Identification directe des mécanismes de rupture à l'interface acier-béton

Frédéric Ragueneau — Yves Berthaud — Tran Bich Hop

LMT-Cachan, Ecole Normale supérieure de Cachan, 91, avenue du Pr. Wilson, 94 235 Cachan Cedex. France.

ragueneau@lmt.ens-cachan.fr

RÉSUMÉ. *Un nouvel essai caractérisant l'interface acier-béton est présenté dans ce travail. Evitant toute analyse inverse, inconvénient classiquement rencontré lors de l'identification de modèles utilisant des essais d'interface, cet essai permet par une géométrie plane de procéder à des mesures de champs de déplacement et de déformation par corrélation d'images numériques permettant l'identification des mécanismes de rupture directement sur l'interface. Dans cette étude, les effets de la rugosité entre surfaces, de la corrosion des aciers et de la présence d'une étreinte latérale ont pu être appréhendés. Parallèlement un modèle d'interface a été développé et identifié. Une comparaison entre simulations numériques et résultats expérimentaux issus de la littérature a permis de mettre en évidence les points positifs de la modélisation actuelle mais aussi les défauts de telles approches nécessitant des développemenst expérimentaux plus approfondis*

ABSTRACT. *A new experimental set-up is presented in this work. Avoiding any inverse analysis, classical drawback when dealing with pull-out test, the new sample, based on a plane stress geometry, allows for digital images analyses and correlation. Displacements and strain fields along the interface is then available. Materials kinematics and rupture mechanisms can be directly identified. In this study, the effects of surfaces rugosity, corrosion of steel and lateral pressure confinement can be analysed. An interface model implemented within a joint finite element has been developed and identified using the previous experimental data. Comparison with experimental results from literature allows pointing out the advantages and drawbacks of numerical modelling implying more experimental investigations.*

MOTS-CLÉS : *interface acier-béton, essais d'arrachement, éléments joints*

KEYWORDS: *steel-concrete blond slip, pull-out test, joint elements.*

1. Introduction

Considérant les modes de rupture probables d'une structure en béton armé, la perte d'adhérence constitue le mécanisme certainement le moins bien modélisé et identifié. Dans la description de la dégradation et de la rupture des zones d'interface, différents types de modèles peuvent être introduits dans l'analyse : l'approche volumique 2 ou 3 D, les éléments de contact, de joints ou d'interfaces (Allix *et al.* 1996, Cox & Hermann 1998). Du besoin de coupler les effets mécaniques et chimiques de perte d'adhérence par oxydation des aciers par exemple, la modélisation des matériaux d'interface réclame de plus en plus de raffinement. L'identification des modèles d'interface, souvent réalisée sur des essais 'structures' de type pull-out, ne peut s'effectuer que par analyse inverse. Ainsi, les différents effets des contraintes de cisaillement, des contraintes latérales de serrage (non maîtrisées) et des effets chimiques de corrosion ne peuvent être aisément discriminés. Dans cet optique, un nouveau dispositif d'identification directe de ruptures d'interface a été développé (Ouglova 2004). Cet essai, par des conditions limites adéquates permet un contrôle du rapport entre contrainte de cisaillement et contrainte normale à la surface de rupture. Sa géométrie particulière permet aussi des mesures de champs par corrélation d'images numériques. Certaines informations nécessaires à la modélisation telle que l'épaisseur de la couche d'interface dégradée peuvent ainsi être directement mesurées selon le type d'interface et de rugosité.

Des essais permettant de mettre en évidence les effets découplés de la rugosité, des contraintes latérales, et de la dégradation chimique sont présentés. Un modèle d'interface couplant ces différents mécanismes sources de rupture a ainsi pu être identifié et validé à l'échelle locale de l'éprouvette (Ragueneau et al. 2005).

