

TRANSFERT DE FORCE ENTRE PROFIL ACIER ET BÉTON ARMÉ

PLUMIER André¹, DRAGAN Dan², DEGEE Hervé³ & BOGDAN Teodora⁴

a.plumier@ulg.ac.be

¹ Prof. Hon. Département ARGENCO, Université de Liège, Belgique

² Chercheur, étudiant de Doctorat, Université de Hasselt

³ Prof., Université de Hasselt

⁴ ArcelorMittal, Département Recherche

RÉSUMÉ : Pour définir les conceptions adéquates du transfert de force d'un profil acier vers un mur en béton armé, on réalise un programme expérimental. On étudie la résistance de divers mode de reprise du cisaillement longitudinal à l'interface acier-béton : par adhérence dans le cas d'un profil brut et d'un profil peint, par goudons connecteurs, par plats raidisseurs soudés entre les ailes de profil H, dans diverses configurations. Des conclusions pratiques et des recommandations de conception sont établies.

ABSTRACT: In order to define adequate design for force transfer from a steel profile into a concrete wall, an experimental research program is realised. Various possibilities of resisting longitudinal shear at the steel profile-concrete interface are studied: bond in the case of unpainted and painted profiles, headed studs shear connectors, plate connectors welded between the flanges of H sections, in different configurations. Practical conclusions and design recommendations are established.

MOTS CLÉS: *profil acier, enrobé, cisaillement, cisaillement longitudinal*

KEYWORDS: *steel profile, encased, shear, longitudinal shear*

1. Introduction

On rencontre dans la pratique constructive de façon de plus en plus courantes des situations hybrides qui ne sont ni du béton armé ou de la construction mixte classique: des murs armés de plusieurs profils acier, des poutres ou poteaux renforcés localement par des profils, des connexions mixtes de planchers dalles en béton armé. Il n'existe pas à l'heure actuelle de règles pour le calcul de telles dispositions, qui ne ressortent pas du béton armé tel qu'il est couvert par l'Eurocode2 [1] ou l'ACI 318 [2], ni de structures mixtes qui tant dans l'Eurocode 4 [3] ou l'AISC 2010 [4] sont des structures avec une ossature métallique continue et un enrobage partiel ou total de béton.

Les lacunes de connaissance portent principalement sur des problèmes de transmission d'effort entre l'acier et le béton, car on ne sait pas exactement comment combiner les différents modes de résistance, adhérence, connecteurs, ni comment réaliser l'armature des zones de transition entre les zones de béton armé et les zones mixtes afin de d'empêcher la dégradation résultant de flux de contrainte incurvés.

Afin de couvrir ces lacunes tant théoriques que normatives, une recherche en cours couvre une série de situations hybrides acier-béton. C'est le projet SMARTCOCO [5], dont on présente ici des résultats relatif au problème le plus basique : le transfert de force de compression/traction d'un profil acier vers un mur en béton.

2. Description des spécimens testés.

Pour étudier le transfert de force de compression/traction d'un profil acier vers un mur en béton, on réalise une série de murs en béton de 1m x1m x 0,34m, avec des profils acier enrobés. On applique la charge du côté des profils aciers qui dépasse du mur; l'autre extrémité du profil est apparente et on dispose des appuis en dehors de cette extrémité. Figure 1.

Lors des essais, les premiers tests ont été effectués sur les spécimens F et G où le transfert a lieu sans connecteurs. Les résistances très élevées observées ont mis en évidence le fait qu'il serait difficile de réaliser la ruine des pièces d'essais suivant un mode utile, car la charge d'écrasement plastique du profil

était inférieure à la résistance au cisaillement longitudinal à l'interface acier-béton. Cette situation contraire aux estimations initiales peut en partie être attribuée à une résistance du béton nettement supérieure à la résistance prévue (71 MPa pour un C30/40 prévu) et en partie à l'imprécision des relations d'estimation de la résistance au cisaillement. Pour obtenir des résultats utiles, les spécimens A à E, dont la hauteur originelle était de 1000 mm, ont été ramenés à 450 mm. Ceci est marqué par un trait horizontal sur les Figures 2 à 5.

