connecteur en cisaillement direct, tandis que la dernière sert à prévoir le comportement structurel de la poutre composite.

#### 2.3.1 Étape 1 : Détermination de la relation moment-courbure du connecteur

Selon une géométrie sectionnelle du connecteur, il est possible de trouver la relation moment-courbure par équilibre du moment et des forces. La figure 4 présente la procédure visuelle, inspirée par Paultre [5], pour trouver cette relation.

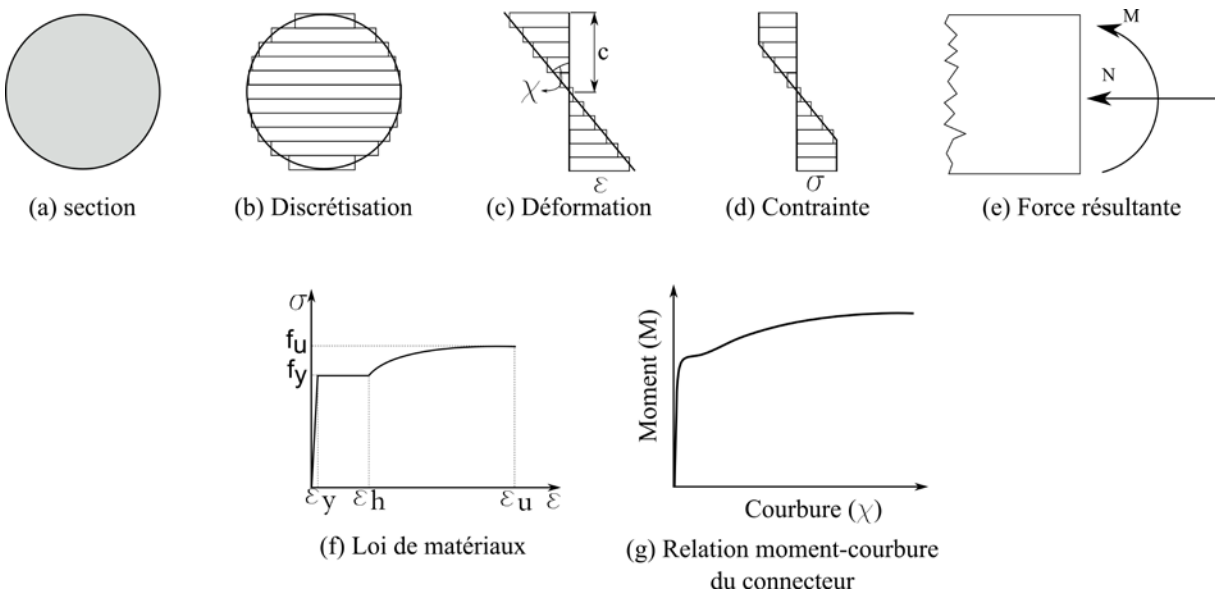


Figure 4: Procédure visuelle pour déterminer la relation moment-courbure du connecteur (étape 1)

Une fois l'étape 1 terminée, la relation moment-courbure du connecteur peut être rapportée sur graphique tel qu'observée sur la figure 4 (g).

#### 2.3.2 Étape 2 : Détermination de la loi du connecteur

Une fois que la relation moment-courbure d'un connecteur est connue, l'étape 2 nous permet de calculer la loi de connecteur, c'est-à-dire la relation entre la force de cisaillement et le glissement. Gelfi et al. [6] propose une méthode pour calculer la rigidité du connecteur et sa

résistance maximale. En utilisant le fondement de sa méthode, tel que présenter sur la figure 5, il est possible de généraliser sa méthode à une relation non linéaire et ainsi calculer la loi du connecteur. Le connecteur fléchi comme une poutre Euler-Bernoulli sur une fondation élastique telle que le béton ou le bois. La rigidité élastique du bois et du béton est facilement déterminée par des essais en laboratoire. Donc, en connaissant la relation moment-courbure du connecteur, la rigidité des fondations élastique ( $k_c$  et  $k_w$ ) et la profondeur du connecteur dans le bois et le béton, il est possible de calculer la relation entre la force de cisaillement et le glissement ( $V-s$ ).