2. Identification expérimentale de l'interface acier par mesure de champs

2.1. Dispositif expérimental

Les classiques essais d'adhérence acier béton ne permettent pas une identification directe des propriétés mécaniques de l'interface du fait même du caractère structurel de ces essais, comme les essais pull-out, tirant, ou par flexion 3 points (Eligehausen *et al.* 1983, Malvar 1992, Bamonte *et al.* 2002). Des analyses numériques de ces essais montrent une très forte inhomogénéité des contraintes le long de l'interface. De plus, des mesures physiques sont rendues impossibles de par la présence même du béton de couverture entourant la zone d'étude. La volonté de vouloir accéder directement à des quantités cinématiques entre les matériaux en présence rend impossible la configuration de type axisymétrique. D'autre part, du fait de conditions limites inadaptées et mal maîtrisées, un confinement latéral inhomogène apparaît le long de l'interface engendrant un état de contrainte lui-même

inhomogène et supportant une étreinte latérale parasite empêchant toute mesure objective de la résistance au cisaillement de ces zones d'interface.

Partant de ces considérations, un nouvel essai d'adhérence acier-béton a été imaginé, permettant par une géométrie plane de procéder à des mesures de champs de type déplacement et déformation le long de l'interface et par des conditions limites et de chargement adaptés (triple rotule) de prévenir toute occurrence de contrainte latérale parasite, voir par un dispositif de chargement orthogonal de les imposer. La figure 1 montre la géométrie de l'éprouvette, Trois barres en acier sont fixées en rotation libre à la machine de traction. 2 barres assurent le maintien général de l'éprouvette et la troisième est celle sur laquelle le test d'adhérence est effectivement réalisé. La géométrie de l'éprouvette permet un positionnement aisé d'une caméra CCD permettant la prise d'images numériques utilisées ultérieurement lors d'analyses par intercorrélation.

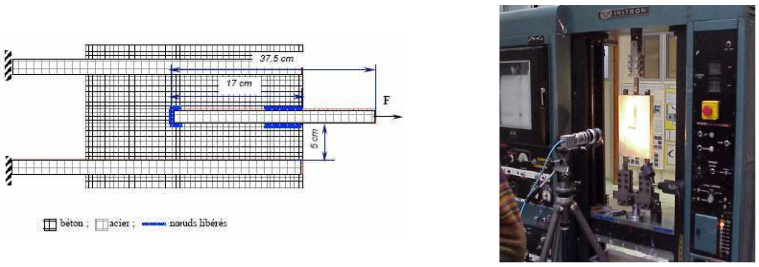


Figure 1 : Eprouvette en contrainte plane d'essais d'adhérence acier-béton

2.2.. Mesures de champs et résultats expérimentaux

Différentes rugosités entre l'acier et le béton ont pu être testées : lisses, corrodées et nervurées. La figure 2 montre les réponses en terme d'effort-déplacement.

Trois rugosités différentes

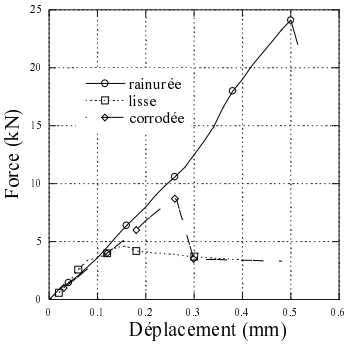
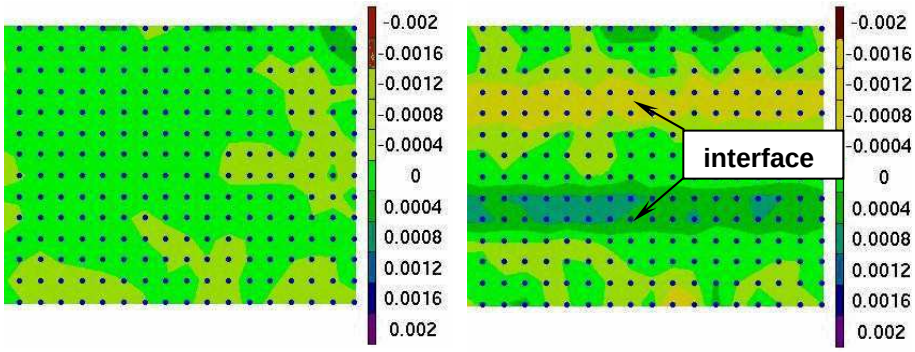