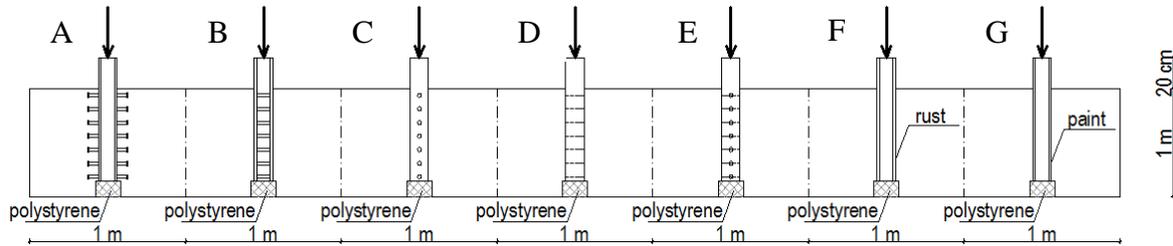
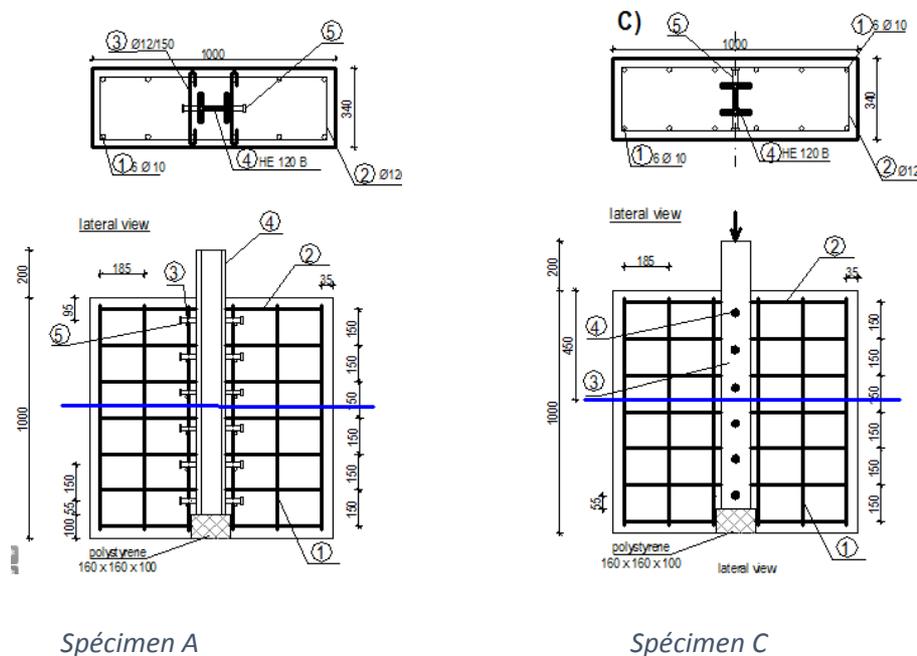


Figure 1. Vue générale des spécimens testés et principe des essais.

Les spécimens testés ont les caractéristiques principales suivantes :

- Spécimen A: âme du profil H parallèle aux faces longues du mur ; 6 goujons connecteurs ; une armature transversale anti fendage par connecteur. Figure 2.
- Spécimens B1, B2, B3: des raidisseurs soudés sur les ailes des profils en H servent à mobiliser des bielles de compression inclinées; on réalise 3 spécimens avec l'âme du profil H parallèle aux faces longues du mur et différentes configurations d'armatures transversales: B1 sans armature transversale; B2 avec des étriers ou cadres complets; B3 avec des épingles reliant les armatures des faces longues du mur. Figure 3.
- Spécimen C: âme du profil H perpendiculaire aux faces longues du mur ; 6 goujons connecteurs ; une armature transversale anti fendage par connecteur. Figure 2.



Spécimen A

Spécimen C

Figure 2. Spécimens A et C.

- Spécimens D1 et D2: âmes des profils perpendiculaires aux faces longues des murs; connexions par des plats soudés entre les ailes des profils H. Configuration D1 : pas d'armature transversale ; configuration D2 : avec armature transversale. Figure 4.
- Spécimen E: profils en H avec l'âme orientée perpendiculairement aux faces longues du mur; 2 connecteurs de type plats soudés entre les ailes du H; 2 goujons connecteurs ; armature transversale anti fendage. Figure 5.
- Spécimens F et G : profils aciers avec l'âme parallèle aux faces longues du mur; le profil F a été rouillé par un brouillard salin ; le profil G est recouvert d'une peinture de type primer anti-rouille. Figure 5.

