

Essais PIAF : Pour Identifier l'Adhérence et le Frottement

B.-H. Tran, Y. Berthaud & F. Ragueneau

Laboratoire de Mécanique et Technologie (LMT)
61 Avenue du Président Wilson - 94235 Cachan Cedex
Email : tran@lmt.ens-cachan.fr

Résumé :

On présente dans ce travail un nouvel essai, nommé essai PIAF, en vue d'étudier le comportement de l'interface acier-béton en l'absence de confinement dû à la fois à la géométrie (séchage) et aux conditions aux limites dans l'essai d'arrachement classique. L'essai PIAF permet de mieux comprendre l'influence d'une étreinte latérale sur le comportement de l'interface. Pendant l'essai, les champs de déplacement ont été mesurés par corrélation d'images numériques à l'aide du logiciel CORRELI^{LMT}. Un modèle de comportement mécanique de l'interface a été développé et identifié. Les résultats numériques dans le code Castem 2000 sont comparés avec ceux obtenus par les expériences en vue de valider le modèle proposé.

Abstract:

We present in this work a new test, named PIAF test in order to study the steel-concrete interface behavior in the absence of the effects of confinement due to both the geometry (shrinkage) and the boundary conditions arising in the classical test. The PIAF test allows to better understand the influence of a lateral confinement on the behavior of the interface. During the PIAF test, the displacements fields are complied by digital images correlation CORRELI^{LMT}. A mechanical model of the behavior of the interface has been developed and identified. The numerical results (Castem 2000 FE code) are compared to the ones obtained by experimental measurements in order to validate the proposed model.

Mots-clefs : interface ; corrélation ; Mohr-Coulomb

1 Introduction

Le comportement du béton armé est conditionné par la liaison entre le béton et les barres d'armature. Le chargement est habituellement transmis par le béton sur l'acier. La transmission des efforts est effectuée grâce à l'adhérence entre l'acier et le béton. Les travaux expérimentaux effectués dans les trente dernières années ont conduit à une compréhension plus ample du phénomène d'adhérence acier – béton et ils ont servi à identifier plusieurs paramètres pour établir des lois de comportement de l'interface acier-béton, ainsi qu'à introduire plusieurs recommandations dans les codes internationaux de construction.

2 Etudes expérimentales

2.1. Description des essais

Pour améliorer les essais d'adhérence acier-béton (Pull-out, poutre par flexion trois points,...) dans lesquels on obtient une inhomogénéité de la contrainte le long de l'interface, un autre essai d'arrachement a été conçu. L'avantage de cet essai est qu'il limite les efforts latéraux qui apparaissent lors des essais d'arrachement classiques et qu'il permet la mesure du champ de déplacement autour de la barre centrale par corrélation d'images numériques avec le logiciel CORRELI^{LMT}. Ces mesures complémentaires donnent des résultats sur la cinématique à l'interface (Ouglova, 2004).

La géométrie des éprouvettes de l'essai PIAF est montrée dans la figure 1. Les essais PIAF sans ou avec contrainte normale (1MPa, 2,5MPa, 5MPa) sont réalisés sur des éprouvettes en béton dans lesquelles trois barres en acier sont noyées. Les barres utilisées dans les essais présentés sont des barres lisses. Le montage expérimental de ces essais a été fixé sur la machine de traction INSTRON (Fig. 2). Les liaisons sont des liaisons de type rotule pour éviter tout effet parasite (flexion). Ces essais comprennent l'extraction en traction de la barre centrale d'acier de l'éprouvette mince en bloquant le déplacement des deux autres barres à leur extrémité. Les deux « fenêtres » de l'éprouvette permettent d'observer la zone de contact acier – béton via une caméra CCD (*Charge-Coupled Device*).

