
Caractérisation expérimentale du comportement statique d'une connexion hybride acier-béton innovante

Benoit Le Gac¹, Hugues Somja², Franck Palas³

¹ Ingénieur doctorant INSA de Rennes et INGENOVA – benoit.legac@bet-ingenova.fr

²HDR, professeur associé, INSA de Rennes – UEB, Département de Génie Civil et urbain, Structural Engineering Research Group, 20 Avenue des Buttes de Coësmes – CS 70839 F – 35708 Rennes Cedex 7, France – hugues.somja@insa-rennes.fr

³Ing, Directeur du bureau d'études INGENOVA, 5 rue Louis-Jacques Daguerre, CS 60825, 35 208 RENNES CEDEX 2 – franck.palas@bet-ingenova.fr

RÉSUMÉ. Le niveau d'exigence de performance thermique dans les bâtiments a considérablement augmenté au cours des vingt dernières années. Par conséquent, la mise en œuvre d'une isolation importante et le traitement des ponts thermiques sont devenus indispensables. Dans le cas de bâtiments en béton armé avec isolation thermique par l'extérieur, ce dernier point devient une préoccupation structurelle majeure, en particulier au niveau des connexions de balcons dont le monolithisme avec la façade doit être rompu. Pour ce type de liaison, un système de rupteur thermique doit être posé. Le rôle structurel de cet élément est non seulement de transférer une force verticale et un moment de flexion, mais également d'avoir une résistance horizontale suffisante pour les actions de vents et sismiques, le cas échéant. En considérant tous ces aspects, les rupteurs conventionnels, faits de barres en acier inoxydable, ne sont pas pleinement satisfaisants. C'est pourquoi une nouvelle solution de rupteur hybride acier béton a été développée. Elle se compose d'armatures tendues, de butons en U et de clés de cisaillement spécifiques. Dans cet article, les essais expérimentaux menés pour étudier le comportement statique de cette connexion sous actions verticales sont présentés. Une formulation analytique pour déterminer la rigidité en flexionnelle est proposée et validée à l'aide des résultats expérimentaux.

ABSTRACT. The level of energy performance requirements in buildings has substantially increased over the last twenty years. As a consequence, a large thickness of thermal insulation has to be used and the reduction of thermal bridges is necessary. For concrete buildings with external thermal insulations this reduction becomes a main concern for structural design of wall to balcony connections which cannot be left monolithic. For that kind of connections, a thermal break system (TBS) must be interleaved. The structural roles of this element are not only to transfer a vertical force and a bending moment but also to have a sufficient horizontal resistance for wind and seismic actions, where relevant. When considering all these aspects, the conventional TBS, made of stainless steel bars, appear to be inadequate. For that reason, a new solution of TBS has been developed. It consists of tensioned rebars, U-shaped steel sections and special shear keys. In this article, the experimental tests to study the structural behaviour of the connection under vertical actions are presented. An analytical formulation for the flexural stiffness is proposed and validated using the experimental results.

MOTS-CLÉS: Rupteur, balcon, hybride, essai, voilement, ancrage

KEY WORDS: Thermal break system, balcony, hybrid, test, buckling, anchorage

1. Introduction

Le niveau d'exigence de performance thermique des bâtiments a considérablement augmenté au cours des vingt dernières années. En France, il est imposé par la mise en application depuis janvier 2013 de la nouvelle réglementation thermique RT2012. A mesure que l'isolation des bâtiments s'améliore, la part relative des déperditions thermiques liées aux ponts thermiques augmente. Elle représentait entre 20 et 40% des déperditions sur les maisons individuelles en 2005 [Ministère de l'emploi, 2005]. Une solution efficace pour lutter contre les ponts thermiques à la liaison entre un plancher et une façade est de recourir à une isolation thermique par l'extérieur (ITE). Néanmoins, cette technique maintient des déperditions au niveau des éléments saillants des façades tels que les balcons, corniches, ...

