

Modélisation du comportement en cisaillement d'une connexion de structure mixte

R. Calixte^{1,2}, L. Jason¹, L. Davenne²

¹ SEMT, CEA, DEN, Université Paris Saclay, 91191 Gif sur Yvette, France, e-mail : robine.calixte@cea.fr, ludovic.jason@cea.fr

² LEME, UPL, Université Paris Nanterre, 92410 Ville d'Avray, France, e-mail : luc.davenne@parisnanterre.fr

RESUME Les structures mixtes sandwich « Steel-Concrete-Steel » répondent à de nombreux besoins. Leur forte résistance, rigidité, durabilité, étanchéité et leur modularité en font un choix de structure de plus en plus concurrentiel. Cette étude porte sur le comportement local de cisaillement de la connexion avec la modélisation d'un essai push-out. Cet essai permet de caractériser la résistance à la rupture ainsi que la loi effort-glissement de la connexion, paramètres importants pour la conception de structures mixtes. Une stratégie de simulation avec des éléments finis 3D est présentée. Les interactions entre les composants sont correctement reproduites. Cependant, la courbe effort-glissement montre des écarts, nécessitant la mise en place d'une modification des paramètres en compression du béton en fonction de la taille des éléments. Les résultats numériques sont alors plus proches des résultats expérimentaux.

Mots-clefs Structures sandwich steel-concrete-steel (SCS), comportement en cisaillement d'une connexion, essai push-out, modélisation numérique

I. INTRODUCTION

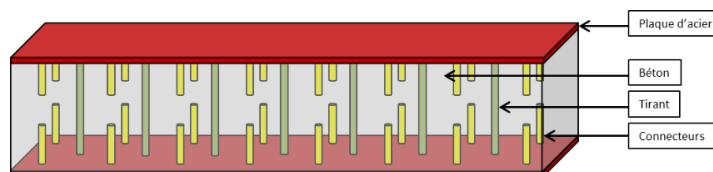


FIGURE 1. Schéma d'une poutre SCS avec goujons et tirants

Les structures Steel-Concrete-Steel (SCS) sont apparues au milieu des années 1980 ([1]). Les matériaux composant ces structures sont le béton structural (armé ou non) et deux plaques d'acier de construction reliées grâce à un système de connexion (FIGURE 1). Les structures sandwich offrent les avantages du béton armé ainsi qu'une étanchéité, une durabilité et une modularité supérieures. La résistance au cisaillement et la loi effort glissement sont des caractéristiques importantes pour la conception de structures mixtes. Elles peuvent être définies à l'aide d'un essai push-out recommandé dans l'Eurocode 4 ([2]). Cet essai est composée d'une poutre en acier connectée des deux côtés à des dalles de béton à l'aide d'un système de connexion. Les dalles de béton reposent directement sur le massif d'essai et une charge verticale est appliquée sur l'extrémité supérieure de la poutre métallique (FIGURE 2 (a)). Le système représente le comportement local de cisaillement de la connexion mais ne prend pas en compte le confinement du béton visible dans les structures SCS. Les objectifs de la simulation de l'essai sont de mieux comprendre les phénomènes entrant en jeu lors du cisaillement de la connexion de structures mixtes acier – béton ainsi que de confronter nos choix de modélisation à des résultats expérimentaux.

II. SIMULATION DE L'ESSAI PUSH-OUT

La simulation numérique d'un essai push-out défini par Shim et al. [3] est réalisée. L'étude présentée ici se concentre sur l'éprouvette ST25-A (FIGURE 2 (a)). Ce type d'éprouvette est testé 3 fois et est l'essai de référence pour les différentes comparaisons réalisées dans la campagne. Les caractéristiques géométriques de l'essai étudié sont présentées FIGURE 2 (a) et (b). Le mode de ruine observé pour cet essai est la ruine des goujons en cisaillement.

A. Stratégie de modélisation

Due aux symétries, le maillage 3D du quart du système est réalisée à l'aide du code implicite d'éléments finis Cast3M [3]. La dalle de béton, la poutre et les connecteurs sont représentés par des éléments massifs 3D. La taille du maillage est comprise entre 3 mm et 25 mm (FIGURE 2 (c)).

La loi de comportement du béton est un modèle d'endommagement isotrope basé sur le modèle de Mazars [5] pour la compression avec une méthode de régularisation énergétique de Hillerborg [6] en traction. Un comportement élasto-plastique à écrouissage isotrope est choisi pour l'acier de la poutre et des goujons. Et un comportement élasto-plastique parfait est appliqué aux armatures.

Le chargement, l'appui et les conditions de symétrie sont modélisés par le blocage des déplacements dans la direction normale aux surfaces concernées (FIGURE 3 (a)). Concernant les conditions d'interface, une adhérence partielle est imposée entre le béton et l'acier : la séparation dans la direction normale et le glissement relatif dans la direction tangentielle sont possibles mais l'interpénétration de ces deux membres n'est pas autorisée. Un accrochage parfait (égalité des déplacements) supplémentaire est ajouté afin de considérer l'effet de la tête des goujons. De plus, les connecteurs sont soudés sur la semelle de la poutre (unicité des nœuds) (FIGURE 3 (b)).