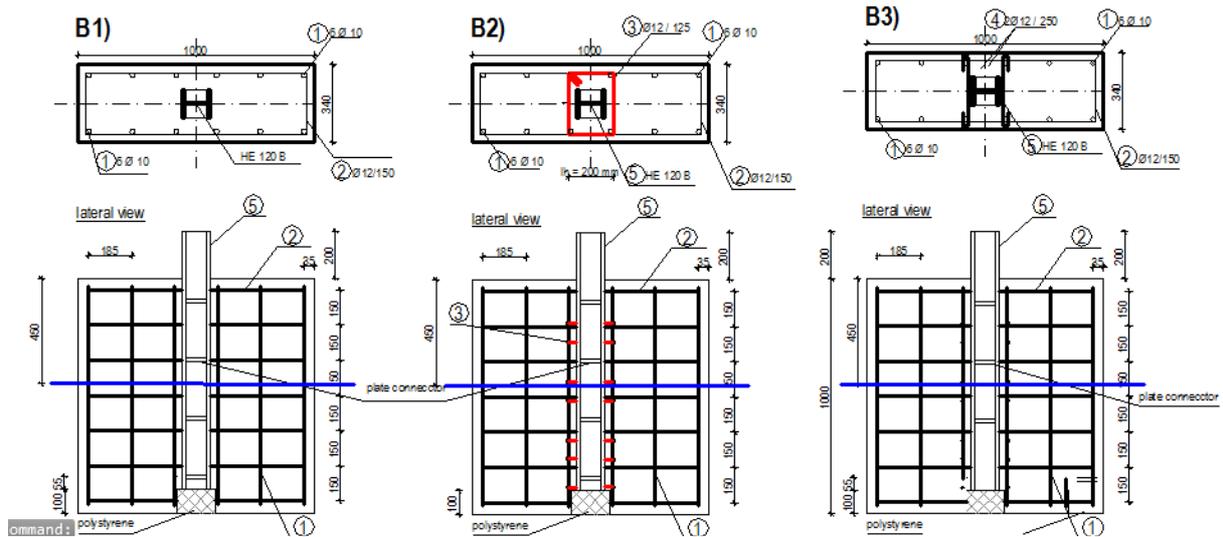


Figure 3. Spécimens B1, B2 et B3.

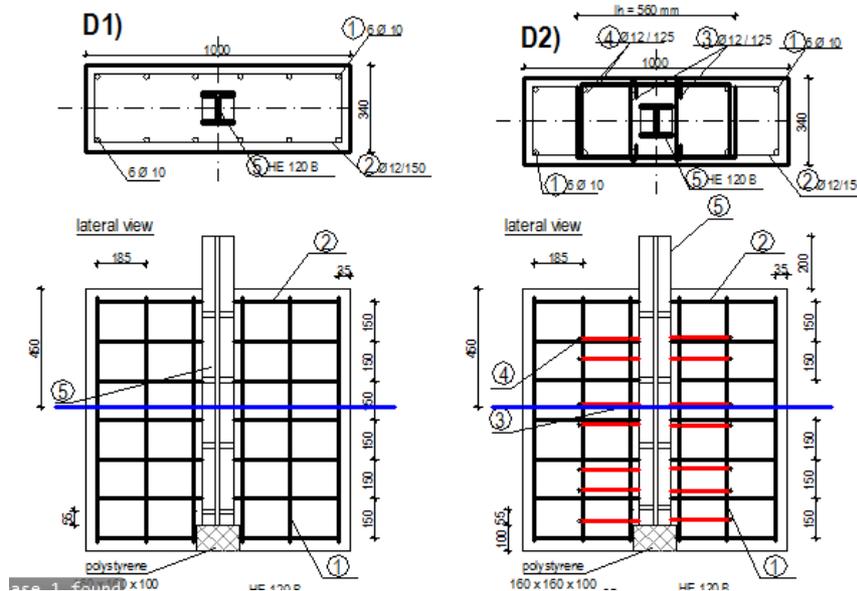


Figure 4. Spécimens D1 et D2.

