

# Modélisation de la connexion de cisaillement dans les structures mixtes acier-béton

L. Bassil<sup>1,2</sup>, S. Durif<sup>1</sup>, A. Bouchair<sup>1</sup>, Kh. Tawil<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

<sup>2</sup> Université Libanaise, Faculté de Génie civil, Beyrouth, Liban

**RESUME** Dans les structures mixtes, les connecteurs de cisaillement sont nécessaires pour assurer la collaboration mécanique entre la poutre en acier et la dalle en béton. Les connecteurs soudés à tête sont couramment utilisés. Les essais de cisaillement dits Push-out sont généralement réalisés pour déterminer la capacité de résistance, la ductilité et le mode de ruine de ces connecteurs. La présente étude s'intéresse à ce comportement en cisaillement et propose un modèle éléments finis 3D pour simuler l'essai Push-out des goujons soudés à tête. Le modèle est validé par comparaison avec des résultats d'essais existants [1]. Ce modèle permet d'obtenir les modes de ruine observés en considérant aussi bien la plastification des connecteurs que l'endommagement du béton. Le modèle validé est utilisé pour mener une étude paramétrique en faisant varier la résistance du béton et la limite d'élasticité des connecteurs pour analyser leurs effets sur le comportement des connecteurs de cisaillement conventionnels. Le modèle validé a pour objectif d'étudier et de proposer de nouvelles conceptions de connecteurs démontables permettant le démontage et le réemploi des éléments dans les structures mixtes. Or, l'intérêt des connecteurs démontables vise à développer des systèmes constructifs favorisant le réemploi des éléments de structure.

**Mots-clefs :** Structures mixtes, acier-béton, goujons soudés, connecteurs de cisaillement, Push-out

## I. INTRODUCTION

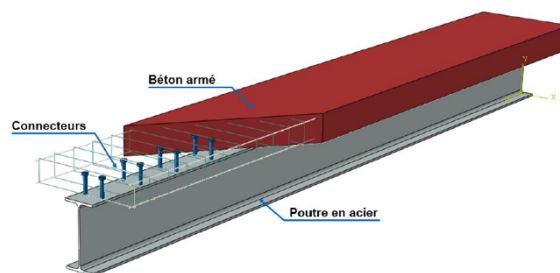


FIGURE 1. Poutre mixte acier-béton avec connecteurs soudés [2]

La construction mixte consiste à combiner deux matériaux de natures et de propriétés différentes. Dans cet article on s'intéresse aux planchers mixtes acier-béton et plus précisément au comportement des poutres mixte acier-béton (voir FIGURE 1). Le principe de fonctionnement d'une poutre mixte acier-béton s'appuie sur l'association d'une dalle en béton avec une poutre en

acier d'une manière à obtenir une collaboration mécanique entre les deux matériaux. Ainsi, en flexion positive, la dalle en béton travaille en compression et la poutre en acier travaille en traction. La solidarisation mécanique entre les deux matériaux est obtenue par des connecteurs de cisaillement, généralement constitués de goujons soudés à têtes. Ces connecteurs ont fait l'objet de plusieurs études Wu et al. [1], Viest [3], Spremic [4], Peng et al. [5] et sont actuellement couverts par l'Eurocode 4 [6] ce qui facilite leur mise en œuvre pratique de façon courante. Ces connecteurs sont faciles à installer en ateliers équipés mais restent difficilement démontables. Une grande variété de connecteurs de cisaillement a été proposée en considérant différentes formes y compris des cornières et des tiges soudées Viest [3], Slutter et Driscoll [7], Ollgaard et al. [8], Qureshi et al [9], Wu [1], Peng [5]. Ces connecteurs ont été caractérisés par des essais push-out pour obtenir les paramètres mécaniques tels que la résistance, la rigidité et la ductilité. Les études existantes ont montré que ces connecteurs soudés à tête ont des comportements généralement ductiles. De plus, leurs résistances mécaniques et leurs modes de ruine sont couverts par les formules analytiques de l'Eurocode 4 [6], ce qui facilite leur utilisation en pratique. Les tendances actuelles qui poussent vers des réflexions sur le réemploi dans la construction ont amené les chercheurs à explorer des solutions de connecteurs démontables appuyées principalement sur les boulons Kwon [10], Rehman and Lam [11], Pavlović [12], Suwaed et Karavasilis [13], [14], Yang [15] et Kozma [16]. Les connecteurs démontables sont des solutions qui se développent de plus en plus mais restent sans référence réglementaire directe. Les approches habituelles d'études utilisées pour les connecteurs soudés sont aussi adaptées aux connecteurs démontables. Elles s'appuient principalement sur les essais push-out qui sont parfois complétés par les essais de flexion. La présente étude est focalisée sur la modélisation des essais push-out qui permettent d'obtenir les caractéristiques mécaniques principales des connecteurs. Certains chercheurs ont mené des études numériques basées sur les modèles éléments finis Cast3M [17]. Cependant, les modèles existants méritent d'être enrichis notamment dans la représentation du comportement du béton fournie par les développeurs d'ATENA [18] (Advance Tool for Engineering Nonlinear Analysis) de Cervenka Consulting, qui ont spécifiquement travaillé pour représenter au mieux l'endommagement du béton. Le choix de la présente étude s'est porté sur la simulation numérique d'un essai push-out réalisé par Wu [1]. Le modèle développé et validé par comparaison avec les résultats expérimentaux de connecteurs soudés (FIGURE 2) est une première étape avant son utilisation par la suite pour les connecteurs démontables. Le modèle élément finis (EF) est construit pour étudier tout type de connecteur en tenant compte du comportement élastique-plastique de l'acier, de l'endommagement du béton ainsi que du contact entre les différents matériaux. La construction du modèle et sa validation s'appuieront sur les résultats des connecteurs soudés. L'adaptation aux connecteurs démontables nécessitera simplement d'intégrer les jeux entre connecteur métallique et les trous de perçage du profilé métallique et de la dalle en béton. En effet, il y a de grandes similitudes entre connecteurs démontables et non-démontables au regard des matériaux mobilisés et du contact aux interfaces entre matériaux. L'étude présentée ici se concentre principalement sur la capacité du modèle à représenter les modes de ruines observés expérimentalement qui combinent la plastification du connecteur et l'endommagement du béton.