Figure 2 : Effort-déplacement en tête pour trois rugosités différentes

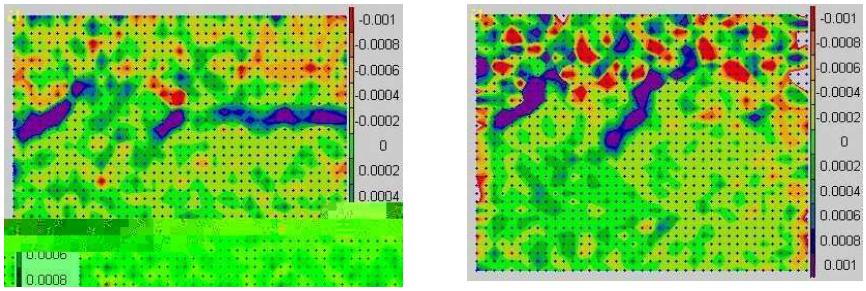
Une caméra numérique (1000 x 1000 pixels) a été utilisée pour pratiquer à des mesures de champs dans la zone d'intérêt de l'interface. Les images ont été analysées utilisant le logiciel CORRELI^{LMT} (Hild 2002), basé sur une approche

multi-échelle des zones d'études, il permet de déterminer les déplacement et champs de déformations le long de l'interface. Pour les deux types extrêmes de rugosité, les figures 3 et 4 montrent un champ de déformation interpolé dans la direction (X) et (Y). Par analyse d'images, des discontinuités de déplacement sont apparues aux interfaces avant le pic dans le diagramme effort-déplacement.



Déformation axiale normale pour Fmax/2 Déformation axiale normale pour Fmax

Figure 3 : Déformations par corrélation d'images numériques le long de l'interface : interface lisse



Déformation axiale normale pour Fmas Déformation latérale normale pour Fmax

Figure 3 : Déformations par corrélation d'images numériques le long de l'interface : interface nervurée

Il apparaît de l'analyse par corrélation d'images numériques une zone de béton affectée par la rupture d'adhérence dépendant de la rugosité de l'interface. Cette longueur dénotée l_w dans la suite est approximativement égale à $l_w = 1.5\ mm$ pour le cas des barres nervurées. Des analyses numériques basées sur une approche éléments finis et éléments discrets de l'interface a conduit à cette même valeur de zone affectée dans le cas de nervures (Ragueneau *et al.* 2005).

De la même manière, les influences sur la résistance à l'arrachement d'une étreinte latérale et celle d'une corrosion accélérée in-situ ont pu être mesurées pour cet essai. La figure suivante présente les résultats expérimentaux obtenus sur cette éprouvette concernant ces deux modes de dégradation de l'interface.

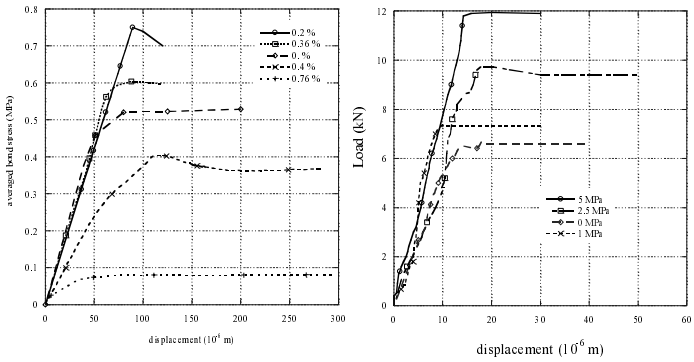


Figure 4 : Influence de la corrosion (a) pour différents états de corrosion et de l'étreinte latérale (b) sur une barre d'acier lisse

La corrosion appliquée in situ, dont le niveau d'attaque a été mesuré suivant une loi de Faraday, reproduit bien un mécanisme classique de légère augmentation pour de faibles niveaux de corrosion correspondant au remplissage de la porosité dans la zone d'interface puis à une soudaine chute de résistance au cisaillement du fait même de la fissuration longitudinale provoquée par la croissance de produits de corrosion.

Les effets de la contrainte latérale sont retrouvés ici permettant de parfaitement gérer le niveau de confinement de l'interface. Utilisant un diagramme de Mohr-Coulomb, une cohésion de 1,35 MPa et un angle de frottement interne de 12° ont ainsi pu être identifié expérimentalement.