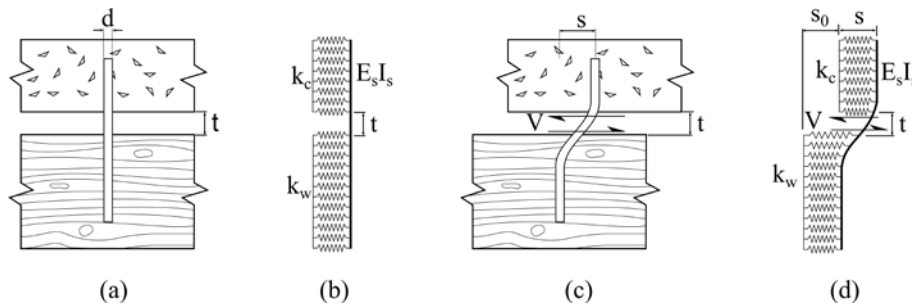


Figure 5: Procédure visuelle pour trouver la loi du connecteur (étape 2)

### 2.3.3 Étape 3 : Comportement structurel

À partir de la géométrie de la poutre et du positionnement des connecteurs, la 3<sup>e</sup> étape permet de prédire le comportement structurel de la poutre avec les équations d'une poutre composite (eqs. (2) et (3)). La solution de ces 2 équations différentielles couplées permet de calculer la déformation de la poutre selon la charge qu'elle subit et ainsi prédire sa ductilité. Le modèle a été implémenté dans un logiciel d'éléments finis et est disponible pour supporter l'analyse et la conception avancée de structures mixtes [7]. Ce logiciel permet également de considérer la non-linéarité du béton due à la fissuration.

Le modèle unifiant les trois étapes mentionnées a été validé avec des résultats publiés en littérature sur plusieurs poutres mixtes bois-béton avec connecteurs d'acier de différents diamètres et espacement. Les résultats montrent clairement qu'il est très difficile de garantir une rupture ductile des structures composites bois-béton avec les connecteurs d'acier actuel tout gardant une bonne action composite. La raison est simple : lorsqu'on veut une bonne action composite, l'espacement des connecteurs doit être très petit puisque la rigidité d'un seul connecteur est plutôt faible. La conséquence est que les connecteurs ne plastifieront pas (car leur résistance est trop élevée) et la rupture de la structure demeure fragile puisque ce sera la poutre de bois qui va atteindre sa résistance maximale en premier.

## 3. Nouveau connecteur ductile en béton BFUP armé

La clé pour garantir une rupture ductile avec une bonne action composite est d'avoir un connecteur qui présente une bonne rigidité avec une résistance ciblée de sorte qu'on s'assure que le connecteur plastifie avant la rupture du bois et ainsi développer un minimum de ductilité structurelle. Pour y arriver de façon systématique, un nouveau connecteur a donc été inventé. Ce connecteur est composé de béton fibré à ultra-hautes performances et d'un cœur d'acier comme il est montré sur la figure 6.

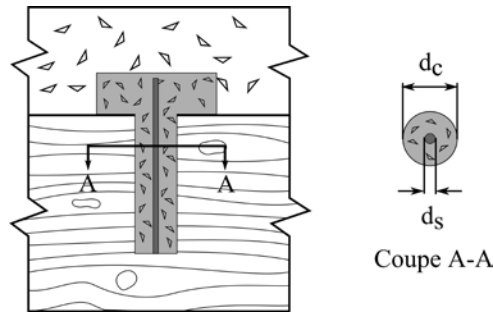


Figure 6: Géométrie du connecteur

Ce connecteur présente deux avantages: (1) une bonne rigidité grâce à son fort diamètre de la couronne de BFUP ( $d_c$ ); (2) une résistance qui peut être facilement calibrée grâce au diamètre de la tige d'acier ( $d_s$ ). Ce connecteur permet d'avoir une bonne action composite tout en garantissant une rupture ductile de la structure, puisqu'il devient possible de garantir que les connecteurs se plastifieront avant la rupture du bois en ciblant la résistance nécessaire pour le connecteur. Autrement dit, le diamètre de la couronne de BFUP gouverne la rigidité du connecteur qui à son tour gouverne la flèche maximale en service de la structure. Le diamètre du cœur d'acier gouverne la résistance à rupture du connecteur qui à son tour gouverne la ductilité de la structure. Le connecteur a été protégé par un brevet pour permettre aux partenaires industriels d'exploiter ces potentiels.

