
Modélisation de l'interface acier-béton par une approche mésoscopique

Atef Daoud *,** — **Olivier Maurel**** — **Christian La Borderie** **

* LGC, Laboratoire de Génie Civil, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Université de Tunis El Manar ; ENIG Département de Génie Civil, route de Médenine 6029 Gabès, Tunisie

** SIAME, Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au Génie Electrique, Université de Pau et Pays de l'Adour, Allées du Parc Montaury, 64600 Anglet

daoud_atef@yahoo.fr

olivier.maurel@univ-pau.fr

christian.laborderie@univ-pau.fr

RÉSUMÉ. *La dégradation de la liaison acier-béton est un phénomène complexe qui fait intervenir les problèmes d'interfaces mais également l'endommagement de la matrice en béton. Nous proposons d'étudier ces phénomènes à l'aide d'une modélisation mésoscopique qui permettra de compléter les résultats expérimentaux. Nos premiers résultats concernent la modélisation de l'essai PIAF (Pour Identifier l'Adhérence et le Frottement) qui permet d'utiliser une approche bidimensionnelle.*

ABSTRACT. *The degradation of the steel-concrete connection is a complex phenomenon depending on both the interface behaviour and the surrounding concrete damage. The purpose of this paper is to study these phenomena by performing a numerical analysis at mesoscopic scale. The interest of this approach is to provide local informations unavailable from experimental investigations. The presented results concern the 2D modelling of PIAF test.*

1. Introduction

Pour la simulation numérique en mécanique des structures à l'échelle macroscopique, le béton est généralement considéré comme un matériau homogène. A l'échelle mésoscopique, il est constitué d'une matrice cimentaire et de granulats de différentes tailles. A une échelle encore plus fine, la matrice cimentaire peut être décomposée en fines (granulats de petite dimension) et une pâte de ciment durcie munie de pores. Les modèles mésoscopiques ont prouvé leur efficacité à représenter le rôle de la composition sur les propriétés macroscopiques du béton. Ils permettent d'apporter un « éclairage local » sur l'origine des non-linéarités du comportement observées à l'échelle macroscopique. La première modélisation numérique mésoscopique a été effectuée par (Wittmann, 1984). L'évaluation du comportement du composite béton à l'échelle mésoscopique nécessite de générer une structure granulaire aléatoire dont la taille, la forme et la distribution devront être représentatives, d'un point de vue statistique, de la structure réelle. Des formes complexes de granulats peuvent être générées à partir d'un traitement d'images ou de modèles mathématiques, cependant, par souci de simplicité, les granulats sont très souvent représentés sous forme de sphères en 3D ou disques en 2D (La Borderie et *al.*, 2007).

Cet article présente une modélisation à l'échelle mésoscopique du comportement de la liaison acier-béton au cours d'un essai d'arrachement. L'essai modélisé de type PIAF (Tran et *al.*, 2007) présente l'avantage de pouvoir être modélisé en 2D. Nous présenterons tout d'abord le dispositif expérimental de cet essai. Ensuite, les principes de notre modélisation mésoscopique seront décrits brièvement. Enfin, nous nous présenterons les résultats des simulations dans le cas d'un essai réalisé avec une barre lisse sans confinement latéral. L'objectif de ce programme d'étude est d'étudier si le comportement de l'interface acier lisse-béton peut être modélisé en adhérence parfaite (sans éléments de contact entre les nœuds du béton et de l'acier) mais en représentant le béton à l'échelle mésoscopique.

2. Essai PIAF (Tran et *al.*, 2007)

(Tran et *al.*, 2007) ont mis au point un essai d'arrachement: l'essai PIAF (Pour Identifier Adhérence et Frottement). L'avantage de cet essai est de limiter les efforts latéraux qui apparaissent lors des essais d'arrachement classiques.

La géométrie des éprouvettes de l'essai PIAF est décrite dans la Figure 1. Les essais PIAF sont réalisés sur des éprouvettes en mortier dans lesquelles trois barres en acier sont noyées. Les barres utilisées dans les essais présentés dans cet article sont des barres lisses de section carrée (2 cm de côté). La barre centrale en acier, adhérente sur 2 côtés seulement, subit un effort de traction alors que les deux barres latérales sont bloquées à leur extrémité (Figure. 1).

3. Calcul 2D

3.1. Maillage et génération de la mésostructure

L'évaluation du comportement du béton au niveau mésoscopique nécessite la génération d'un béton numérique avec une structure bi-phasique pâte de ciment / granulats. Les granulats sont distribués aléatoirement dans l'échantillon pour constituer le squelette granulaire et la pâte de ciment remplit l'espace entre les particules (granulats).

