

# Etude expérimentale de l'adhérence acier-béton à l'aide de la technique d'émission acoustique

D. Mezhoud<sup>1,2</sup>, J. Saliba<sup>1</sup>, Z.M. Sbartaï<sup>1</sup>, Y. Bouafia<sup>2</sup>, M. Saad<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Bordeaux, UMR 5295, Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), Dépt. Génie Civil et Environnemental (GCE), 33405 Talence, France, e-mail : jacqueline.saliba@u-bordeaux.fr

<sup>2</sup> Université Mouloud Mammeri, Laboratoire LaMoMS, Département de génie civil, BP 17, Tizi-Ouzou 15000, Algérie.

---

*RÉSUMÉ.* La fissuration du béton est principalement influencée par la répartition des contraintes le long de l'interface entre l'acier et le béton. Ainsi, une évaluation quantitative de l'influence de la liaison acier-béton sur les propriétés de rupture est importante. Une investigation expérimentale sur l'adhérence acier-béton est présentée dans cette étude. Des essais d'arrachement ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques avec des barres d'acier de diamètres différents avec, en parallèle, un suivi continu à l'aide de la technique d'émission acoustique (EA). Deux modes de ruptures ont été observés selon le diamètre des barres : rupture par traction du béton et une rupture par glissement de l'acier avec un endommagement localisé à l'interface acier-béton. Les résultats montrent une bonne corrélation entre la contrainte d'adhérence et l'activité acoustique. La localisation des événements acoustiques reproduit bien la position réelle des fissures. Les paramètres des signaux d'EA (durée, amplitude, fréquence, etc.) montrent une relation directe avec les modes de rupture et permettent de distinguer les différentes phases caractérisant l'interaction entre le béton et l'acier.

*ABSTRACT.* Cracking in reinforced concrete structure is of major concern since it may impact their durability and their structural integrity. Cracking is mainly influenced by the stress distribution along the interface between steel and concrete which is responsible of transferring load from steel bar to the surrounding matrix. Thus, quantitative evaluation of the influence of steel-concrete bond on the fracture properties is important. An experimental investigation is reported in this study. Pull-out tests are conducted on cubic specimens with different steel sections in parallel with a continuous monitoring using the acoustic emission (AE) technique. This latter allows real time monitoring of the fracturing stages and can provide useful information about the location of defects and damage characteristics. Two failure modes are observed according to the steel bar section: concrete cover splitting and pull out with damage concentrated near the concrete rebar interface. The results show a good correlation between the loading force and the AE activity. In addition, the location of AE events was consistent with actual crack development. The characteristics of AE signal (duration, amplitude, frequency, etc.) showed also different changes indicating different active fracture mechanisms.

*MOTS-CLÉS :* béton armé, endommagement, essais d'arrachement, émission acoustique.

*KEYWORDS :* Damage, reinforced concrete, pull out tests, acoustic emission

---

## 1. Introduction

Les fissurations constituent un des problèmes majeurs dans les structures en béton armé car elles peuvent compromettre la durabilité et l'intégrité structurelle des ouvrages. Ces fissurations sont majoritairement influencées par la distribution des contraintes à l'interface acier béton qui permet le transfert des efforts entre les barres d'acier et le béton au voisinage. L'adhérence acier béton a été largement étudiée dans la littérature et trois mécanismes principaux ont été distingués : l'adhérence d'origine chimique, l'interaction mécanique entre les nervures des barres d'acier et le béton avoisinant, et le frottement acier-béton ou béton-béton [RAM 97]. Par contre, très peu d'études ont analysé la réponse acoustique correspondant aux mécanismes de dégradation afin de permettre une meilleure utilisation de la technique d'EA pour le suivi des structures existantes.

Dans cette étude, une investigation expérimentale est proposée afin de caractériser les différentes phases de dégradation de l'interface acier béton. Des essais d'arrachement « pull-out » ont été réalisés en considérant des barres d'acier de diamètres différents. L'essai d'arrachement n'est pas représentatif des conditions réelles de chargement comme dans le cas des poutres mais peut servir comme base de comparaison entre les types de béton et de barres, la géométrie des nervures, etc. Ces essais ont été suivis en temps réel à l'aide de la technique d'émission acoustique. C'est une méthode de contrôle non-destructif en continu (monitoring) de plus en plus utilisée dans l'exploitation et la mesure des évolutions liées aux phénomènes structuraux. Cette méthode permet de localiser d'éventuelles microfissures naissantes et d'évaluer quantitativement l'adhérence acier-béton [LEI 16]. Les différences du comportement des éprouvettes prismatiques en béton armé avec des pourcentages d'acier différents ont été identifiés en comparant les courbes contrainte d'adhérence – glissement à la variation de l'activité acoustique.