FIGURE 2. Goujon à tête soudé

## II. ÉTUDE NUMERIQUE

Dans une poutre mixte, les connecteurs sont soumis principalement à des efforts de cisaillement ; on se contente le plus souvent d'effectuer les essais de cisaillement de type push-out. L'essai push-out est utilisé pour déterminer le comportement des connecteurs en observant principalement la résistance au cisaillement, la ductilité et le mode de ruine quel que soit le type de connecteur. Ce type d'essai est couvert par l'Eurocode 4 [6] pour les connecteurs (soudés) acier-béton mais la démarche est utilisée par les chercheurs pour d'autres connecteurs. Le principe de l'essai push-out consiste à disposer verticalement deux dalles de béton connectées à un tronçon de profilé métallique intercalé entre les deux blocs par une liaison à deux ou quatre goujons soudés sur les semelles de la poutre en acier et ancrés dans les dalles de béton. La charge est appliquée verticalement sur le dessus de la poutre en acier tandis que les deux dalles de béton sont simplement appuyées sur leurs bases. Cette charge provoquera un glissement entre la poutre en acier et les dalles en béton. Les courbes force-glissement sont utilisées pour déterminer les paramètres mécaniques principaux des connecteurs (rigidité, résistance et ductilité).

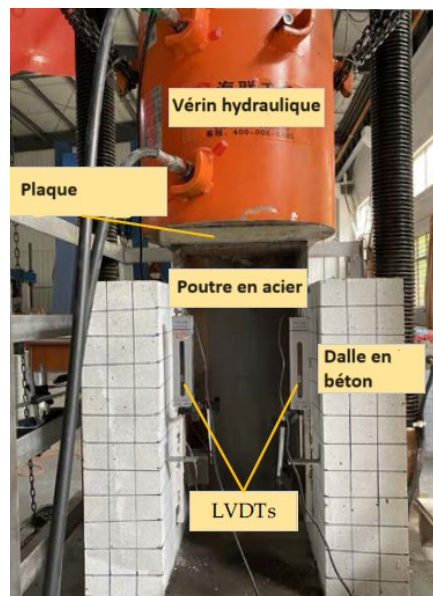
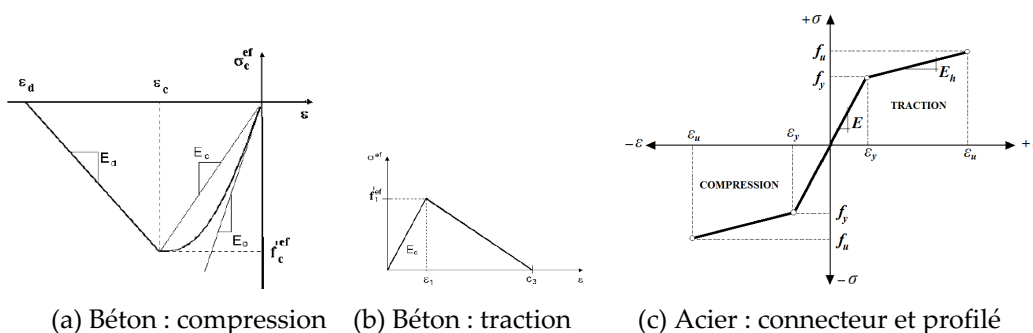


FIGURE 3. Vue de l'essai push-out réalisé par Wu et al [1]