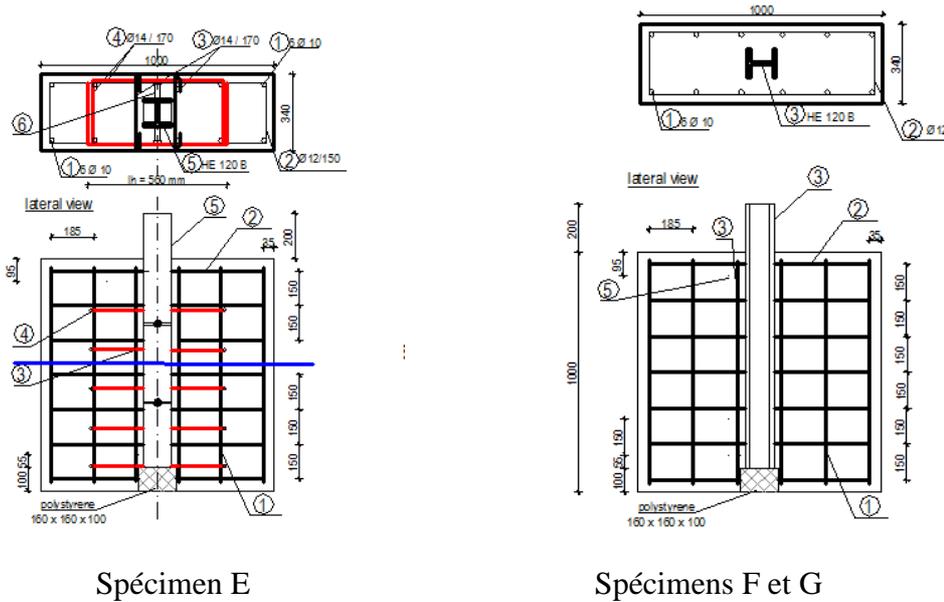


Figure 5. Spécimens E, F et G.

Les propriétés des matériaux sont les suivantes :

- Béton de résistance caractéristique $f_{ck} = 71 \text{ MPa}$;
- Profils acier HE 120 B classe S 460
- Armatures longitudinales S500 $\Phi_1 = 10 \text{ mm}$
- Goujons connecteurs S235J2G3+CE+C450: diamètre 16 mm, hauteur 65 mm, $f_u = 450 \text{ N/mm}^2$
- Raidisseurs-connecteurs : S355

3. Evaluation des résistances au cisaillement longitudinal à l'interface béton-profil acier

3.1. Résistance au cisaillement de calcul à l'interface acier-béton en l'absence de connecteur

La résistance au cisaillement de calcul à l'interface acier-béton en l'absence de connecteur est évaluée en se basant sur l'Eurocode 4 Tableau 6.6, qui donne pour les profils enrobés: $\tau_{Rd} = 0,3 \text{ N/mm}^2$

Cette valeur est augmentée par un coefficient β_c en fonction de l'enrobage c_z si $c_z > c_{z,\min} = 40 \text{ mm}$

$$\beta_c = 1 + 0,02c_z \left(1 - \frac{c_{z,\min}}{c_z} \right) \leq 2,5 \quad \text{Eurocode 4 clause 6.7.4.3(4)}$$

On donne au Tableau 1 les valeurs de c_z suivant sa définition à la Figure 6.17 de l'Eurocode 4.

La valeur de calcul de la résistance au cisaillement de calcul à l'interface acier-béton est le produit de l'aire de contact A_L acier-béton par $\beta_c \tau_{Rd}$.

Le catalogue ArcelorMittal indique $A_L = 0,686 \text{ m}^2/\text{m}$ or $686 \text{ mm}^2/\text{mm}$, ce qui correspond à un périmètre de 686mm et donc : $V_{Rd,bond} = 686 \beta_c \tau_{Rd} h$

h étant la longueur du profil qui est enrobée.

La valeur du $V_{Rd,bond}$ de chaque spécimen est donnée au Tableau 1. Pour le specimen G, qui est peint, on considère: $\tau_{Rd} = 0$.

Tableau 1. Résistance au cisaillement de calcul $V_{Rd,bond}$ à l'interface acier-béton.

Spécimen	Longueur enrobée (mm)	c_z (mm)	β_c	$V_{Rd,bond}$ (kN)
A	450	440	2,5	232
B1	450	440	2,5	232
B2	450	440	2,5	232
B3	450	440	2,5	232
C	450	110	2,4	222
D1	450	110	2,4	222
D2	450	110	2,4	222
E	450	110	2,4	222
F	1000	440	2,5	515
G	1000	440	2,5	0

3.2. Résistance au cisaillement de calcul P_{Rk} des goujons connecteurs

L'Eurocode 4, clause 4.1 6.6.3.1. (1) indique:

$$P_{Rk} = \min \left(\frac{0.8 \cdot f_u \cdot \pi \cdot d^2 / 4}{\gamma_v}, \frac{0.29 \cdot \alpha \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}}}{\gamma_v} \right)$$

$d = 16$ mm est le diamètre des goujons et $h_{sc} = 65$ mm leur hauteur
 $f_u = 450$ MPa $f_{ck} = 71$ MPa $E_{cm} = 41000$ MPa