#### 4. Résultats

Le comportement du connecteur présenté a été testé par plusieurs essais de cisaillement en laboratoire avec plusieurs combinaisons du diamètre de couronne de BFUP ( $d_c$ ) et du diamètre de la tige d'acier ( $d_s$ ). Ces combinaisons ont été déterminées par des essais numériques en se basant sur la méthode à trois étapes, où cette méthode a été validée ultérieurement avec le comportement expérimental du connecteur.

La figure 7 présente le résultat expérimental d'un essai de cisaillement direct dont les dimensions sont :  $d_c = 25$  mm,  $d_s = 10$  mm et une profondeur dans le bois de 120 mm. Sur cet essai, on constate que le connecteur présente une bonne rigidité en plus de présenter une bonne ductilité.

À titre d'exemple, la figure 8 montre comment le modèle développé permet de concevoir la poutre mixte bois-béton avec une rupture ductile. Le bon choix du connecteur permet de garantir un minimum de ductilité structurelle tout en gardant un très bon comportement en service. Le gain en ductilité et sécurité de la structure peut être garanti systématiquement en choisissant les dimensions de son connecteur judicieusement.

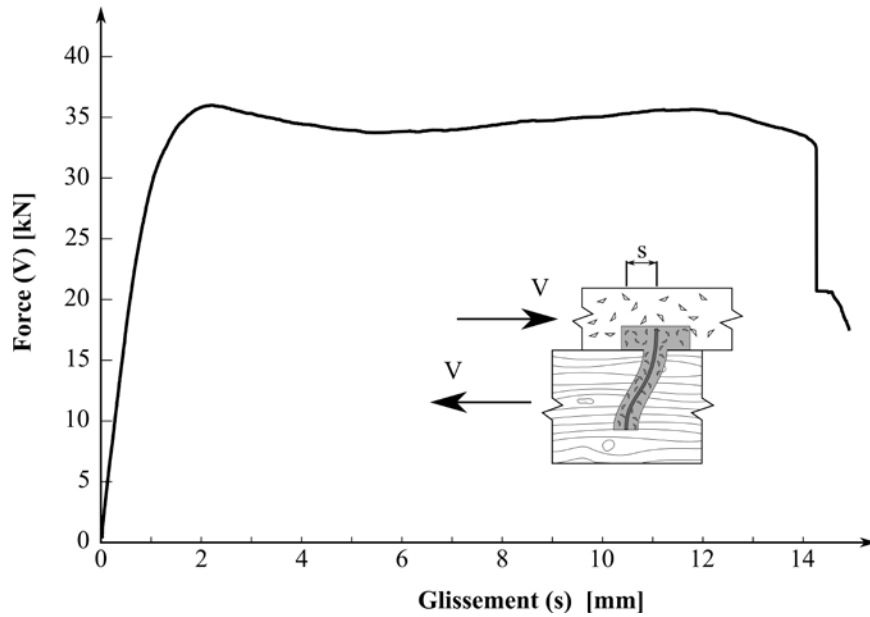


Figure 7: Essai de cisaillement direct

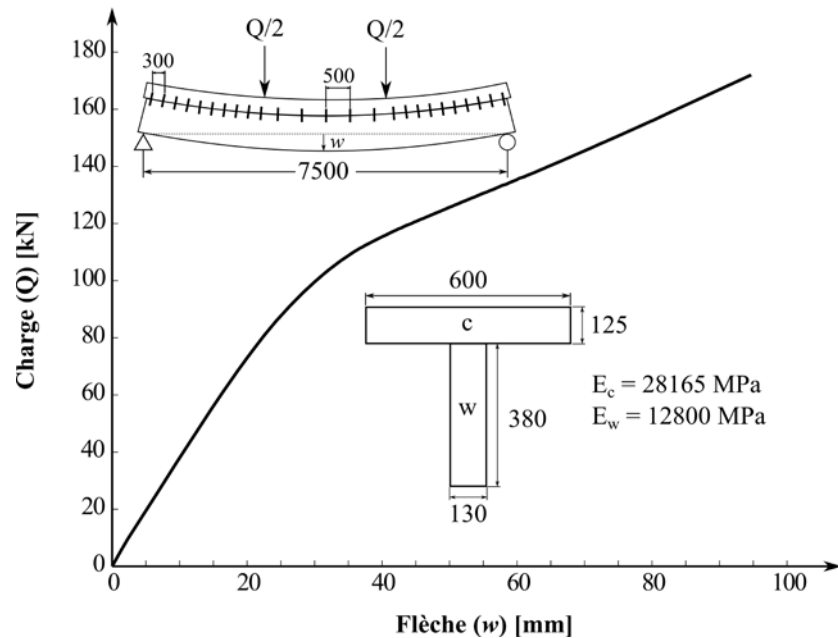


Figure 8: Essai de flexion numérique avec le nouveau connecteur

## 5. Conclusion

Dans ce travail, on a avancé l'analyse des structures mixtes bois-béton et développé un nouveau connecteur composite en BFUP/acier pour garantir une conception plus fiable. Les résultats présentés montrent :

- (1) D'un point de vue de la construction, un nouveau connecteur en BFUP/acier a été développé, où il est possible de calibrer sa rigidité et sa résistance à partir des diamètres de la couronne de béton et de la tige d'acier;

- (2) D'un point de vue de l'analyse, un nouvel outil de calcul a été développé pour garantir la ductilité d'une structure mixte bois/béton en tout gardant une bonne action composite en considérant directement le comportement de la connexion;