L'objectif de la modélisation est d'avoir un outil dans lequel les paramètres d'entrées sont maîtrisés et dont la finalité est de représenter correctement le comportement des connecteurs soudés qui constituent notre référence. Des essais push-out (voir FIGURE 3) sur des connecteurs de type goujons à têtes soudés existent dans la littérature. Ils sont utilisés pour valider le modèle éléments finis développé dans la présente étude en utilisant le logiciel ATENA [18]. Il s'agit d'un logiciel d'analyses non linéaires par éléments finis, spécialisé dans la simulation d'éléments en béton armé. Ce logiciel est réputé pour sa précision dans la simulation du comportement réel des structures et de bien représenter l'endommagement du béton [19]. Des éléments finis de type volumique et des éléments de contact surface-surface sont utilisés. La méthode de résolution numérique choisie s'appuie sur la technique de longueur d'arc (arc-length).

#### A. Lois de comportement des matériaux

La particularité principale du béton est de présenter une bonne résistance à la compression et une faible résistance à la traction. Bien que l'utilisateur d'ATENA [18] puisse introduire une loi spécifique de comportement en compression dans le modèle CC3DNonLinearCementitious2, la modélisation de la dalle en béton a été effectuée avec la loi de comportement en compression définie par défaut dans ATENA. Ainsi, les courbes contrainte-déformation utilisées pour le matériau béton sont non-linéaires en compression (FIGURE 4 (a)) et bilinéaires en traction (FIGURE 4(b)) [1]. La valeur expérimentale de résistance à la compression utilisée dans le modèle (53.4 MPa) est obtenue à partir d'éprouvettes cubiques. La résistance à la traction également obtenue expérimentalement est égale à 1.9 MPa. Le module d'élasticité de 37.5 GPa est obtenu par une technique de mesure dynamique «DT-2 Dynamic elastic modulus tester». La déformation mesurée correspondant à la résistance maximale est égale à 0.217%. La poutre en acier et le connecteur soudé ont été modélisés à l'aide du matériau CC3DBilinearSteelVonMises. C'est un modèle élasto-plastique bilinéaire symétrique par rapport à l'origine en traction et en compression comme illustré à la FIGURE 4(c). Les caractéristiques utilisées pour le matériau de la poutre en acier sont une limite d'élasticité de 345 MPa, une résistance à la traction de 470 MPa et un module d'élasticité de 209 GPa. Pour le connecteur, le choix est porté sur une limite d'élasticité de 380 MPa, une résistance à la traction de 540 MPa et un module d'élasticité de 195 GPa.



**FIGURE 4.** Lois de comportement des matériaux utilisées dans le modèle

B. Géométrie, maillage et conditions aux limites

Les caractéristiques géométriques de l'essai modélisé sont présentées dans la FIGURE 5.

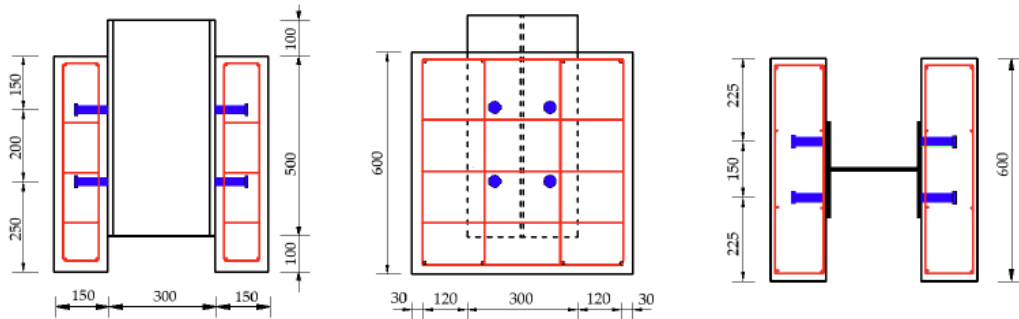


FIGURE 5. Eprouvettes testées dans l'étude de Wu et al. [1]

A cause de la symétrie de l'éprouvette modélisée, seulement le quart est représenté pour gagner en taille de problème et en temps de calcul (Voir FIGURE 6). Le modèle ayant une forme géométrique régulière, les éléments choisis dans la modélisation sont des éléments solides 3D à 8 points d'intégration. La densité de maillage est augmentée dans les zones des connecteurs.