On adopte $\gamma_v = 1.00$ plutôt que 1,25 afin d'obtenir une valeur plus réaliste de P_{Rk}

$$\alpha = \begin{cases} 0.2 \left(\frac{h_{sc}}{d} + 1 \right) & \text{pour } 3 \leq \frac{h_{sc}}{d} \leq 4 \\ 1 & \text{for } \frac{h_{sc}}{d} > 4 \end{cases} \Rightarrow \alpha = 1$$

$$P_{Rk} = \min(72.38 \text{ kN}; 126,66 \text{ kN}) = 72.38 \text{ kN}$$

3.3. Résistance au cisaillement par plats soudés entre les ailes des profils HE120B

Les symboles sont définis à la Figure 6. On a:

Largeur des plats : $a = 56.75$ mm

Longueur des plats: $b^* = 98$ mm

Coins coupés: $c = 15$ mm

Aire: $A_{plat} = a \cdot b - c^2 = 53.36 \text{ cm}^2$

On établit la résistance au cisaillement à l'interface acier-béton apportée par les plats soudés en se référant au modèle bielle-tirant de la Figure 6 et en admettant $\theta = 45^\circ$.

$$\text{La largeur de bielle est égale à : } \frac{a}{\cos \theta} = a \sqrt{2} = 80.26 \text{ mm} \quad v' = 1 - \frac{f_{ck}}{250} = 0.716$$

$$\text{On considère: } f_{cd} = f_{ck} = 71 \text{ MPa : } \sigma_{Rd,max} = 0.6 \cdot v' \cdot f_{cd} = 0.6 \times 0.716 \times 71 = 30,5 \text{ MPa}$$

$$\text{Résistance } F_{Rd} \text{ d'une bielle: } F_{Rd} = a \sqrt{2} \cdot \sigma_{Rd,max} \cdot b^* = 56,75 \sqrt{2} \times 98 \times 30,5 = 239,89 \text{ kN}$$

La résistance de la connexion acier-béton vaut au maximum, pour un plat :

$$V_{Rd,1plate} = F_{Rd} \times \cos \theta = 239,89 \frac{\sqrt{2}}{2} = 169,6 \text{ kN}$$

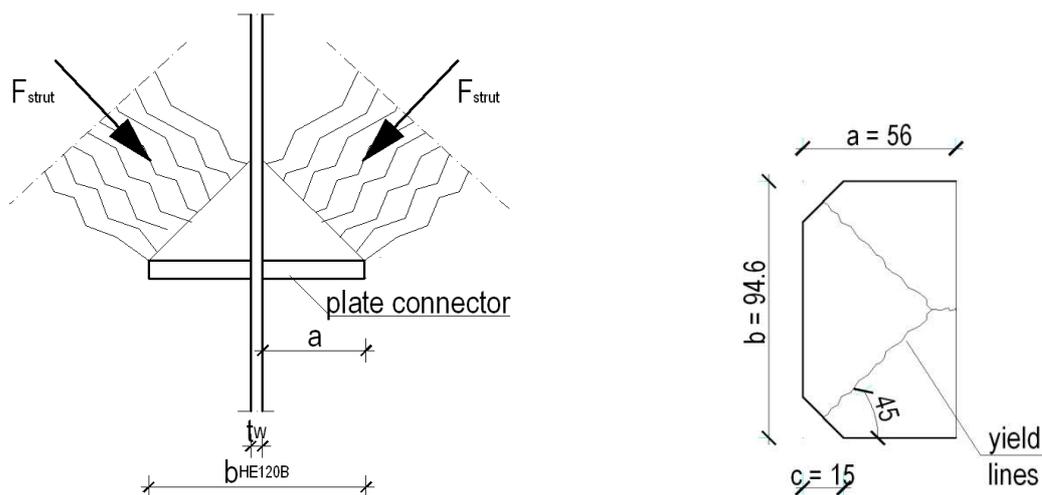


Figure 6. A gauche: modèle bielle-tirant servant à définir la résistance de la connexion acier-béton.
A droite: lignes de plastification du modèle de résistance de plaque appuyée sur 3 côtés.

4. Comparaison des résistances calculées aux résistances expérimentales

Le Tableau 2 résume les caractéristiques des spécimens, les estimations de résistance V_{Rd} et les résistances $V_{R,exp}$ établies par l'expérience. $V_{R,ex\ pest}$ défini comme la valeur observée pour un glissement relatif profil acier-béton du côté opposé à la charge appliquée qui est égal à 0,5 mm. On considère qu'il s'agit d'une estimation raisonnable de la limite élastique expérimentale.

