

Mécanique de l'endommagement quasi-fragile comme nouvelle approche R&D des produits de la construction : application à un système innovant de plancher mixte bois-béton

SIBE Dimitri¹, COUREAU Jean-Luc², GALIMARD Philippe², CHAPLAIN Myriam²,
LAFARGUE Sylvain³

¹I2M – Entreprise Lamécol - Groupe DL

²I2M – Université de Bordeaux

³Entreprise Lamécol- Groupe DL

dimitri.sibe@u-bordeaux.fr

Mots clefs : Bois-Béton ; Pin Maritime ; Connexions ; Lamellé-collé ; Mixte ; Endommagement ; Fissuration ; Rupture

Contexte et objectifs

Enjeu industriel

Le projet BBLAM (Bois Béton Lamécol) vise à innover dans le domaine des planchers mixtes bois-béton en développant des outils de production avancés pour Lamécol, entreprise de construction bois basé en Gironde. Centré sur le Pin Maritime Lamellé-Collé (PMLC) à plat, l'objectif est de développer un système constructif préfabriqué en filière sèche démontable et d'optimiser les connexions bois-béton sans acier, adaptées aux sollicitations de cisaillement et traction. L'entreprise ambitionne de déposer une ATEX du système constructif.

Enjeux scientifiques et objectifs

La thèse vise à appliquer la mécanique de l'endommagement continu pour comprendre la cinétique de rupture dans les planchers mixtes. Le concept vise à fiabiliser les modèles numériques réduisant ainsi les campagnes expérimentales. En prenant en compte ses performances mécaniques, le potentiel du pin maritime (Moreau 2010) sera valorisé pour concevoir des solutions constructives performantes et durables.

La thèse s'articule sur trois axes :

1. Jumeau numérique : développement d'un modèle avancé basé sur l'endommagement anisotrope (Rebhi 2024), intégrant variabilité spatiale des défauts et comportement quasi-fragile du bois et du béton.
2. Connexion composite : optimisation de forme d'une entaille PMLC-béton sans acier, caractérisée par un couplage modèle-essais sous sollicitations combinées, intégrant l'effet de système du PMLC à plat.
3. Transfert industriel : valorisation du jumeau numérique et des modèles quasi-fragiles, analyse de sensibilité (feu, hygrométrie, thermique, fluage) pour prendre en compte la variabilité des matériaux mise en jeu, pour un produit démontable permettant l'obtention d'un ATEX.

Méthode

La thèse combine modélisation et essais pour développer un jumeau numérique des systèmes bois-béton, permettant de suivre fissuration, déformations et rupture tout en intégrant variabilité et anisotropie des matériaux. Les modèles d'endommagement quasi-fragile (La Borderie 1991)

(Sandhaas et Van de Kuilen 2013) sont mobilisés pour améliorer la prédiction et réduire les campagnes expérimentales. La validation du système repose sur des essais ciblés (cisaillement, traction transversale, flexion), avec un nouveau protocole pour sollicitations combinées. Une approche basée sur le changement d'échelle avec un enrichissement modèle-essais est adoptée : locale (connexion bois-béton), produit (poutres) et structure (plancher complet intégré à une structure). L'effet de système du PMLC, basé sur R. Loko (Loko 2023), sera évalué par simulations et essais pour optimiser conception et performance.

Premiers résultats – Jumeau numérique

Un premier jumeau numérique a été développé sous Cast3M (CEA 2024), en déformations planes, afin d'obtenir une première représentation simplifiée du comportement bois-béton. Les premiers modèles portent sur une connexion type queue d'aronde inclinée (20°).

Afin de se rapprocher de la norme XP CEN/TS 19103 (Afnor 2022), différents dispositifs ont été évalués : l'essai de flexion trois points (cisaillement constant) ainsi que plusieurs configurations de push-out avec conditions limites variées. La configuration finalement retenue est un essai push-out asymétrique confiné (Fig. 1) dont la raideur calculée K_s s'écarte de moins de 8 % de celle obtenue en flexion. Étant donné l'importance des conditions limites dans la conception des essais, un premier essai de traction a par ailleurs été développé (Fig. 2). Il vise à mieux caractériser les mécanismes de rupture en sollicitation transversale de la connexion, susceptibles d'influencer la raideur des connecteurs à court et long terme.