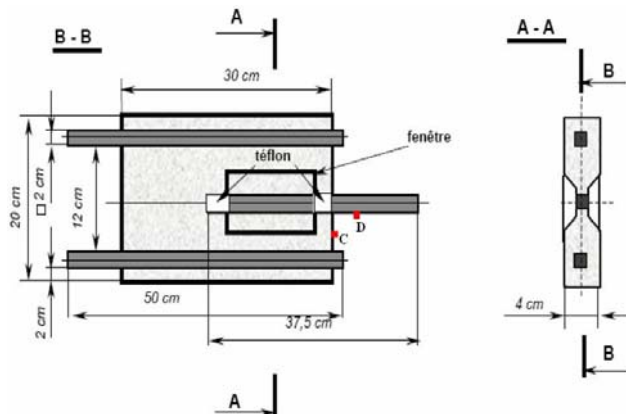


Fig.1 : Epreuve de l'essai PIAF



Fig.2 : Disposition de l'essai PIAF

Sur la base de simulations EF (adhérence parfaite, acier élastique, béton endommageable) nous pouvons confirmer que la contrainte normale à l'interface (confinement) est quasi nulle (Ouglova, 2004) ce qui valide la géométrie proposée.

2.2 Résultats expérimentaux

La figure 3 présente les résultats expérimentaux obtenus sur les éprouvettes avec contrainte latérale imposée de 0 ; 1 ; 2,5 et 5 MPa. Nous constatons que l'effort pour lequel il y a un glissement relatif entre le point D situé sur la barre centrale et le point C situé sur le béton (Fig. 1) augmente avec la valeur du confinement imposé ce qui paraît logique. Les valeurs des contraintes de cisaillements déduites des essais sont reportées en fonction de la contrainte normale.

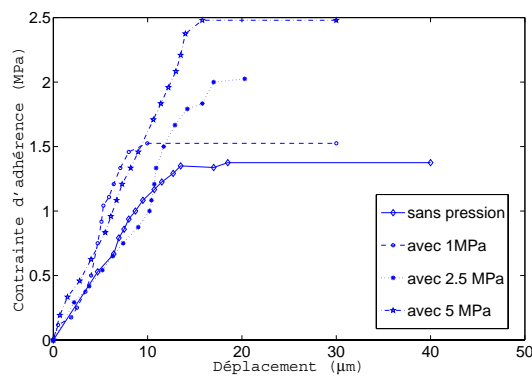


Fig.3 : Relation contrainte d'adhérence-déplacement pour l'éprouvette LMT

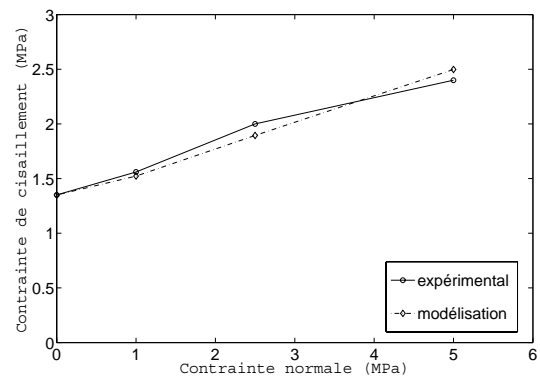


Fig.4 : Loi de comportement de l'interface dans un diagramme de Mohr-Coulomb

Sur la figure 4 on observe qu'une loi de Mohr-Coulomb est bien adaptée :

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg}\varphi + c, \quad (1)$$

où τ et σ_n représentent respectivement la contrainte tangentielle et la contrainte normale. On en déduit la cohésion $c = 1,35$ MPa et l'angle de frottement interne $\varphi = 12^\circ$ obtenues à partir des résultats expérimentaux.

Pour avoir d'avantage d'informations sur les variations des déplacements pendant la réalisation des essais, une caméra Pixelfly PCO CCD de résolution 1200 x 1000 pixels a été utilisée pour enregistrer des images à des instants prédéfinis (Fig. 5).