Tableau 2 Synthèse des résistances calculées et expérimentales

Spec.	Connexion	Armature Transverse	Orient. âme profil	V_{Rd} dû à τ_{Rd} (kN)	V_{Rd} Connexion (kN)	V_{Rd} Total (kN)	$V_{R,Exp}$ (kN)	$V_{R,exp}$ $V_{Rd,tot}$
A	6 goujons ailes	1 /goujon	//	232	434	666	1050	1,57
B1	4 plats	Non	//	0	678	678	600	0,88
B2	4 plats	6 cadres	//	232	678	910	920	1,01
B3	4 plats	6 épingles	//	232	678	910	740	0,81
C	6 goujons ailes	1/goujon	T	222	434	656	910	1,38
D1	4 plats	Non	T	(222)	678	900	1000	1,11
D2	4 plats	6 épingles + 6 hoops	T	222	678	900	1000	1,11
E	2 plats +2 goujons ailes	6 épingles + 6 cadres	T	222	144 + 339 = 483	705	700	0,99 $\approx 1,00$
F	0	Non	//	514	0	514	1480	2,88
G	0-peinture	Non	//	0 (514)	0	0 (514)	580	∞ (1,12)

Le Tableau 3 présente les résistances maximum observées en cours d'essais, les résistances $V_{0,5}$ et $V_{1,5}$ correspondant à un glissement de respectivement 0,5 et 1,5mm, ainsi que le rapport $V_{1,5}/V_{0,5}$. Celui-ci est un indicateur de la ductilité de chaque type de connexion acier-béton : un comportement ductile est caractérisé par un rapport $V_{1,5}/V_{0,5}$ égal ou supérieur à 1,0.

Tableau 3. Evaluation de la ductilité des connexions.

Spécimen	Résistance Maximum atteinte V_{max} (kN)	Résistance $V_{0,5}$ pour un glissement de 0,5 mm (kN)	Résistance $V_{1,5}$ pour un glissement de 1,5 mm (kN)	Rapport de Résistance $\frac{V_{1,5}}{V_{0,5}}$
A	1150	1050	1130	1,08
B1	650	600	450	0,75
B2	947	920	800	0,86
B3	780	740	605	0,86
C	920	910	910	1,00
D1	1060	1000	920	0,92
D2	1180	1000	950	0,95
E	724	700	730	1,04
F	1796	1480	1400	0,94
G	830	580	420	0,72

5. Analyse des résultats d'essais

A l'examen des Tableaux 2 et 3, on peut faire les observations suivantes:

- Le dimensionnement des assemblages réalisés avec des goujons connecteurs en suivant les règles de l'Eurocode 4 place en sécurité et cela indépendamment de l'orientation des profils dans le mur (âme orientée parallèlement ou perpendiculairement aux faces longues du mur). La résistance expérimentale est supérieure de 40 à 50% aux valeurs calculées, alors que celles-ci ont été établies avec des facteurs de sécurité partielle fixés à 1,00. Le comportement est ductile.
- Le dimensionnement selon l'Eurocode 4, combiné avec la méthode proposée pour le calcul des connecteurs en forme de plats soudés entre les ailes des profils acier, place en sécurité pour un assemblage combinant plats soudés et goujons connecteurs : l'addition des résistances apportés par les goujons et par les plats donne une estimation correcte de la résistance réelle ; il n'y a pas de sur-résistance indiquée par le résultat expérimental par rapport au résultat du calcul. Le comportement est ductile.
- Dans les assemblages par plats seuls, si les bielles de compression sont perpendiculaires aux faces longues des murs (âme du profil acier parallèle à ces faces longues), des cadres ou étriers fermés, tels qu'utilisés dans le spécimen B2, sont nécessaires pour atteindre la résistance calculée. La Figure 7, qui donne les déplacements du profil acier par rapport au béton du côté libre du profil pour les spécimens B1, B2 et B3 met cette réalité en évidence. Le confinement du spécimen B3, réalisé par des épingles reliant les treillis soudés utilisés en armature de peau, est moins efficace : V_{Exp} est dans ce cas égal à 740 kN au lieu des 920kN réalisés par le spécimen B2, soit inférieur de 20% à la valeur calculée. Sans aucune armature capable de constituer un appui aux bielles de compression (spécimen B1), la situation est pire : V_{Exp} est égal à 600 kN au lieu de 920kN pour B2, soit inférieur de 35%.
- Dans les assemblages par plats seuls, si les bielles de compression sont parallèles aux faces longues des murs (âme du profil acier perpendiculaires à ces faces longues), on obtient la même valeur de résistance qu'il y ait ou non des armatures transversales : les spécimens D1 et D2 atteignent la même résistance expérimentale de 1000 kN ($V_{0,5mm}$). On peut comprendre que dans ce cas les bielles de compression ont un volume de diffusion plus important et qu'elles peuvent s'ancrer dans les treillis d'armature de peau des faces longues. On peut aussi remarquer que la méthode de calcul proposée pour ce type de connexion donne une estimation de résistance qui place en sécurité: 900 kN alors que la résistance expérimentale est égale à 1000 kN. Une

armature transversale augmente la raideur de la transmission de force et accroît légèrement la résistance maximum atteinte – Figure 8, mais pas la limite élastique expérimentale $V_{0,5mm}$