Pour la génération du squelette granulaire, un programme en langage Fortran, développé par [8], a été utilisé et adapté. Les granulats représentés par un disque sont distribués aléatoirement au sein de l'échantillon de béton jusqu'à ce que la fraction volumique de chaque classe granulaire soit atteinte. Pour la simulation de l'essai PIAF, le tirage d'un mortier numérique (Figure 3) est obtenu à partir de la courbe granulométrique du sable 0/4mm (Figure 2). La fraction volumique totale du sable est égale à 0,7.

Le maillage de l'éprouvette de l'essai PIAF est représenté sur la figure 4. Le maillage est raffiné dans la zone mésoscopique de l'éprouvette où la taille des mailles est de 0,3mm. Hors de la zone mésoscopique, la taille des mailles est de 5 mm. La taille de la zone mésoscopique est localisée autour de la partie adhérente de la barre d'acier de façon à pouvoir apprécier le développement de la fissuration. Le mortier numérique est ensuite projeté sur la zone mésoscopique de telle manière que les grains de sable ne touchent pas la barre d'acier centrale.

Le maillage est obtenu en utilisant la méthode de maillage diffus (NGuyen et *al.*, 2011) : les propriétés des granulats et de la pâte sont projetées sur les points de Gauss des éléments en utilisant les fonctions de forme associées à un maillage quelconque composé de quadrilatères isoparamétriques à 4 nœuds en contraintes planes en 2D.

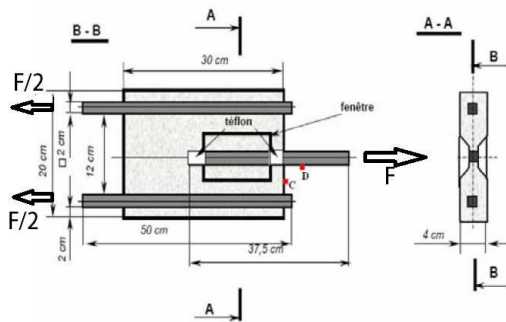


Figure 1. Éprouvette de l'essai PIAF

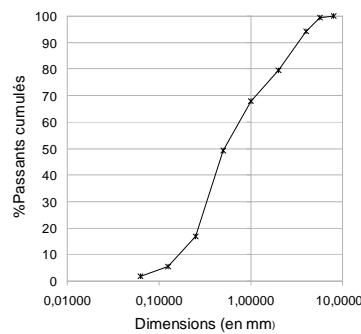


Figure 2. Courbe granulométrique du sable 0/4 utilisé pour le mortier numérique

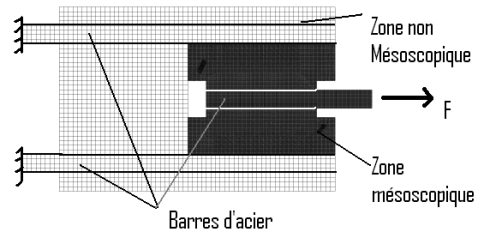
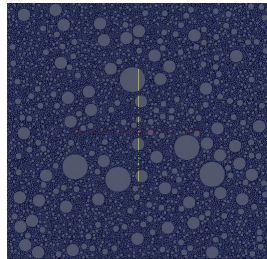


Figure 3. Photo du tirage du mortier numérique en 2D **Figure 4.** Maillage de l'éprouvette PIAF

3.2. Matériaux

Le comportement de la pâte de ciment et les granulats est modélisé par un modèle de comportement le plus simple possible, basé sur un modèle de (Fichant *et al.*, 1999). L'interface pâte/granulats est considérée comme parfaite sans éléments de contact. Le modèle isotrope de (Fichant *et al.*, 1999) est utilisé afin de maîtriser l'énergie de fissuration G_f . Ce modèle simple représente les effets unilatéraux et fournit des résultats objectifs quelle que soit la taille du maillage (La Borderie *et al.*, 2007). En dehors de la zone mésoscopique, le béton est supposé élastique et possède les caractéristiques homogénéisées du modèle mésoscopique. Les trois barres d'acier sont supposées élastiques.

Le tableau 1 résume les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés pour les simulations.

		E (GPa)	ν	f_t (MPa)	G_f (J/m ²)
Zone Mésoscopique	Pâte	37	0,2	1,00	20
	Granulats	28	0,2	2,50	60
Béton hors zone Mésoscopique		30	0,2	-	-
Acier		210	0,3	-	-

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés pour les simulations

3.3 Résultats et discussions

3.3.1 Courbe force-déplacement:

Les courbes force-déplacement issues de l'expérience et de la simulation sont présentées sur la Figure 5. Une bonne concordance est observée entre les deux courbes aussi bien pour la rigidité que pour la résistance de la liaison. L'utilisation du modèle mésoscopique pour le béton permet de simuler le comportement global de la

liaison acier lisse-béton sans avoir besoin d'introduire des éléments de liaison entre le béton et l'acier (éléments joints).