Fort du développement d'une première solution pour le traitement des ponts thermiques en isolation thermique par l'intérieur (ITI) et validée en zone sismique [Le Bloa, 2014], le bureau d'étude INGENOVA a souhaité poursuivre sa collaboration avec l'INSA de Rennes et étendre la réflexion au cas des ponts thermiques de balcons en ITE. Dans cette configuration, la connexion structurelle entre le balcon et la structure principale du bâtiment ne doit pas seulement transférer une force verticale et un moment de flexion. Elle doit aussi garantir une raideur flexionnelle suffisante pour satisfaire les critères de flèche du balcon en service, être flexible dans le plan horizontal pour absorber les déplacements relatifs induits par la dilatation thermique du balcon tout en conservant une résistance horizontale suffisante pour la reprise des actions sismiques et de vent le cas échéant. Enfin, cette connexion doit répondre à des exigences minimales de robustesse, gage de sécurité. Ces critères doivent être atteints en optimisant la section de métal traversant l'isolant afin de maximiser la performance thermique.

Les rupteurs conventionnels à barres ne permettent pas de satisfaire pleinement ces exigences. Des solutions alternatives employant des matériaux composites ont été étudiées, mais la fragilité de ces matériaux en traction et les déformations fluage importantes en sont les principales limites [Ghazi Wakili, Simmler, & Frank, 2007; Goulouti, de Castro, & Keller, 2015; Keller, Riebel, & Zhou, 2007]. Cet article présente une nouvelle connexion hybride associant des éléments métalliques noyés dans le béton comme vecteur d'innovation. Cette technologie permet de découpler la reprise des efforts. Ainsi, le moment de flexion est équilibré par un effort de traction repris grâce à des barres crantées munies de barres transversales soudées et un effort de compression repris par des butons métalliques ayant une section en U. L'effort tranchant est quant à lui transféré par une clé de cisaillement hybride spécifique (Voir Figure 1 (a)). Tous les éléments structuraux du rupteurs sont en acier inoxydable à haute limite d'élasticité de type Duplex.

L'article présente d'abord les essais expérimentaux à échelle réelle qui ont permis de valider les propriétés de la connexion sous chargement vertical statique. Les résultats montrent la bonne ductilité du procédé et permettent par ailleurs de développer une méthode analytique pour le calcul de la raideur flexionnelle évoquée en fin d'article.

2. Protocole expérimental

La campagne expérimentale a portée sur 4 essais visant 3 déclinaisons du rupteur. Deux essais, V1 et V2, ont été réalisés sur des rupteurs identiques pour balcons de 20cm d'épaisseur afin de s'assurer de la répétabilité des résultats. Les essais V3 et V4, ont investigué des rupteurs pour balcons épais de 16cm et 25cm respectivement.

L'évaluation du comportement du rupteur sous chargement statique vertical est réalisée sur un banc d'essai à vérin vertical. Le corps d'épreuve en béton armé représente à l'échelle 1:1 le balcon, la connexion par le rupteur, un linteau et la zone de moment négatif du plancher adjacent. La position du vérin et des appareils d'appuis sont calculées de façon à obtenir une courbe de moment proche de la courbe de moment réelle. Le plancher est maintenu verticalement à l'arrière du dispositif au droit de la zone d'inflexion du moment par un appui rotulé lié à un chevre métallique. A l'avant du plancher, un linteau avec retombée de 100mm se prolonge de part et d'autre du rupteur pour éviter toute interaction entre les phénomènes physiques que l'on souhaite observer au droit du rupteur, et la reprise des efforts verticaux au droit des appuis. Le chargement s'effectue par un vérin SCHENCK d'une capacité de ± 1500 kN (voir Figure 1 (a) & (b)). Le banc est instrumenté par une cellule de force traction/compression DELTECH d'une capacité de ± 200 kN placée en gigogne avec le vérin et 8 capteurs de déplacement potentiométriques (voir Figure 1 (c)).

En complément des moyens de mesures analogiques, un dispositif de mesure par corrélation d'images est mis en place. Il est composé d'un projecteur d'éclairage et d'un appareil photographique numérique PENTAX K-5 IIs munis d'un objectif 18-55mm. Sur le corps d'épreuve des pastilles circulaires sont collées sur le béton aux quatre coins de la section du rupteur. Le post-traitement des données est effectué grâce au logiciel GOM CORRELATE.