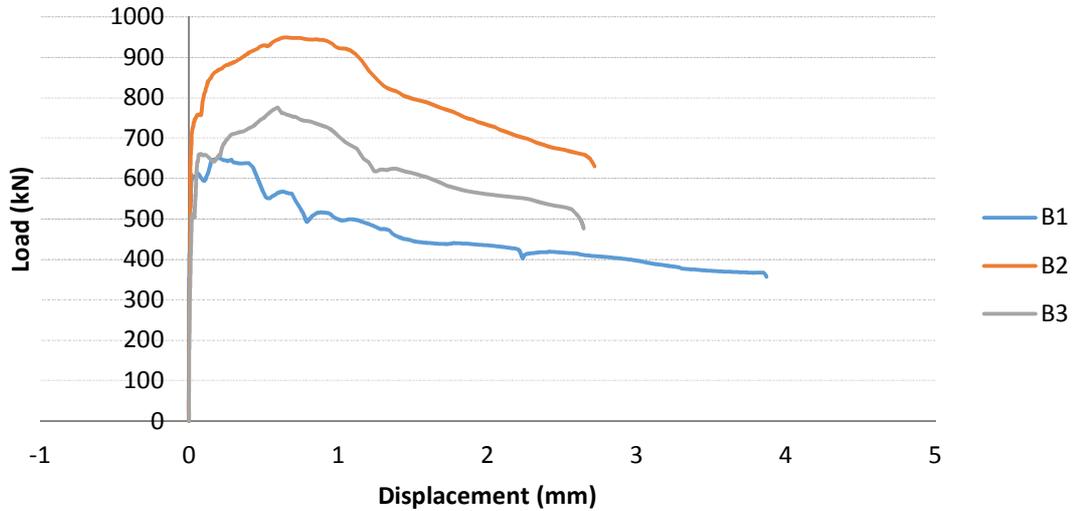


Figure 7. Déplacement du bord libre du profil acier par rapport au béton dans les spécimens B1, B2 et B3.

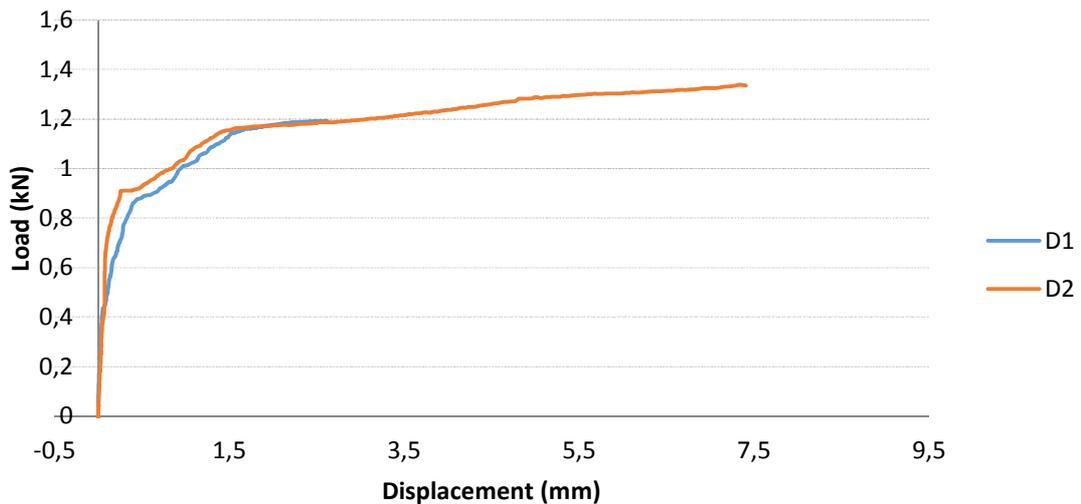


Figure 8. Déplacement du bord libre du profil acier par rapport au béton dans les spécimens D1 et D2.