Dans la première partie de cet article, les conditions d'essais et les matériaux testés sont présentés. Par la suite, une analyse détaillée des paramètres des signaux d'EA en fonction de la contrainte d'adhérence est proposée afin de caractériser les différentes phases de rupture.

### 1. Programme expérimental

#### 1.1. Matériaux utilisés

Le béton utilisé est composé de granulats roulés avec un diamètre maximal de 16 mm, d'un ciment CEM II 42,5 (Tableau 1). Cette formulation est caractérisée par un rapport eau/ciment de 0,51.

Constituants	Dosage (Kg/m <sup>3</sup> )
Granulat: 4/16 mm	1148,1
Sable: 0/5 mm	629,3
Ciment: CEMII 42,5	400,0
Eau	202,2

Tableau 1. Formule du béton testé.

La résistance en compression ( $f_c$ ) et la résistance en traction ( $f_t$ ) ont été mesurées sur des éprouvettes cylindriques  $\phi 110 \times 220 \text{ mm}^2$  à 28 jours. Tous les tests ont été réalisés sur trois échantillons et la valeur moyenne des propriétés mécaniques est égale à 36 et 2,6 MPa respectivement.

Quatre diamètres de barres à haute adhérence HA ont été testés : 8 mm (HA8), 12 mm (HA12), 14 mm (HA14) et 16 mm (HA16). La limite d'élasticité et le module d'Young des barres HA sont de l'ordre de 500 MPa et 200 GPa respectivement.

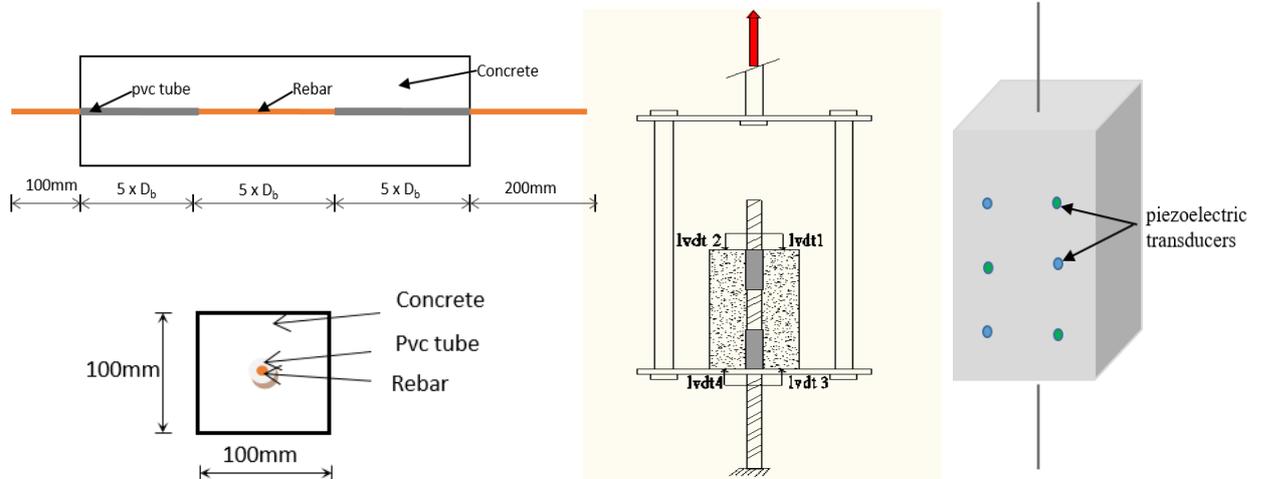
#### 1.2. Essais d'arrachement

Les éprouvettes en béton armé ont été réalisées en suivant les recommandations de la RILEM avec des longueurs d'ancrage en fonction du diamètre des barres « db » [RIL 70]. Les barres en acier ont été noyées dans le béton sur une longueur définie de 5 db. Des tubes en pvc ont été aussi mis aux extrémités sur une longueur de 5 db pour éviter les zones de concentration de contraintes (Figure 1a). Des éprouvettes prismatiques avec une section de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  ont été considérées. Après coulage, les éprouvettes ont été protégées pendant 24 heures pour éviter le séchage. Les éprouvettes ont été ensuite démoulées et conservées dans l'eau pendant 28 jours.