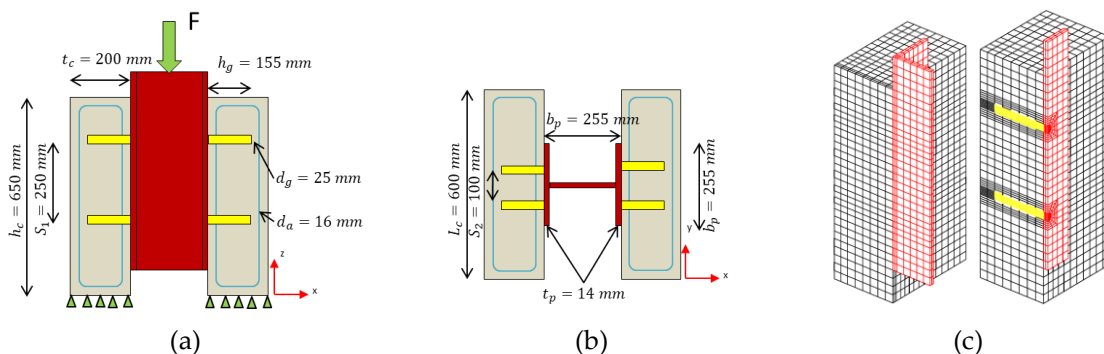


FIGURE 2. (a) Schéma de la section xz de l'essai push-out ; (b) Schéma de la section xy de l'essai push-out (c) Maillage (à gauche) et coupe du maillage au droit des goujons (à droite) de l'essai push-out

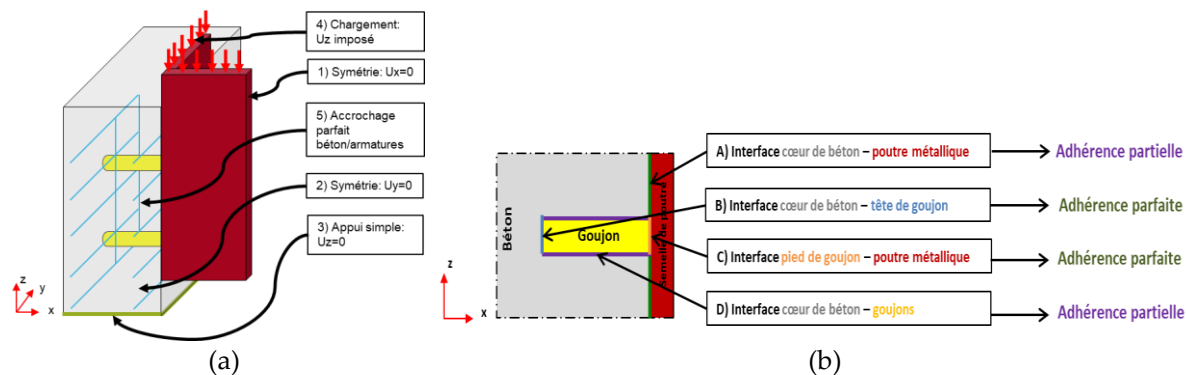


FIGURE 3. (a) Conditions limites ; (b) Conditions d'interface

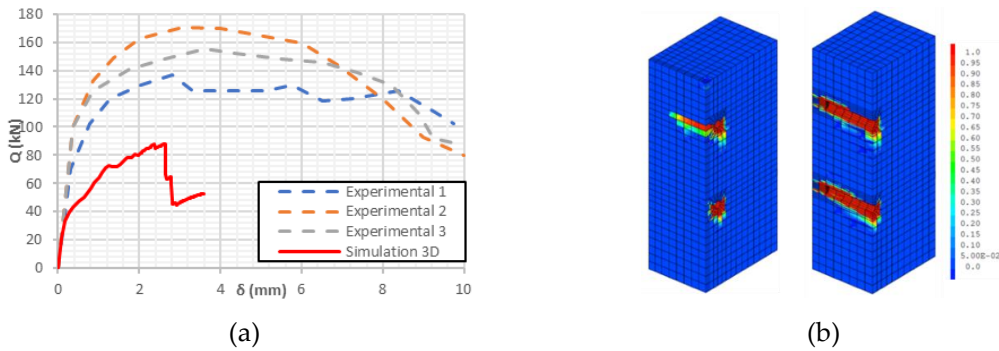


FIGURE 4. (a) Courbe effort-glisement de la simulation ; (b) Faciès d'endommagement final de béton de la simulation (dalle complète à gauche et coupe au droit des connecteurs à droite)