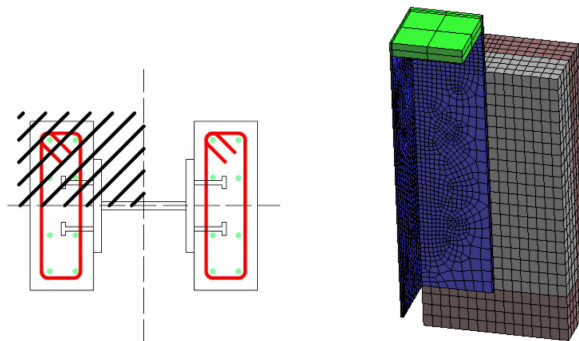
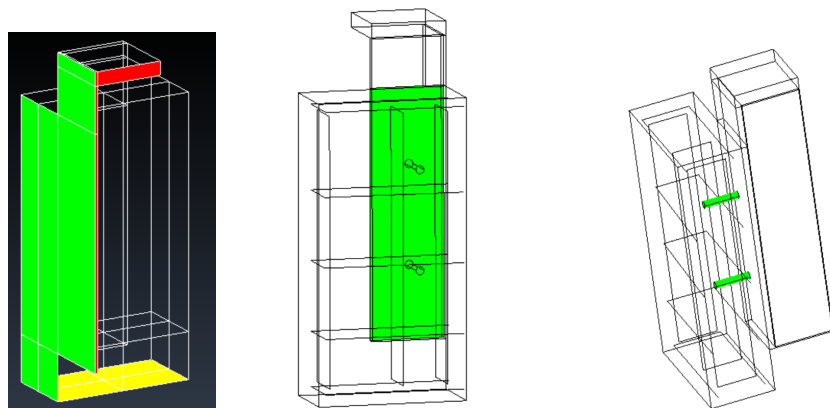


FIGURE 6. Modélisation du quart de l'éprouvette Push-out testée par Wu et al. [1]

Deux types de conditions aux limites sont considérés : la symétrie due à la modélisation d'un quart du modèle et les conditions d'appuis en fixant la base dans toutes les directions (voir FIGURE 7).



(a) Symétrie et appui (b) Contact acier-béton (c) Contact connecteur-béton

FIGURE 7. Conditions aux limites et zones de contact

Deux zones de contact sont considérées pour le modèle proposé, à savoir : le contact entre la poutre en acier et la dalle de béton (FIGURE 7 (b)) avec un coefficient de frottement égal à 0.25, ainsi que le contact entre les connecteurs et la dalle en béton (FIGURE 7 (c)) avec un coefficient de frottement égal à 0.5. Ces valeurs ont été choisies sur la base des études menées par les auteurs [20], [21], [22], [23]. Le béton et l'acier dans chaque cas de contact (béton - connecteur / profilé acier-béton) ont des propriétés de surface différentes, ce qui a impliqué un choix de coefficient de frottement différent pour le contact connecteur/béton (0.25) et le contact dalle/semelle profilé (0.5). Une étude de sensibilité au coefficient de frottement a été réalisée et montre à l'instar des études déjà proposées par la littérature que ce coefficient a une influence négligeable sur les résultats[24][23]. La figure 8 présente les résultats d'une étude qui compare l'utilisation de 3 valeurs de coefficients de frottement : 0.3, 0.4 et 0.5. Bien que les 3 courbes correspondantes soient distinctes, leur écart est relativement faible.

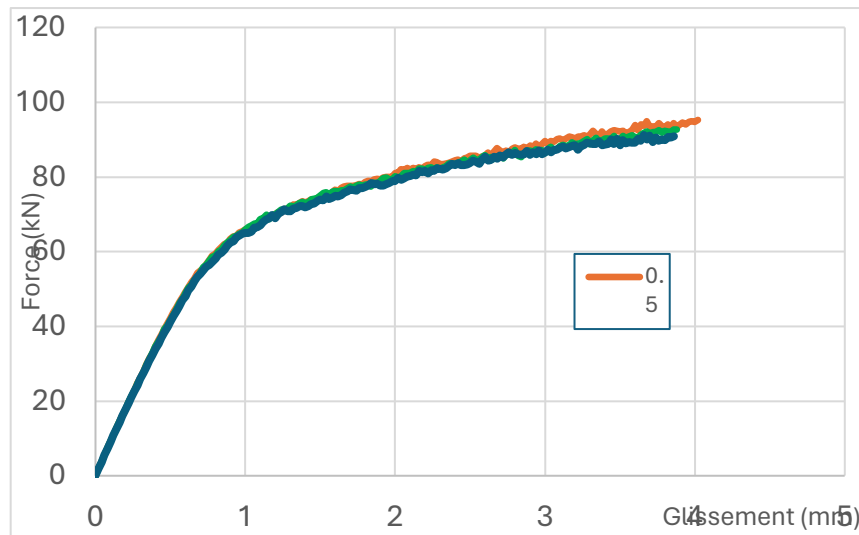
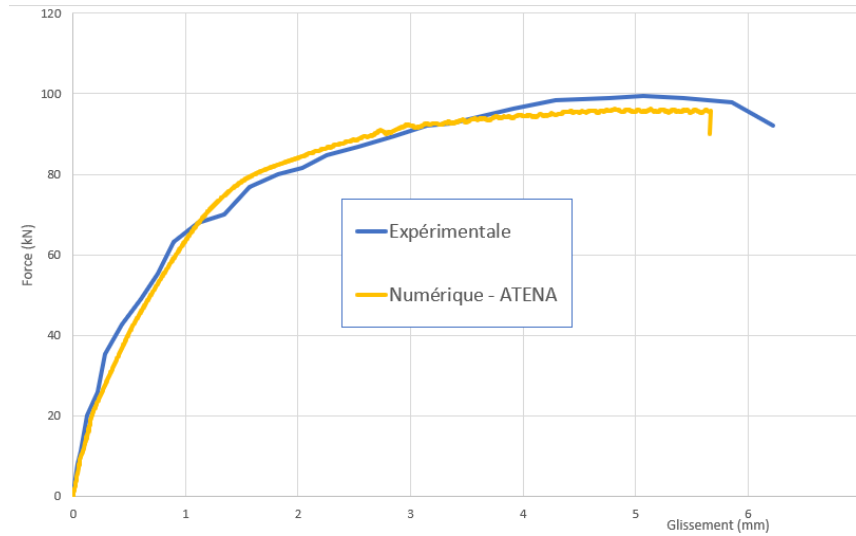