Les essais d'arrachement ont été réalisés avec une presse hydraulique de capacité 200 KN. La force est appliquée en déplacement imposé à une extrémité d'un cadre métallique où une plaque en acier est positionnée entre l'extrémité fixe de l'armature et l'éprouvette. Le glissement acier-béton est mesuré par quatre capteurs LVDT situés aux deux extrémités afin de déterminer le déplacement relatif entre l'acier et le béton (Figure 1b).

L'essai a été réalisé avec une vitesse d'arrachement constante de 5  $\mu$ /min. Deux essais ont été réalisés pour chaque diamètre.

Le dispositif d'acquisition et de traitement des signaux d'EA est constitué d'un système d'acquisition MISTRAS à huit voies. Six capteurs piézoélectriques d'une fréquence centrale de 150 kHz ont été placés sur deux faces opposées des éprouvettes sous forme d'une maille de localisation triangulaire avec une faible couche de graisse de silicone (Figure 1c). Cette technique permet d'assurer une bonne transmission des signaux qui sont amplifiés avec un gain de 40 dB. Un seuil de détection de 35 dB a été choisi pour filtrer le bruit de fond. L'acquisition est validée avant chaque essai en utilisant la source HSU-NIELSEN (Norme NF EN 1330). Cette procédure permet d'estimer d'une part la vitesse de propagation qui est de 4000 m/s et d'autre part l'atténuation des ondes acoustiques dans le matériau.



**Figure 1.** Géométrie des éprouvettes, mode opératoire de l'essai d'arrachement et positionnement des capteurs d'EA.

La contrainte maximale de l'adhérence acier-béton  $\tau_{\max}$  est calculée en considérant une contrainte de cisaillement homogène sur la longueur d'ancrage avec:  $\tau_{\max} = F_{\max} / \Pi d l$ . Où  $F_{\max}$  est la force maximale,  $d$  le diamètre de la barre et  $l$  la longueur d'ancrage.

## 2. Résultats

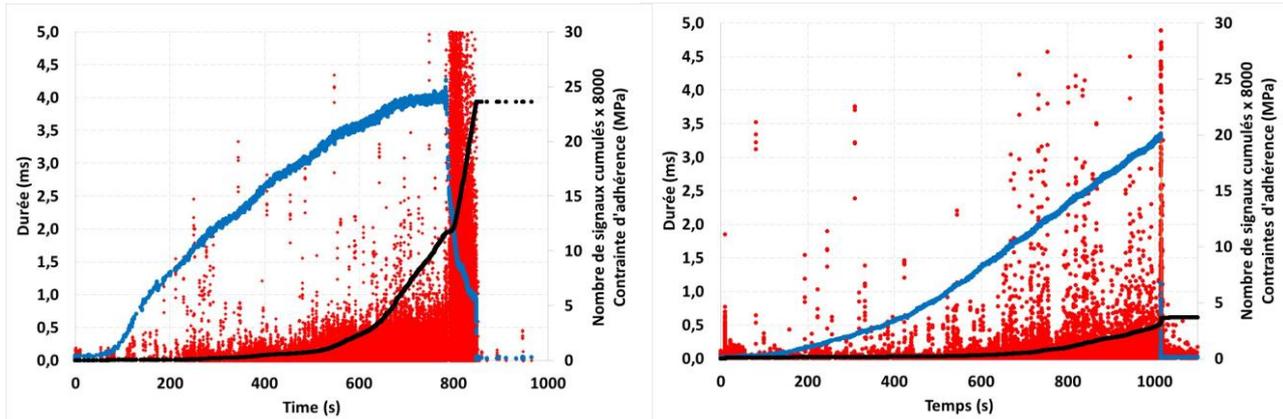
Deux modes de rupture ont été observés : par propagation des fissures cylindriques ou glissement à l'interface acier-béton pour les barres HA8 et par propagation d'une macro-fissure dans le béton longitudinalement le long de l'axe de la barre pour les barres HA12, HA14 et HA16. Ceci peut être dû aux différences au niveau de l'épaisseur de confinement [TOR 13] et au niveau de la résistance de la liaison [GAM 96]. Dans le cas de rupture par éclatement du béton, [TOR 13] a établi une relation linéaire entre le rapport  $\tau_{\max} / f_t$  et le rapport  $c/d$  où  $c$  représente l'épaisseur du confinement. A partir d'un certain rapport critique  $c/d$ , le rapport  $\tau_{\max} / f_t$  reste constant indiquant une rupture par glissement.