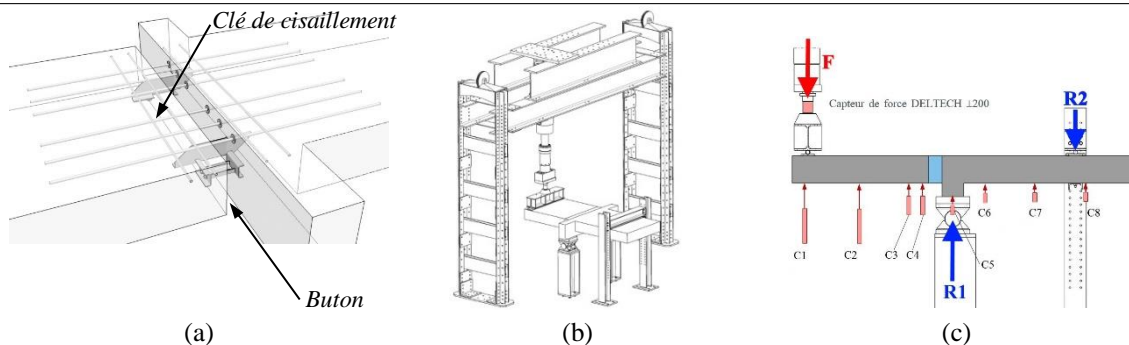


Figure 1. Détail de la connexion (a), axonométrie (b), principe et instrumentation du banc d'essai (c)

Le chargement des corps d'épreuve est de type monotone statique. 3 Cycles de chargement / déchargement jusqu'à l'Etat Limite de Service (ELS) faisant office de cylindrage, puis 1 cycle jusqu'à l'Etat Limite Ultime (ELU) sont réalisés en déplacement imposé. L'essai se poursuit ensuite en déplacement imposé jusqu'à la ruine. La vitesse de chargement au cours des essais est de 0,05 mm/s.

3. Résultats

A partir des valeurs mesurées par les capteurs de déplacement, il est possible de calculer l'évolution de la pente du plancher et celle du balcon puis d'en déduire l'angle entre les deux. La Figure 2 présente les courbes moment-rotation des 4 essais dans un graphe adimensionné. Les valeurs des moments maximums obtenus par essai et les rotations associées à ces maximums sont consignées au Tableau 1.

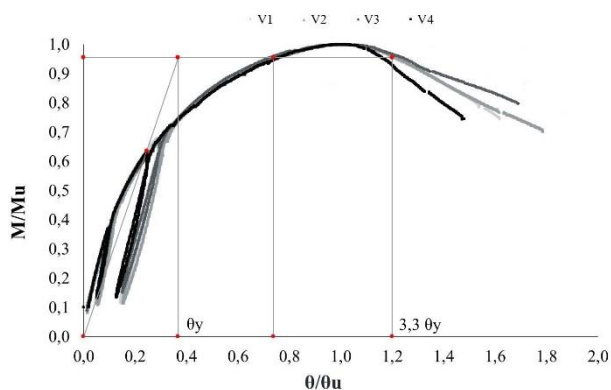


Figure 2. Courbes Moment-Rotation obtenues pour les 3 essais

Tableau 1. Moments maximums et rotations associées

Essai	M_u [kN.m]	θ_u [mrad]
V1	43,74	59,28
V2	43,07	57,77
V3	29,65	86,03
V4	85,07	52,19

Les rotations sont essentiellement dues à la déformation des rupteurs, la part de flexion du balcon et du plancher restant négligeable. Les deux essais V1 et V2 obtiennent des résultats comparables à moins de 2% près. La Figure 2 montre également que les essais V3 et V4 sont des homothéties du cas des balcons de 20cm dans la mesure où les courbes adimensionnées se superposent.