FIGURE 8 Etude de sensibilité du coefficient de frottement

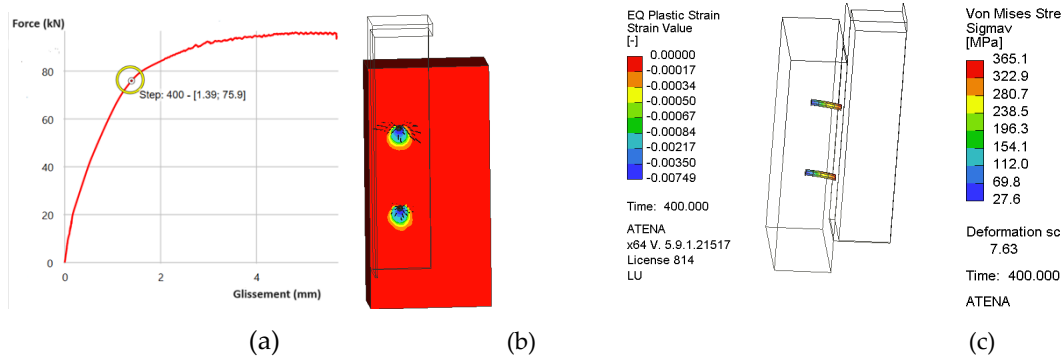
### C. Exploitation des résultats

La modélisation a permis d'obtenir la courbe force-glissement numérique qui est très proche de celle obtenue expérimentalement par les essais push-out réalisés par Wu et al. [1] (voir FIGURE 9).

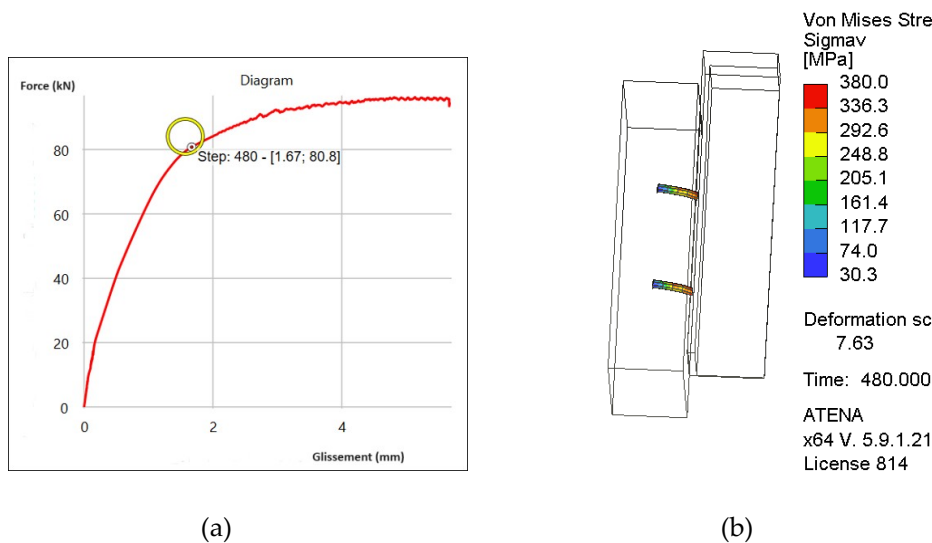


**FIGURE 9.** Validation du modèle numérique : comparaison avec la courbe expérimentale de Wu et al. [1]

La FIGURE 10 (a) montre que la courbe force-glissement à l'étape de calcul 400 qui correspond à une force appliquée de 75,9 kN commence à s'incurver de façon nette. Cette étape (FIGURE 10 (b)) présente une rupture en compression du béton sous les goujons fléchis. En effet, le béton a déjà atteint sa déformation plastique équivalente qui correspond à sa valeur maximale de résistance en compression égale à 0.217%. En observant les contraintes équivalentes dans les goujons, il peut être constaté qu'elles restent inférieures à leur limite d'élasticité égale à 380 MPa (voir FIGURE 10 (c)). Ce n'est qu'à partir de l'étape 480 de calcul qui correspond à une force de 80,8 kN (glissement de 1,67 mm) que le connecteur commence à se plastifier (voir FIGURE 10).