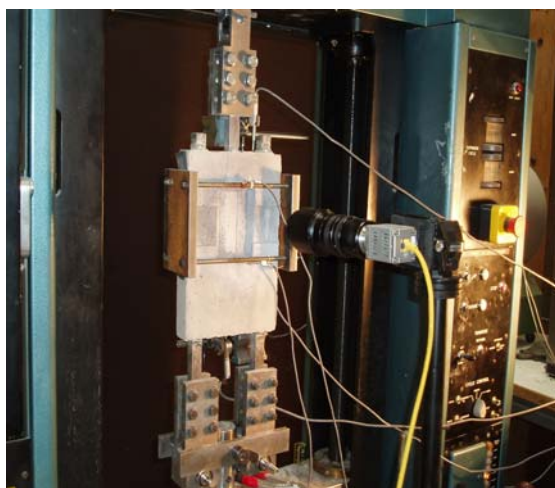


Fig.5 : Mise en place de la caméra



Fig.6 : Image prise par la caméra

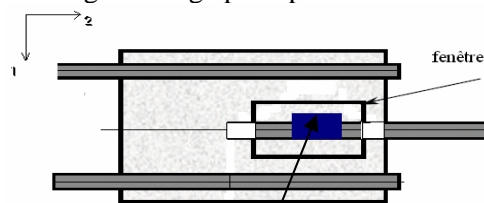


Fig.7 : Zoné étudiée

Une image de référence d'une zone choisie sur l'éprouvette est présentée sur les figures 6 et 7. Pendant les essais d'arrachement, les images de la zone d'étude sont prises pour chaque chargement appliqué et analysées en utilisant une corrélation d'images numériques (Hild et al., 2002). Le but de cette corrélation d'images numériques est d'étudier le déplacement le long de l'interface acier-béton pendant les essais PIAF.

Les figures ci-dessous présentent les iso-valeurs de déplacement selon les directions 1 et 2 (Fig. 7) pendant les essais sans et avec pression appliquée. L'interface entre l'acier et le béton est présentée par une ligne continue sur les figures. Les valeurs mesurées dans les figures sont en pixel (1pixel ≈ 30 μm).

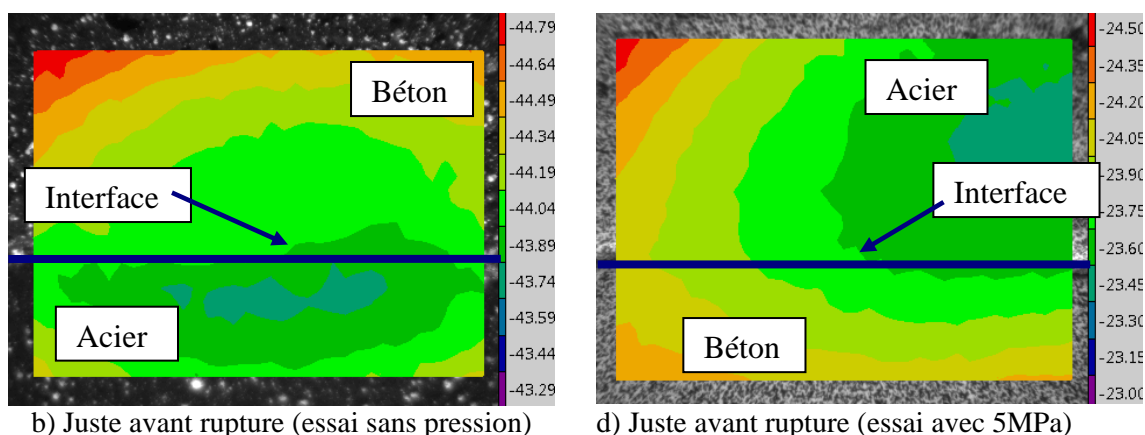


Fig.8 : Déplacement par corrélation d'image numérique le long de l'interface selon la direction 1

On trouve que dans les essais PIAF, sans ou avec contrainte normale (1MPa ; 2,5MPa ; 5MPa), les iso-déplacements sont continus à travers l'interface acier-béton selon la direction normale 1 (Fig. 8), tandis que les iso-déplacements sont discontinus selon la direction tangentielle 2 (Figs. 9b et 9e). Ce constat montre qu'il y a un glissement relatif entre l'armature et le béton. La discontinuité de déplacement diminue à travers l'interface acier-béton avec l'augmentation de la pression appliquée (Figs. 9c et 9f).