- Les résultats obtenus montrent qu'en additionnant les résistances au cisaillement $\beta_c \tau_{Rd}$ à l'interface acier- béton et celles apportées par des connecteurs, goujons ou plats soudés, on obtient une résistance calculée égale ou supérieure à la résistance relevée expérimentalement.
- La résistance au cisaillement à l'interface acier- béton du spécimen F est très élevée : $\tau_{R,exp} = 1480kN/0,686m^2 = 2,15 N/mm^2$; c'est presque 3 fois plus que la valeur de calcul de l'Eurocode 4, soit $\beta_c \tau_{Rd} = 2,5 \times 0,3 = 0,75 N/mm^2$
Même si on applique un coefficient de sécurité partielle $\gamma = 1,5$ à la valeur expérimentale, on trouve $2,15/1,5 = 1,43 N/mm^2$ ce qui est encore 2 fois plus que la valeur de calcul de l'Eurocode 4. On sait que les résultats de type « adhérence » sont très dépendant de l'état de surface. Or le spécimen F a été rouillé intentionnellement à l'aide d'un brouillard salin, ce qui peut avoir augmenté la capacité d'accrochage de la surface. On peut conclure que la résistance au cisaillement à l'interface acier-béton demande des recherches ultérieures, parce que la valeur de base $\tau_{Rd} = 0,3 N/mm^2$ donnée dans l'Eurocode 4 pour le cas d'un poteau où un seul profil est

enrobé pourrait être exagérément pénalisante pour les profils enrobés dans des murs en béton armé.

- La résistance au cisaillement à l'interface acier- béton du spécimen G, qui est peint, est égale à $\tau_{R,exp}=580\text{kN}/0,686\text{m}^2=0,84\text{ N/mm}^2$. L'Eurocode 4 ne fournit pas de valeur de calcul pour ce cas, mais indique seulement qu'on ne peut donner de valeur en présence peinture, de lambeaux de rouille ou de graisse. Cependant, dans le cas de la peinture utilisée pour le spécimen G, peinture primer anti rouille, la résistance au cisaillement est supérieure à la valeur standard indiquée dans l'Eurocode 4 : $\beta_c \tau_{Rd}=2,5 \times 0,3=0,75\text{ N/mm}^2$. Il pourrait être utile de donner une base expérimentale plus large pour les profils peint de primer anti-rouille ou d'autres préparations classiques.

6. Conclusions pratiques pour les projets

Bien que le nombre d'essais réalisé soit limité, un par configuration, on peut tirer certaines conclusions pratiques utiles pour les projets de construction. Il est certain qu'une base expérimentale élargie permettrait d'affiner les résultats, en donnant une base statistique et des indications sur la variabilité des résultats et sur les coefficients partiels de sécurité à adopter.

Les conclusions concernant la résistance au cisaillement à l'interface béton- profil acier sont les suivantes :

- Les règles de l'Eurocode 4 relatives à la résistance au cisaillement à l'interface béton-profil acier sont d'application pour les profils enrobés dans des murs en béton.
- On peut calculer les connexions par plats soudés entre les ailes de profils H de la manière indiquée dans cet article.
- Si les profils en H sont orientés avec l'âme parallèle aux faces longues des murs, des armatures transversales sous forme de cadres ou étriers fermés sont requises ; ces cadres ou étriers sont calculés pour reprendre la poussée des bielles de compression mobilisées par les plats soudés.
- Si les profils en H sont orientés avec l'âme perpendiculaire aux faces longues des murs, les armatures transversales ne sont pas requises pour les profils placés dans la partie centrale du mur ; des armatures transversales sous forme de cadres ou étriers fermés sont requises pour les profils enrobés placés dans les zones d'extrémité des murs (« éléments de rive » selon la terminologie de l'Eurocode 8).
- On peut additionner les contributions apportées par la résistance au cisaillement $\beta_c \tau_{Rd}$ à l'interface acier- béton et la résistance apportée par des connecteurs, goujons ou plats soudés, afin de réaliser la résistance totale requise.

7. Remerciements

Les développements présentés ont été réalisés dans le contexte du projet SMARTCOCO financé par le RFCS (Research Fund for Coal and Steel) de la Commission Européenne dans le research grant agreement RFSR-CT-2012-00031 Smartcoco.

8. Bibliographie

- [1] EN 1992-1-1 – Eurocode 2 (2004), “Design of concrete structures, Part 1.1 – General Rules for buildings”, European Committee for Standardizations, Brussels.
- [2] ACI318-08 (2008), “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary”
- [3] EN 1994-1-1 – Eurocode 4 (2004), “Design of composite steel and concrete structures, Part 1.1 – General Rules for buildings”, European Committee for Standardizations, Brussels.
- [4] AISC(2010), “Specification for Structural Steel Buildings”, Chicago, Illinois.
- [5] SMARTCOCO Smart Composite Components – Concrete Structures Reinforced by Steel Profiles”, *RFCs-CT-2012-00031*.