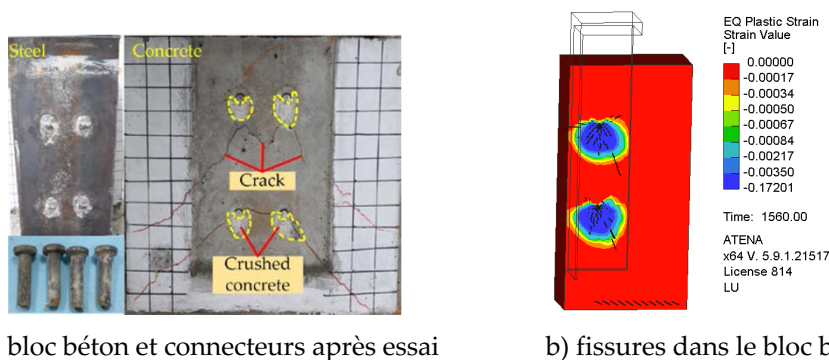
**FIGURE 10.** Zones endommagées, déformations plastiques et contraintes équivalentes à l'étape de calcul 400 (75,9 kN ; 1,39 mm)



**FIGURE 11. Contraintes équivalentes dans les goujons à l'étape de calcul 480 (80,8 kN ; 1,67 mm)**

L'observation des fissures montre que le modèle éléments finis représente correctement les zones endommagées observées expérimentalement (FIGURE 12 (a) et FIGURE 12 (b)).

Ces comparaisons des courbes force-glissement et de l'évolution des zones endommagées dans le béton montrent que le modèle éléments finis est bien adapté pour représenter le comportement réel des éprouvettes d'essais de cisaillement de connecteurs (push-out). Le modèle a été appliqué à d'autres essais et a permis d'avoir les mêmes conclusions quant à ses capacités à représenter le comportement des essais push-out.



**FIGURE 12. Comparaison de l'endommagement du béton entre essai et modèle**

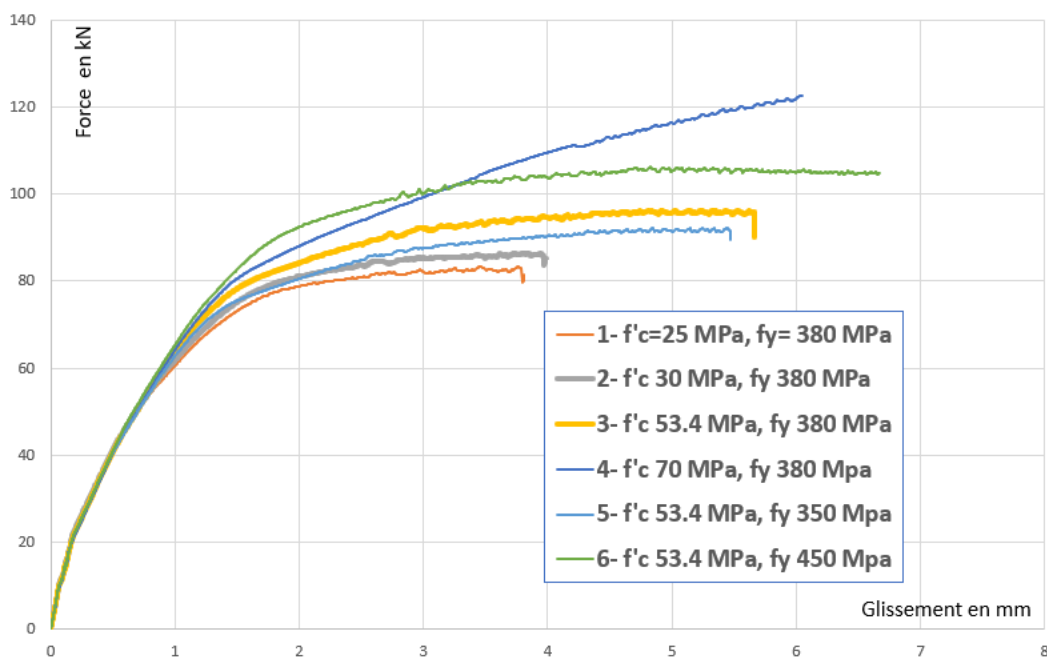
*D. Etude paramétrique*

A partir du modèle validé sur les connecteurs soudés, l'éprouvette testée est modélisée en faisant varier certains paramètres mécaniques des matériaux. Ainsi, la résistance à la compression du béton et la limite d'élasticité du connecteur sont variées pour vérifier leurs influences sur le comportement de la connexion acier-béton. La FIGURE 13 montre la comparaison entre les courbes force-glissement obtenues pour les différents spécimens modélisés (TABLEAU 1) en modifiant d'une part la résistance à la compression du béton (25 MPa, 30 MPa, 70 MPa) avec 380 MPa comme limite d'élasticité du connecteur et d'autre part en faisant varier la limite d'élasticité