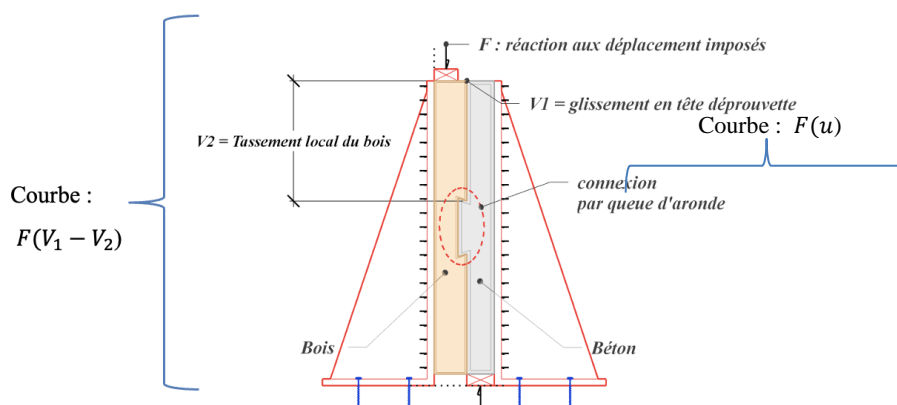


Fig. 1 : Essais push-out asymétrique confiné

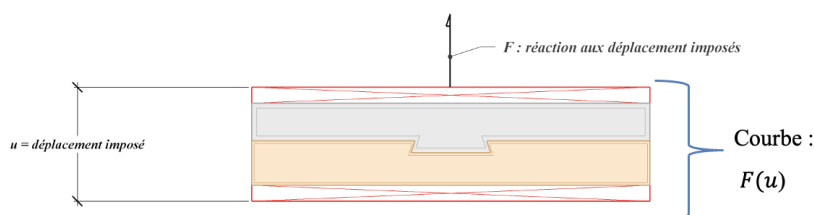


Fig. 2 : Essais de traction

Les modèles d'endommagement implémentés permettent de suivre la dégradation progressive des matériaux dans le volume de l'assemblage. Les grandeurs analysées sont : déplacement imposé, force normalisée par rapport au pic, endommagement du béton et du bois (axes longitudinal et transversal), exprimés en % de leur maximum, et la vitesse instantanée d'évolution du volume endommagé, afin de caractériser la cinétique de rupture (Fig. 3).

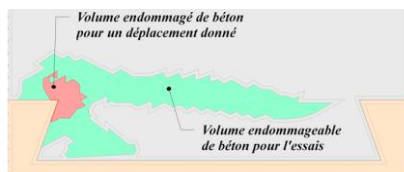


Fig. 3 : Volume de béton endommagé et endommageable de béton dans un essai de cisaillement

Résultats pour l'essai de traction numérique

Béton : endommagement très rapide dès 7 % du déplacement maximal (A). Sa progression ralentit ensuite jusqu'à atteindre un plateau vers 25 % du déplacement (B), avec environ 65 % de volume affectée au pic de force.

Bois selon axe transversal : il amorce aussi sa dégradation tôt (7 % du déplacement) (A), mais de manière très limitée. Au pic, seule 10 % du volume endommageable est touchée. Cette progression tend vers un plateau atteint à la séparation du bois-béton.

Bois longitudinal : il ne s'endommage qu'à partir de 20 % (C). Sa dégradation progresse par écrasement jusqu'à un premier plateau vers 65 % du déplacement avec 60 % de volume endommagé (D), puis augmente brutalement à 100 % à l'approche de la séparation bois-béton (E) (Fig. 3).

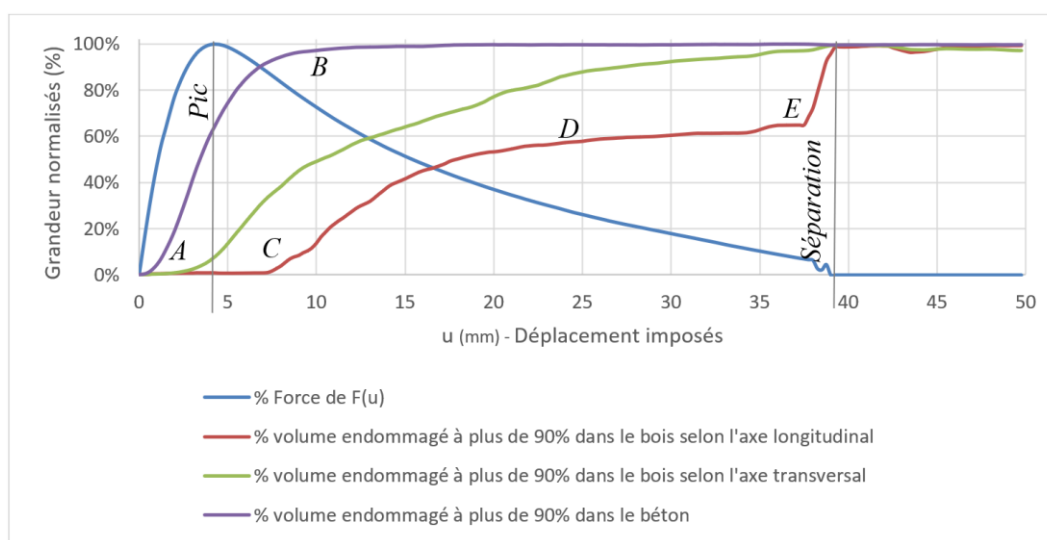


Fig. 4 : suivi de la force et des volumes endommagés dans un essai de traction entre du bois et du béton en fonction du déplacement imposé