3. Modélisation de l'interface acier béton

3.1. Lois de comportement et éléments finis

Les modèles d'interface dans la littérature nécessitent de s'intéresser à deux aspects complémentaires que sont les lois de comportement et la cinématique de déplacements entre les matériaux. Utilisant des essais classiques de rupture d'interface type pull-out, seuls des modèles globaux exprimés en terme de traction-saut de déplacement sont utilisés (Cox & Hermann 1988). En ce cas, des analyses inverses sont obligatoires si des lois de comportement d'interface doivent être identifiées. Désirant s'abstenir des classiques inconvénients numériques d'instabilité

liés à l'utilisation d'éléments de contact, l'utilisation de lois de comportement classiques exprimées en contrainte-déformation sur l'interface a semblé un choix pragmatique assurant une robustesse importante à l'intégration numérique. En ce cas, concernant des éléments d'interface, une longueur interne, liée à la taille de la zone de béton affectée doit être introduite permettant de définir la notion de déformation dans un élément d'épaisseur nulle. Appliquée à un élément dégénéré à 4 nœuds (Ragueneau *et al.* 2006), les déformations normal et de cisaillement sont simplement obtenues par :

$$\varepsilon_N = \frac{\Delta v}{l_w} \text{ et } \varepsilon_\tau = \frac{\Delta u}{l_w}$$

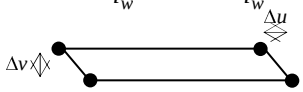


Figure 5. Elément d'interface dégénéré à 4 noeuds.

La loi de comportement régissant la relation entre contrainte et déformation est basée sur la mécanique de l'endommagement introduisant une fissuration en mode I et II. Le couplage de l'endommagement et du frottement interne permet de prendre en compte le comportement hystérétique de l'interface sous chargement cyclique ainsi que les effets de confinement latéral.

3.1. Comparaisons essais-calculs

Des simulations numériques ont été effectuées considérant une approche mésoscopique de la dégradation de la jonction acier-béton. La longueur interne $l_w = 1.5\,mm$ identifiée préalablement a été utilisée dans les simulations numériques suivantes. La simulation de l'essai d'arrachement a été réalisée sans étreinte latérale, la carte des contraintes de cisaillement au pic de l'effort ainsi que la réponse globale en terme d'efforts-déplacement sont présentées dans la figure suivante.

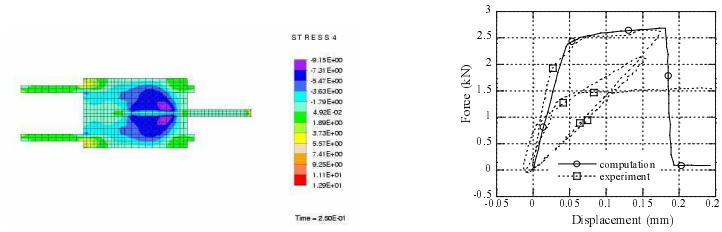


Figure 6. Simulation de l'essai d'interface sur plaque. (a) contrainte de cisaillement. (b) comparaison essais calculs

L'influence des effets d'une contrainte latérale a pu être identifiée préalablement. Afin de valider la modélisation par élément d'interface à 4 nœuds dégénérés et de la loi de comportement, des essais d'arrachement à pression latérale ont été simulés (La

Borderie & Pijaudier-Cabot 1994). La figure 7 montre les réponses en terme d'éffort-déplacement pour les essais et les calculs ainsi qu'une analyse quantitative sur la reproduction des variations de contraintes au pic et de déplacement.

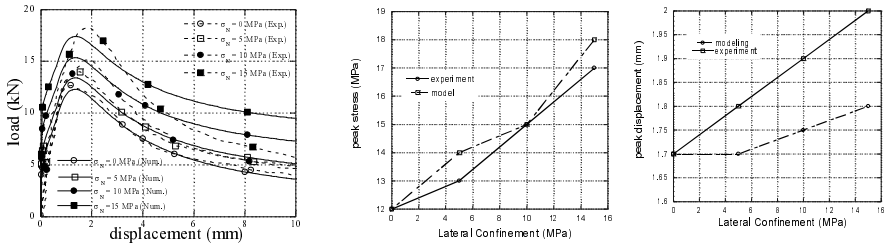


Figure 7. Simulation d'un essai d'arrachement pour différents d'étreintes latérales (La Borderie & Pijaudier-Cabot 1994). (a) efforts-déplacements. (b) simulation de la contrainte au pic. (c) simulation du placement au pic