du connecteur (350 MPa, 450 MPa) pour une résistance à la compression du béton de 53.4 MPa. Ces courbes sont comparées à celles obtenues en considérant les paramètres de l'étude de Wu et al. [1] (53.4 MPa pour le béton et 380 MPa pour l'acier). La résistance à la traction du béton est prise égale à 1,9 MPa pour toutes les éprouvettes modélisées.

**TABLEAU 1. Caractéristiques des éprouvettes modélisées**

Eprouvette	Résistance à la compression du béton $f'_c$ (MPa)	Limite d'élasticité du connecteur $f_y$ (MPa)	Résistance au cisaillement par goujon (kN)	Glissement maximal (mm)
1	25	380	83.26	3.81
2	30	380	86.46	3.98
3	53.4	380	96.27	5.66
4	70	380	130.24	7.77
5	53.4	350	92.15	5.47
6	53.4	450	106.16	6.67



**FIGURE 13. Courbes force-glissement pour différentes valeurs de résistance à la compression du béton et de limite d'élasticité du connecteur**

Ces comparaisons montrent que la résistance ultime augmente de façon non négligeable lorsque la résistance à la compression du béton et la limite d'élasticité du connecteur augmentent. Par conséquent, la résistance à la compression du béton et la limite d'élasticité du connecteur sont des paramètres qui peuvent présenter une influence considérable sur le comportement de la connexion. Ainsi pour des bétons de très bonne qualité, comme la courbe 4 ayant un béton très

résistant 70 MPa, on remarque que sa première partie sera principalement guidée par l'acier ; ce qui va définir la première plastification. En effet, le niveau de plastification du connecteur est fonction de sa limite élastique, 380 MPa pour le cas de la courbe 4 qui à son tour est inférieur à celle de la courbe 6 (450 MPa). Puis, on observe une deuxième pente assez forte là où les autres ont un palier plastique. On a alors un comportement bilinéaire ce qui aboutit au fait que la courbe 4 arrive à croiser la courbe 6 et atteindre des résistances plus élevées.

### III. Conclusion

Le modèle numérique proposé pour simuler l'essai Push-Out sur les connecteurs conventionnels soudés à tête montre ses capacités à représenter les résultats expérimentaux issus de la bibliographie. Ceci concerne la courbe globale force-glisement, la résistance, le mode de ruine et la capacité de glissement. La simulation effectuée sous le logiciel ATENA montre l'intérêt d'utiliser un outil capable de bien représenter l'endommagement du béton pour les essais push-out.

Le modèle validé par comparaison avec les résultats expérimentaux est utilisé pour mener une étude paramétrique en vue de montrer l'influence des caractéristiques des matériaux (acier, connecteur) sur les courbes force-glisement des essais push-out. Ce modèle sera utilisé pour étudier des connecteurs démontables en vue de maîtriser leur comportement mécanique et évaluer leurs similitudes et différences par rapport aux connecteurs soudés considérés comme des références. Une des finalités serait de définir une forme de connecteur démontable efficace et de proposer des approches analytiques pour calculer sa résistance en vue de répondre aux besoins des bureaux d'ingénierie. Une autre extension du modèle concerne le comportement des poutres en flexion intégrant des connecteurs démontables en vue d'évaluer l'effet de leur rigidité de glissement, de leur résistance et de leur capacité de déformation sur le comportement global en flexion des poutres.

### IV. REFERENCES

- [1] F. Wu, W. Tang, C. Xue, G. Sun, Y. Feng, and H. Zhang, "Experimental investigation on the static performance of stud connectors in steel-hsfrcc composite beams," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 11, 2021, doi: 10.3390/ma14112744.
- [2] M. I. Tabet-derraz, "Comportement et modélisation des connecteurs dans une structure mixte ( acier-béton ) To cite this version : HAL Id : tel-03874580 soutenance et mis à disposition de l' ensemble de la illicite Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr," 2022.
- [3] I. M. Viest, "Test of Stud Shear Connectors Parts I, II, III and IV. Engrg. Test Data, Nelson Stud Welding," *Lorain, Ohio, USA*, 1956.
- [4] M. Spremic, Z. Markovic, M. Veljkovic, and D. Budjevac, "Push-out experiments of headed shear studs in group arrangements," *Gr. Organ. Manag.*, vol. 38, no. 4, pp. 139–160, 2013.
- [5] S. L. and X. Z. Kai Peng , Laijun Liu , Fangwen Wu , Ruizheng Wang, "Experimental and Numerical Analyses of Stud Shear Connectors in Steel-SFRCC Composite Beams,"