(a)



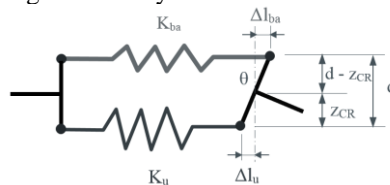
(b)

Figure 3. Banc en fin d'essai V2 (a) et voilement d'un buton et d'un profilé sur V2 (b)

On note que le comportement global des rupteurs est très ductile. D'une manière générale, il est guidé par la plastification de l'inox et l'apparition du voilement sur les éléments butons et profilés. Ce sont les profilés qui voilent les premiers par excès de compression de leur fibre inférieure. Une part de l'effort tranchant est alors reportée sur les butons. Les platines d'extrémité des butons en U ancrées dans le béton leur permettent de reprendre un effort de cisaillement vertical. Le voilement des butons se manifeste d'abord par les ailes puis par l'âme. Il correspond à l'atteinte de la charge maximale et l'évolution de la rotation du balcon post-pic est guidée par le voilement progressif des butons (voir Figure 3).

4. Discussion et perspectives

Après validation des mesures obtenues par corrélation d'image avec celles obtenues par les capteurs de déplacement, il est possible d'analyser finement la cinématique de rotation du rupteur. En particulier, le calcul de la position du centre de rotation montre que celui-ci n'est pas positionné sur l'axe neutre de la connexion. Un modèle analytique a été élaboré pour décrire le comportement en flexion du rupteur. Il assimile les barres et les butons à des ressorts respectivement tendus et comprimés dont les raideurs et les longueurs libres ont été calculés à partir des mesures expérimentales pour retrouver le comportement du rupteur (Figure 4). Comme attendu, la longueur d'ancrage libre des barres est supérieure à la largeur du boîtier du rupteur. Une perte d'ancrage se propage dans le béton. Les valeurs obtenues sous chargement ELS sont très proches des celles obtenues pour les formules de la NF EN 1992-1 et de [Fib TG6.2, 2008] et montrent que l'ancrage des barres se stabilise entre les barres transversales soudées. Le travail à venir déterminera plus précisément la participation des barres transversales à la raideur globale du système.



$$l_{ba} = \frac{E_s A_{s,ba}}{K_{ba}} = \frac{E_s A_{s,ba} \left(\frac{d-z_{CR}}{z_{CR}} \right) d^2}{K_{f,rupteur} \left(1 + \frac{d-z_{CR}}{z_{CR}} \right)} \quad [1]$$

Figure 4. Schéma du modèle analytique et formule de calcul de la longueur d'ancrage libre des barres

Conclusion

Le comportement structural d'un système de rupteur de pont thermique hybride acier béton a été étudié et rapporté dans ce papier. Les essais expérimentaux de chargement vertical statique ont montré que la connexion obtenue est robuste et ductile. La ruine est atteinte après plastification et voilement des éléments métalliques comprimés. Ce constat est valable pour les 4 essais réalisés sur 3 variantes d'épaisseur. Les courbes de comportement moment rotation montrent des résultats similaires sur les 4 essais. Grâce à l'analyse de la cinématique de rotation par corrélation d'image, un modèle analytique a été établi pour retranscrire le comportement flexionnel du rupteur. Les valeurs d'ancrage libre des barres obtenues par ce modèle sont en adéquation avec celles disponibles dans la littérature.

5. Références

- Fib TG6.2. (2008). *Structural Connections for Precast Concrete Buildings*. Retrieved from <http://www.fib-international.org/structural-connections-for-precast-concrete-buildings-pdf>
- Ghazi Wakili, K., Simmler, H., & Frank, T. (2007). Experimental and numerical thermal analysis of a balcony board with integrated glass fibre reinforced polymer GFRP elements. *Energy and Buildings*, 39(1), 76–81. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.05.002>
- Goulouti, K., de Castro, J., & Keller, T. (2015). Aramid/glass fiber-reinforced thermal break - Structural system performance. *Composite Structures*, 152, 455–463. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.038>
- Keller, T., Riebel, F., & Zhou, A. (2007). Multifunctional all-GFRP joint for concrete slab structures. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1206–1217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.003>
- Le Bloa, G. (2014). *Caractérisation du comportement sismique d'une connexion hybride plancher-voile utilisée comme rupteur de ponts thermiques*. Institut National des Sciences Appliquées de Rennes.
- Ministère de l'emploi, de la cohésion sociale et du logement-D. générale de l'urbanisme de l'habitation et de la construction. (2005). *Réglementation thermique 2005 - Des bâtiments confortables et performants*.