Au regard des comparaisons expérimentales, il apparaît clairement que les allures générales des courbes expérimentales sont retrouvées par la modélisation éléments finis, surtout concernant la reproduction des efforts au pic en fonction du taux de confinement. Par contre, concernant les déplacements, ces derniers sont largement sous-évalués pour des forts taux de confinement latéral. La taille de la zone dégradée, introduite dans la modélisation éléments finis, a été identifiée sur des essais sans étreinte latérale. Il semble que cette dernière soit affectée elle aussi par le niveau d'étreinte latérale. Une identification par corrélation d'images sous différents taux de confinement semble donc nécessaire afin d'envisager, au niveau de la modélisation, une évolution de cette longueur interne dépendant du niveau d'étreinte.

4. Conclusion

Dans le but d'éviter toute analyse inverse d'essais d'adhérence caractérisant l'interface acier-béton, un nouveau dispositif expérimental a été imaginé. Ce dernier, abandonnant les classiques géométries axisymétriques, permet de procéder à des mesures physiques de champs de déplacement directement par corrélation d'images numériques. Bénéficiant de conditions limites adéquat, cet essai évite l'apparition de toute contrainte latérale parasite empêchant l'identification de mode de rupture en cisaillement pure. Par l'application d'efforts latéraux contrôlés, l'influence de la contrainte de serrage peut être objectivement observée. La simplicité de la géométrie permet aussi d'aborder des effets délicats tels que ceux d'une corrosion sur la résistance de la liaison acier-béton. Se basant sur ces observations expérimentales, un modèle de comportement d'interface (au sens éléments finis et lois de comportement) a pu être identifié. Ce dernier permet de bien reproduire les effets de rugosité par l'introduction d'une longueur interne de zone dégradée et les effets de

confinement latérale sur la contrainte au pic par une loi de comportement couplant endommagement et friction. Toutefois, il semble que la cinématique (taille de la zone de béton dégradée) de l'interface soit fortement affectée par la présence d'une étreinte latérale. De plus amples investigations dans ce sens devront être entreprises.

7. Bibliographie

Allix, O., Ladevèze, P. & Corigliano A. (1996) Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens, International Journal of Fracture, 77: 111-140.

Bamonte, P.,Coronelli, D. & Gambarova, P.G. (2002) Size Effect in high-bond bars. "Bond in Concrete: from research to standards" Proceedings of the 3rd. International Symposium at the Budapest University of Technology and Economics : 43-52.

Cox, J.V. & Hermann, L.R. (1998) Development of a plasticity bond model for steel reinforcement. Mechanics of Cohesive-Frictional Materials 3: 155-180.

Eligehausen, R., Popov, E.P. & Bertero, V.V. (1983). Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations. University of California ; Report no. UCB/EERC-83/23 of the National Science Foundation.

Hild, F. (2002) CORRELI^{LMT}: a software for displacement field measurements by digital image correlation, Internal report N° 254. LMT-Cachan.

La Borderie C. & Pijaudier-Cabot G. (1994); Etude expérimentale du comportement des matériaux renforcés : Détermination expérimentale des lois de comportement de l'interface fibre-matrice . Laboratoire de Mécanique et Technologie (LMT) ; ENS Cachan/CNRS/Université Paris 6 ; Contrat I 70/1F 3146 avec Electricité de France.

Malvar, L.J. (1992) Bond reinforcement under radial confinement. ACI Materials Journal, 89(6): 593-601.

Ouglova A., (2004) Etude du Comportement Mécanique des Structures en Béton Armé Atteintes par la Corrosion. Thèse de Doctorat. ENS-Cachan.

Ragueneau F. Dominguez N. and Ibrahimbegovic A., (2006) Thermodynamic-Based Constitutive Model for Concrete-Steel Bond Modeling, Computer Methods in Applied Mechanics in Engineering, to appear.

Ragueneau F., Delaplace A., François M., Ouglova A. & Yves Berthaud, 2005, Identification of the properties of steel concrete interface through optical tests, Euromech-Mecamat, EMMC8, 13-15 Septembre 2005, Cachan.