- (3) D'un point de vue de la conception, une nouvelle approche de type « capacity design » a été développée pour les structures mixtes. Avec cette méthode, l'ingénieur peut choisir le connecteur avec une rigidité et résistance qui garantit une flèche réduite en service et une rupture ductile et fiable de la structure à l'ultime.

Les travaux courants visent à développer cette approche de conception en plus de développer le nouveau connecteur pour les applications de points pour des planchers de bâtiments et pour des poutres de pont en considérant la fatigue et le fluage.

## **Bibliographie**

- [1] L. A. Bathon et M. Graf, «A continuous wood-concrete composite system,» chez *Proc., World conference of timber engineering*, Whistler, B.C., 2000.
- [2] L. A. Bathon, O. Bletz et R. Bahmer, «Concrete bearings - a new design approach in wood-concrete-composite applications,» chez *Proc. of the 10th World Conference on Timber Engineering*, Portland, Oregon, USA, 2006.
- [3] N. Newmark, C. Siess et I. Viest, «Test and analysis of composite beams incomplete interaction,» *Proceedings of Society for Experimental Stress and Analysis*, pp. 9(1) , 75 - 92, 1951.
- [4] H. Granholm, «Composite beams and columns with particular regard to nailed timber structures,» *Technical Report 88. Sweden: Chalmers University of Technologie*, pp. 214 - , 1949.
- [5] P. Paultre, *Strucutre en béton armé : Analyse et dimensionnement*, Presses Internationales Polytechniques, 2011.
- [6] P. Gelfi, E. Giuriani et A. Marini, «Stud shear connection design for composite concrete slab and wood beams,» *Journal of Structural Engineering*, vol. 128, n° %112, pp. 1544 - 1550, 2002.
- [7] L. Sorelli, «DDuctile-TCS(R) - Université Laval(C)» 2014. [En ligne]. Disponible: <http://www.gci.ulaval.ca/DDuctileTCS/>. [Accès le 24 04 2015].