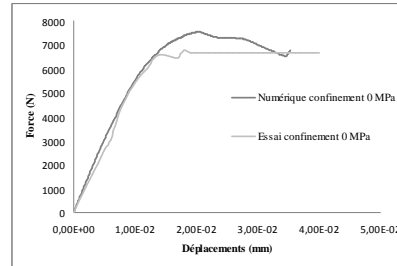


Figure 5. Courbe force-déplacement: comparaison simulation-expérience

3.3.2 Faciès d'endommagement:

Les Figures 6 et 8 illustrent respectivement les faciès d'endommagement et l'ouverture des fissures issus des simulations (Matallah et al., 2010) correspondant à un déplacement de $2,0 \cdot 10^{-5}$ mm (au pic de la courbe force-déplacements).

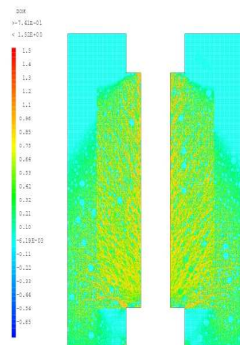


Figure 6. Faciès d'endommagement dans la zone mésoscopique

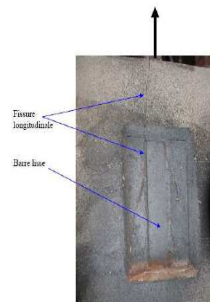


Figure 7. Rupture à l'interface d'après (Tran et al., 2007)

Nous pouvons observer le mode de rupture usuel d'une barre lisse ancrée dans un bloc de béton. En effet, une macro-fissure longitudinale apparaît le long de l'interface acier lisse-béton (Figure 7). Les simulations numériques effectuées permettent de retrouver ces faciès de fissuration. La propagation de la fissuration autour de la barre s'effectue dans la pâte et contourne ainsi les grains de sable. Des microfissures apparaissent autour de la barre ancrée traduisant la transmission des bielles lors de la traction. L'endommagement se concentre dans la zone de faible épaisseur de l'éprouvette (fenêtre) et demeure beaucoup plus diffus dans la zone de forte épaisseur.

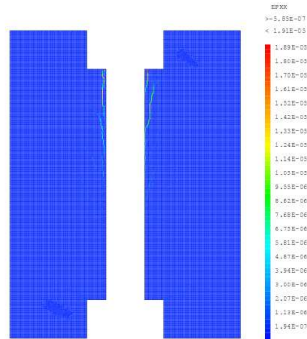


Figure 8. Ouverture des fissures dans la zone mésoscopique

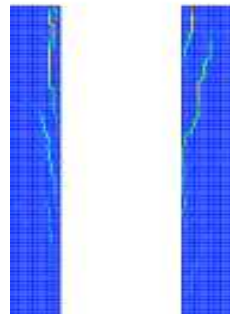


Figure 9. Zoom sur l'ouverture des fissures dans la zone mésoscopique

4. Conclusion

Cet article présente une modélisation 2D de l'essai d'adhérence PIAF. Il a été effectué une modélisation de l'interface acier lisse-béton en supposant un contact parfait entre les deux matériaux. Le béton est représenté à l'échelle mésoscopique en considérant ses deux phases pâte et granulats.

Les résultats de la simulation ont montré que la représentation du béton autour de la barre d'acier à l'échelle mésoscopique est capable de reproduire convenablement le comportement mécanique de la liaison acier lisse - béton.

Il reste à traiter le cas des barres HA puis développer des modèles macroscopiques adaptés s'appuyant sur les simulations mésoscopiques.

Bibliographie

- Wittmann F.H., Roelfstra P.E, Sadouki H. "Simulation and analysis of composite structures". *Mater. Sci. Eng.* 68 (2) (1984) pp. 2239-248.
- La Borderie C., Lawrence C., Menou A. « Approche mésoscopique du comportement : Apport de la représentation géométrique ». *European Journal of Environment and Civil Engineering*, vol. 11, n° 4, pp. 407-421, 2007.
- Tran, B.H., Berthaud Y., Ragueneau, F. Essais PIAF : Pour Identifier l'Adhérence et le Frottement. *CFM 2007 - 18e Congrès Français de Mécanique. 2007.*
- Nguyen T.D., Lawrence C., La Borderie C., Matallah M. et Nahas G. « A mesoscopic model for a better understanding of the transition from diffuse damage to localized damage". À paraître dans *European Journal of Environment and Civil Engineering*
- Fichant S., La Borderie C., Pijaudier-Cabot G., "Isotropic and Anisotropic Descriptions of Damage in Concrete Structures", *Mechanics of Cohesive-Frictional Material*, vol. 4, n° 4, p. 339, 1999.
- Matallah M., La Borderie C. and Maurel O. "A practical method to estimate crack openings in concrete structures" *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 34, 2010, p.1615-1633.