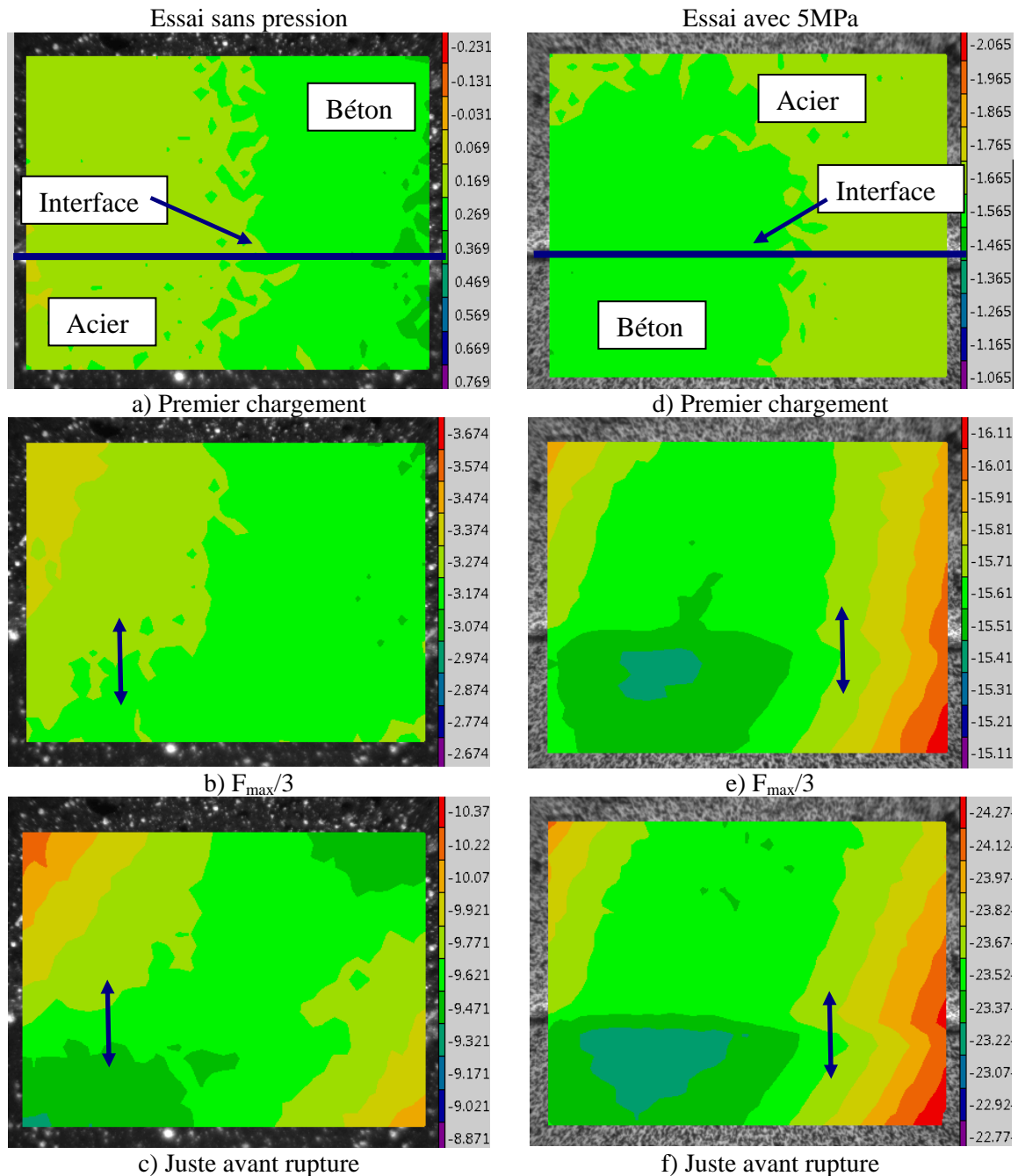


Fig.9 : Déplacement par corrélation d'image numérique le long de l'interface selon la direction 2