Afin de mieux comprendre les différences entre ces deux modes de rupture en termes de réponse EA. Les essais avec les barres HA8 et HA16 ont été considérés. La figure 2 montre la corrélation entre la contrainte d'adhérence, le nombre d'événements cumulés et la durée des signaux d'EA. A partir de ces courbes, trois phases peuvent être distinguées. La force augmente avec un glissement très faible au début (assimilé à la déformation élastique du béton) indiquant une adhérence parfaite entre le béton et l'acier. Pendant cette phase très peu de signaux ont été détectés. Ces signaux peuvent être attribués à la rupture de l'adhérence chimique entre l'acier et le béton. L'activité acoustique commence à augmenter à partir d'un niveau de contrainte proche de 20% avec des signaux de plus en plus énergétiques indiquant la nucléation des microfissures dans des zones localisées au niveau de l'interface le long de la barre d'acier. Ceci est dû à la coalescence des microfissures dans les zones de concentrations de contraintes reliées à la morphologie des barres et à la présence des nervures ainsi que la variabilité spatiale des propriétés mécaniques. En parallèle, une perte de raideur est observée jusqu'à une valeur maximale de la contrainte de cisaillement qui correspond à la résistance de l'interface.

Pour les éprouvettes ayant des barres HA8, l'activité acoustique augmente rapidement après le pic avec des signaux de plus en plus énergétiques et ayant des durées très élevées indiquant le développement des défauts et le glissement des barres. Ceci est accompagné d'une diminution de la contrainte indiquant que le béton est

fortement écrasé entre les nervures de l'armature avec un frottement au niveau des surfaces rugueuses à l'interface acier-béton et béton-béton. L'effort diminue jusqu'à ce que la barre soit déplacée de l'espace entre deux nervures. Pour les éprouvettes ayant des barres HA12, HA14 et HA16, une rupture fragile a été observée due à l'éclatement du béton accompagnée de l'émission des signaux énergétiques. Une chute rapide de la contrainte est observée indiquant la perte de stabilité et la rupture macroscopique du béton. Les surfaces des éprouvettes après rupture montrent bien les traces des nervures et le béton écrasé. En effet, les nervures peuvent exercer une pression et des contraintes de cisaillements sur le béton aux alentours. Quand les fissures radiales sont étendues à la surface la rupture du béton apparaît.

A noter ici que le nombre de signaux d'EA est largement supérieur dans le cas de rupture par glissement. Les cartes de localisation montrent aussi une bonne reproduction du lieu de développement des fissures.



**Figure 2.** Corrélation entre la contrainte d'adhérence, le nombre de signaux cumulés et la durée des signaux d'EA pour les éprouvettes en béton armé avec des barres HA8 (a) et HA16 (b).

### 3. Conclusion

Cette étude a permis d'analyser les caractéristiques des signaux d'EA générés lors d'essais d'arrachement. Deux mécanismes de rupture ont été observés en fonction du diamètre des barres : par glissement et par éclatement du béton. L'activité acoustique et les paramètres des signaux d'EA reflètent bien les différentes phases de dégradation de l'adhérence acier-béton et permettent de distinguer les deux modes de rupture. La rupture des éprouvettes par glissement génère un nombre important de signaux caractérisés par des durées importantes liées au frottement en comparaison avec la rupture fragile des éprouvettes par fissures longitudinales. Des essais de tirant ont été aussi réalisés avec un suivi continu à l'aide de la technique d'EA en considérant des diamètres et des longueurs de tirant variés. Le traitement et la modélisation par éléments finis de ces essais permettra de mieux comprendre le transfert de charge au niveau de l'interface acier-béton.

### 4. Références

- [RIL 70] RILEM, « Essais portant sur l'adhérence des armatures du béton : 2 : Essai par traction », *Materials and structures*, vol. 03, 1970, p. 175-178.
- [TOR 13] TORRE-CASANOVA A., JASON L., DAVENNE L., PINELLI X., « Confinement effects on the steel – concrete bond strength and pull out failure », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 97, 2013, p. 92-104.
- [GAM 96] GAMBAROVA P.G., ROSATI G., « Bond and splitting in reinforced concrete: test results on bar pull-out », *Materials and Structures*, vol. 29, 1996, p. 267-276.
- [LEI 16] LEI W., JIN Y., HAILONG X., LEI F., « Experimental study of a pull-out test of corroded steel and concrete using the acoustic emission monitoring method », *Construction and Building Materials*, vol. 122, 2016, p. 163-170.
- [RAM 97] RAMIREZ N., Etude de la liaison acier-béton : de la modélisation du phénomène à la formulation d'un élément fini enrichi « béton armé », Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2005.