Résultats pour l'essai de cisaillement confiné numérique

Béton : endommagement précoce, rapide progression à l'approche du pic avec 55 % de volume endommagé. Puis stabilisation à 50 % du déplacement (A)

Bois longitudinal : Amorce au pic. Progression brutale jusqu'à 60 % de déplacement, avec 90 % de volume endommagé (B). On observe une stabilisation simultanée à l'endommagement selon l'axe transversale.

Bois transversal : 44 % de surface endommagée au pic, puis poursuite jusqu'à 90 % de volume endommagé pour 60 % du déplacement (B). (Fig. 4)

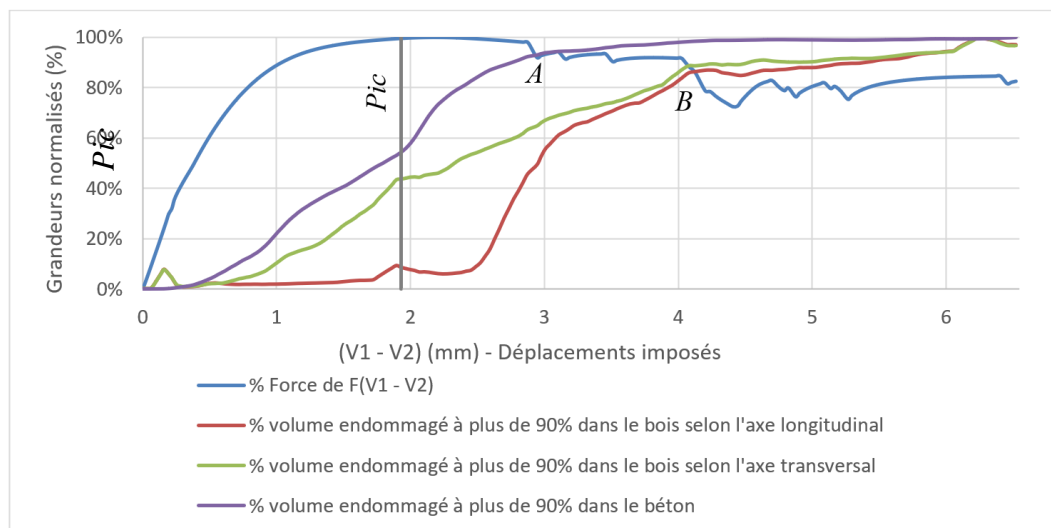


Fig. 5 : Suivi de la force et des volumes endommagés dans un essai de cisaillement entre du bois et du béton en fonction du déplacement imposé

Conclusion et perspectives

Le projet BBLAM montre que l'intégration de la mécanique de l'endommagement permet de fiabiliser la conception des planchers mixtes bois-béton et de réduire les campagnes expérimentales. Les premiers résultats du jumeau numérique mettent en évidence la progression de l'endommagement du bois et du béton selon différentes sollicitations, offrant une meilleure compréhension des mécanismes de rupture. Cette approche favorise l'optimisation de la connexion sans acier et accélère le transfert industriel vers des systèmes constructifs innovants, durables et modulables.

Remerciement

Nous tenons à remercier l'Agence Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) pour son soutien financier dans le cadre d'une convention CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche)

Références

- Adjovi Loko RA (2023) Valorisation d'une ressource pin maritime par des composites bois lamellé-collé (BLC). Thèse de l'Université de Bordeaux, 254 p.
- Afnor (2022) XP CEN/TS 19103 : Eurocode 5 : conception et calcul des structures en bois - Calcul des structures mixtes bois-béton - Règles communes et règles pour les bâtiments.
- CEA (2024) Cast3M. (Logiciel de simulation par éléments finis, version 2024).
- La Borderie C (1991) Phénomènes unilatéraux dans un matériau endommageable : modélisation et application à l'analyse des structures en béton. Thèse de l'Univ. Paris 6, 184 p.
- Moreau PJ (2010) Impact de pratiques sylvicoles intensives sur les propriétés du bois de pin maritime. Thèse de l'Université de Bordeaux, 254 p.
- Rebhi A (2024) Modélisation de l'endommagement d'un matériau hétérogène biosourcé : application au bois massif. Thèse de l'Université de Bordeaux, 222 p.
- Sandhaas C, Van de Kuilen JWG (2013) Material model for wood. Germany: Institute for Timber Structures and Building Construction, Karlsruhe Institute of Technology.