3 Modélisation

Ces images des champs de déplacement montrent qu'il y a un glissement relatif et pas de discontinuité normale pour les barres lisses. Ce glissement conduit à une contrainte tangentielle d'interface constante. Pour les structures en béton armé, le problème de contact entre l'acier – béton induit des discontinuités au niveau des propriétés mécaniques. Dans le code CASTEM 2000, un élément joint a été implanté spécialement pour décrire cette discontinuité. Plus précisément, pour le problème en 2D axisymétrique, cet élément joint peut être considéré comme un triangle à 3 ou 6 nœuds, ou un quadrilatère à 4, 8 ou 9 nœuds à travers lesquels le vecteur déplacement est discontinu et le vecteur contrainte est continu. Dans cette étude, nous utilisons l'élément joint quadrangulaire à 4 nœuds (JOI2), c'est-à-dire, deux nœuds différents liés aux deux matériaux sur la même coordonnée initiale. En fait, il s'agit d'un cas de dégénération d'un élément quadrangulaire bidimensionnel en un élément unidimensionnel à 2 coordonnées (Dominguez, 2005).

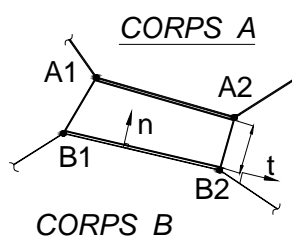


Fig.10 : Élément joint à 4 noeuds

Cet élément joint caractérisé par K_s et K_n qui sont respectivement les raideurs normale et tangentielle de l'élément joint et déterminées par :

$$K_s = \frac{E}{2 \times (1 + \nu) \times \beta}, \quad K_n = \frac{E}{\beta}, \quad (2)$$

où β est l'épaisseur du joint ; E représente le module d'Young de l'élément joint et ν désigne le coefficient de Poisson. Les contraintes normale σ_n et tangente τ sont reliées aux sauts de déplacements normal $[u_n]$ et tangent $[u_t]$ par la loi d'interface qui s'écrit sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \sigma_n \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_n & 0 \\ 0 & K_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [u_n] \\ [u_t] \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Par ailleurs, l'élément joint obéit au critère de Mohr-Coulomb.

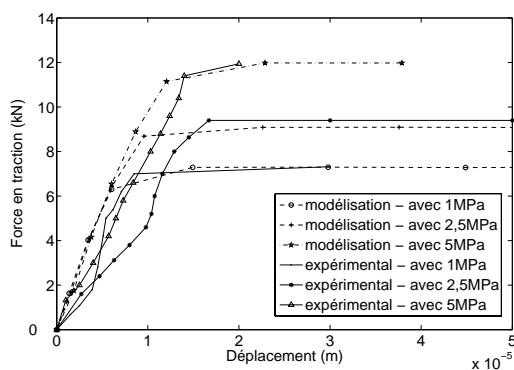


Fig.11 : Relation force en traction-déplacement

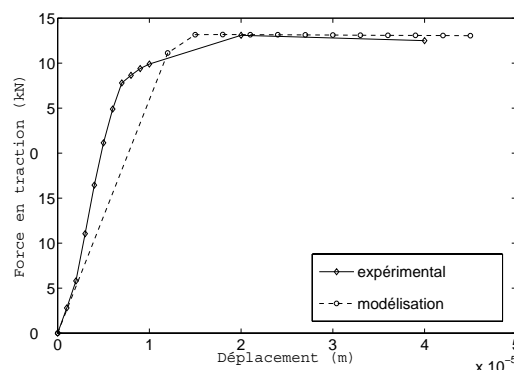


Fig.12 : Relation force en traction-déplacement dans l'essai Pull-out

Nous montrons sur la figure 11 les courbes force – déplacement relatif issues des calculs EF et des essais PIAF. On constate une bonne concordance des réponses.