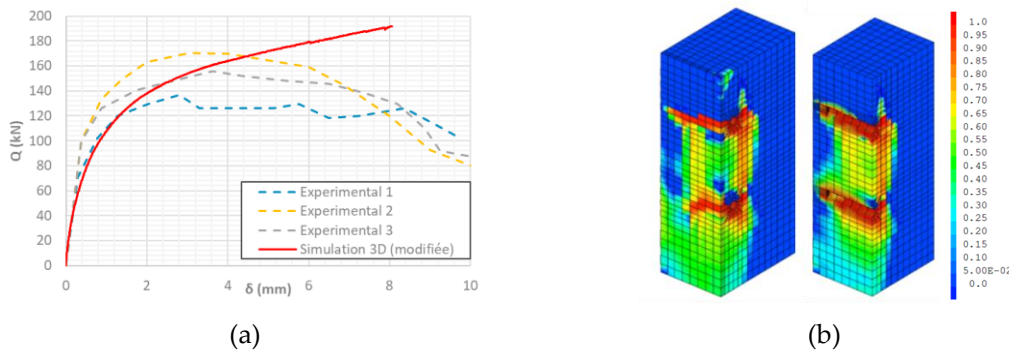


FIGURE 5. (a) Courbe effort-glisement de la simulation modifiée ; (b) Faciès d'endommagement final du béton de la simulation modifiée (dalle complète à gauche et coupe au droit des connecteurs à droite)

B. Résultats

La FIGURE 4 (a) montre que la courbe effort-glisement de la simulation présente une ruine du système deux fois inférieure aux résultats expérimentaux. De plus, la ruine est fragile avec une chute brutale de la capacité de reprise d'effort. En revanche, le faciès d'endommagement présenté en FIGURE 4 (b) montre bien un écrasement en compression du béton sous la flexion des goujons ainsi qu'un arrachement en traction du béton au niveau de la tête d'ancrage des connecteurs.

L'écart observé peut être dû au choix du modèle de comportement du béton. Sous la flexion des goujons, le béton subit une compression et du cisaillement. Dans cette zone, le modèle choisi implique un comportement très fragile en compression pour ces petits éléments de béton et cela peut expliquer la faible résistance du système.

III. AMELIORATION DU MODELE DE COMPORTEMENT DU BETON

A. Mise en place d'une dépendance de la taille du maillage du modèle de comportement du béton

Afin d'intégrer la taille des éléments dans le modèle de comportement du béton en compression, les paramètres du modèle A_c et B_c sont définis variables en fonction de la taille des éléments L sur l'ensemble du maillage de béton. Pour cela, un cube élémentaire de béton est étudié en compression. Les lois d'évolution de A_c et B_c sont définies en identifiant ces paramètres pour différentes dimensions L de cube afin de correspondre au mieux à une courbe de référence et ainsi obtenir une énergie de rupture identique pour toute taille de maille ([7]).

B. Application du nouveau modèle de comportement à l'essai push-out

Les lois d'évolution sont intégrées à la simulation de l'essai push-out. La FIGURE 5 (a) montre que la mise en place de la dépendance au maillage de A_c et B_c augmente la résistance en cisaillement du système. Ainsi, le comportement pré-pic de l'essai push-out est retrouvé. La zone de béton endommagé (FIGURE 5 (b)) a augmentée car les contraintes dans le système sont plus grandes. Cependant, cette modélisation ne permet pas de retrouver le pic de résistance du système : la ruine en cisaillement des goujons n'est pas reproduite alors que la vérification de l'état de contraintes des goujons confirme qu'ils ont plastifié. De plus, la résultante des efforts sur la section cisailée dépasse la résistance en cisaillement théorique d'une section de goujon (égale à $P_{Rd} = 167,3kN$ selon la formule de la résistance au cisaillement d'un goujon de l'EC4 [1] sans le facteur partiel de sécurité).

IV. CONCLUSION

Afin de mieux comprendre le comportement local de cisaillement de la connexion de structure mixte acier-béton, des essais push-out sont réalisés. La modélisation de cet essai a montré que la stratégie globale de simulation représente correctement les interactions entre les membres du système. Le modèle modifié permet de prendre en compte la taille de chacun des éléments de béton et ainsi d'adapter leurs résistances et ductilités en fonction de leurs dimensions. Le comportement pré-pic du système est plus représentatif. Des développements supplémentaires sont nécessaires afin de retirer toute dépendance au maillage ainsi que correctement représenter la ruine des goujons.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient EDF pour son soutien financier partiel.

REFERENCES

- [1] M Leekitwattana, S. W. Boyd and R. A. Shenoi (2010). An alternative design of steel concrete steel sandwich beam. *9th International Conference on Sandwich Structures, ICSS 9*
- [2] Comité Européen de Normalisation (CEN) (2005). Eurocode 4 – Calcul des structures mixtes acier-béton – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. NF EN 1994-1-1
- [3] C.-S. Shim, P.-G. Lee, T.-Y. Yoon (2004). Static behavior of large stud shear connectors. *Engineering Structures* 26, 1853-1860
- [4] CEA (2019). Cast3M, available from: <http://www.cast3m.cea.fr>
- [5] J. Mazars (1984). Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure. Ph.D. dissertation. Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, France
- [6] A. Hillerborg, M. Modéer and P-E Peterson (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research* Vol 6, pp 773-792, 1976
- [7] J.G.M. van Mier (1984). Strain-softening of concrete under multiaxial loading conditions. *Eindhoven: Technische Hogeschool Eindhoven* DOI: 10.6100/IR145193