- Materials (Basel)*, vol. 15, no. 4665, 2022, doi: 10.3390/ma15134665.
- [6] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION ( CEN ), “NF EN 1994-1-1, Eurocode 4 Calcul des structures mixtes acier-béton\_ Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments,” *Bruxelles*.
- [7] R.G. Slutter and G.C. Driscoll Jr., “Flexural Strength of Steel and Concrete Composite Beams,” *Fritz Eng. Lab.*, vol. 91, no. 2, 1963.
- [8] J. W. Ollgaard, J. G.; Sluter, R. G.; and Fisher, “Shear strength of stud connectors in lightweight and normal weight concrete,” *AISC Eng. J.*, vol. 8, no. April 1971, 1971.
- [9] J. Qureshi, D. Lam, and J. Ye, “Effect of shear connector spacing and layout on the shear connector capacity in composite beams,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 67, no. 4, pp. 706–719, 2011, doi: 10.1016/j.jcsr.2010.11.009.
- [10] G. Kwon, H. Brent, K. Hulya, B. Schaap, Y. K. Ju, and M. E. Richard Klingner, “Strengthening Existing Non-Composite Steel Bridge Girders Using Post-Installed Shear Connectors,” *Vasa*, vol. 7, 2007.
- [11] D. X. Rehman N, Lam D, “The University of Bradford Institutional Repository Experimental Study on Demountable Shear Connectors in Composite Slabs with Profiled Decking,” *J. Constr. Steel Res.* 122 178–189., pp. 178–189, 2016.
- [12] M. Pavlović, Z. Marković, M. Veljković, and D. Bucrossed D Signevac, “Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 88, pp. 134–149, 2013, doi: 10.1016/j.jcsr.2013.05.003.
- [13] A. S. H. Suwaed and T. L. Karavasilis, “Novel Demountable Shear Connector for Accelerated Disassembly, Repair, or Replacement of Precast Steel-Concrete Composite Bridges,” *J. Bridg. Eng.*, vol. 22, no. 9, pp. 1–33, 2017, doi: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0001080.
- [14] A. S. H. Suwaed and T. L. Karavasilis, “Removable shear connector for steel-concrete composite bridges,” *Steel Compos. Struct.*, vol. 29, no. 1, pp. 107–123, 2018, doi: 10.12989/scs.2018.29.1.107.
- [15] F. Yang, Y. Liu, Z. Jiang, and H. Xin, “Shear performance of a novel demountable steel-concrete bolted connector under static push-out tests,” *Eng. Struct.*, vol. 160, no. December 2017, pp. 133–146, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.01.005.
- [16] A. Kozma, C. Odenbreit, M. V. Braun, M. Veljkovic, and M. P. Nijgh, “Push-out tests on demountable shear connectors of steel-concrete composite structures,” *Structures*, vol. 21, no. May, pp. 45–54, 2019, doi: 10.1016/j.istruc.2019.05.011.
- [17] R. Calixte, L. Jason, and L. Davenne, “Modélisation du comportement en cisaillement d’une connexion de structure mixte,” vol. 38, no. 1, pp. 5–8, 2020.
- [18] D. Pryl and J. Červenka, “ATENA Program Documentation Part 11,” pp. 1–33, 2013.
- [19] A. Khene, R. A. El-bey, C. Algérie, U. De Rennes, B. De Coësmes, and C. S. F. Rennes, “Modélisation numérique des poutres en béton armé renforcées avec des PRFC par la technique NSM,” vol. 35, no. 1, pp. 537–544.
- [20] J. Chen *et al.*, “Behavior of an advanced bolted shear connector in prefabricated steel-

- concrete composite beams," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 18, 2019, doi: 10.3390/ma12182958.
- [21] J. He, S. Feng, G. Vasdravellis, H. Xin, J. A.F.O. Correia, and F. Berto, "Behaviour of the lockbolt demountable shear connector under combined shear and tension loading," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 141, no. August, 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106712.
- [22] J. He, A. S. H. Suwaed, and G. Vasdravellis, "Horizontal pushout tests and parametric analyses of a locking-bolt demountable shear connector," *Structures*, vol. 35, no. July 2021, pp. 667–683, 2022, doi: 10.1016/j.istruc.2021.11.041.
- [23] P. Arezoomand Langarudi and M. Ebrahimnejad, "Numerical study of the behavior of bolted shear connectors in composite slabs with steel deck," *Structures*, vol. 26, no. April, pp. 501–515, 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.04.037.
- [24] Y. Song, B. Uy, and J. Wang, "Numerical analysis of stainless steel-concrete composite beam-to-column joints with bolted flush endplates," *Steel Compos. Struct.*, vol. 33, no. 1, pp. 143–1662, 2019, doi: 10.12989/scs.2019.33.1.143.