Nous utilisons dans la suite les valeurs de K_s et K_n obtenues par simulation numérique pour l'éprouvette de l'essai (Fig. 11), et de c et ϕ expérimentalement obtenues par des essais, en vue de simuler numériquement l'essai Pull-out réalisé avec les mêmes matériaux. La figure 12 présente la relation entre la force de traction et le déplacement pour l'éprouvette Pull-out. Ce résultat confirme que dans l'essai d'arrachement classique Pull-out, la contrainte cisaillement de l'interface obtenue prend en compte la contrainte normale provoquée par l'effet de confinement.

4 Conclusions et remarques

Un nouveau type d'essai d'arrachement a été proposé dans ce travail. Nous avons mis en évidence l'influence de la contrainte normale sur le comportement de l'interface.

La corrélation d'images numériques nous a fourni des informations concernant le début de l'endommagement de l'adhérence acier-béton (sur une zone limitée d'analyse de quelques centimètres carrés). Le glissement relatif de l'armature dans le béton a eu lieu pour une contrainte d'adhérence inférieure à la valeur maximale enregistrée pendant l'essai.

L'identification d'un critère de Mohr-Coulomb implantée dans le code Castem permet à la fois la simulation des essais PIAF et des essais de type Pull-out. Dans ce dernier cas nous retrouvons par simulation les résultats expérimentaux ce qui confirme la pertinence de l'analyse. Le modèle de l'interface acier-béton utilisé dans cette étude est appliqué à l'éprouvette avec barre centrale lisse. Une nouvelle étude permettra de valider ce modèle avec des barres nervurées ou corrodées.

Références

- Beer, G., 1985. An isoparametric joint/interface element for finite element analysis, *International journal for numerical methods in engineering*, 21, 585 – 600.
- Daoud, A., 2003. Etude expérimentale de la liaison entre l'acier et le béton auto-plaçant – Contribution à la modélisation numérique de l'interface, *Thèse de l'INSA de Toulouse*.
- Dominguez, N., 2005. Etude de la liaison acier-béton : de la modélisation du phénomène à la formulation d'un élément fini enrichi « Béton armé », *Thèse de doctorat ENS – Cachan*.
- El Hage, C., 1998. Modélisation et étude expérimentale de l'interface acier – béton sous sollicitations dynamiques de types sismiques, *Rapport du DEA MAISE*.
- Hild, F., Raka, B., Baudequin, M., Roux, S., Cantelaube, F., 2002. Multiscale displacement field measurements of compressed mineral-wool samples by digital image correlation. *Applied Optics*, 41, 6815-6828.
- Konstantinos, V. S., 2004. Influence of corrosion and of the shape of the surface of the reinforcements in the steel-concrete adherence in reinforced concrete structures, *Report of the experimental stage under the student exchange programme*.
- Ouglova, A., 2004. Etude du comportement mécanique de la corrosion dans le béton armé, *Chapitre 5 - Thèse de doctorat ENS – Cachan*.
- Pegon P., Presentation of the element JOINT_DILATANT, *Site: <http://www-cast3m.cea.fr/cast3m/>*
- Pijaudier-Cabot, G., Huerta, A., Bode, L., 1993. Modélisation des matériaux et calculs à la rupture, *Mécanique Industrielle et Matériaux*, 46, 76 – 79.
- Snyman, M. F., Bird, W. W., Martin, J. B., 1991. A simple formulation of a dilatant joint element governed by Coulomb friction, *Engineering computations*, 8, 215-229.