
Identification d'un modèle de zone cohésive pour la zone de transition interfaciale (ITZ) entre le ciment et les granulats lors d'un essai de cisaillement.

Salah Nesrine¹, Jebli Mouad^{2,3}, Malachanne Etienne¹, Jamin Frédéric^{2,3}, Dubois Frédéric^{2,3}, Caro Anne-Sophie¹

¹ C2MA, Ecole des mines d'Alès, Alès, France (nesrine.salah@umontpellier.fr)

² LMGC, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France

³ MIST Lab., IRSN, CNRS, Univ. Montpellier, France

RÉSUMÉ. Le développement d'outils de prédiction du comportement macroscopique des matériaux hétérogènes comme les bétons, par une approche micromécanique, nécessite la connaissance à la fois de la microstructure et des lois d'interaction locales. Cette étude porte sur la simulation numérique d'un essai de cisaillement bi-matériaux prenant en compte les propriétés mécaniques de l'interphase « pâte de ciment-granulat » ainsi que leur évolution au cours de l'hydratation. Un modèle d'endommagement basé sur une approche cohésive est utilisé pour caractériser le comportement mécanique de l'interphase.

Des simulations numériques de l'essai de cisaillement ont été effectuées avec la plateforme logicielle LMGC90, développée au LMGC, dans laquelle plusieurs modèles de zone cohésive sont implémentés. Une modélisation par éléments finis de l'essai de cisaillement en 3D sur un composite « pâte de ciment-granulat calcaire » a été réalisée. Ces simulations permettent notamment un calibrage rigoureux des paramètres locaux des modèles cohésifs.

ABSTRACT. The development of the tools of predicting of the macroscopic behavior of heterogeneous materials such as Concretes, using a micromechanical approach, requires the knowledge of both microstructure and local interaction laws. This study deals with the numerical simulation of a bi-material shear test, taking into account the mechanical properties of interphase cement-granulate paste as well as its evolution during hydration. A damage model based on a cohesive approach is used to characterize the interphase's mechanical behavior.

Thereby, numerical simulations of the shear test were carried out with the LMGC90 software platform, which was developed at the University of Montpellier, and in which many cohesive zone models were implemented. Herein, a finite element modeling of the 3D shear test on a composite of cement-granulate paste of a limestone type was performed. These simulations allow a rigorous calibration of the cohesive models' local parameters..

MOTS-CLÉS : Endommagement, modèle de zone cohésive, pâte de ciment, composite, ITZ.

KEY WORDS : Damage, cohesive zone model, cement paste, composite, ITZ.

1. Introduction

Le béton est un matériau hétérogène dont les propriétés macroscopiques dépendent de la microstructure et des caractéristiques mécaniques locales. L'étude du béton peut être considérée à différentes échelles : structure, macroscopique, mésoscopique, local ou microscopique. A l'échelle macroscopique on s'intéresse à un Volume Élémentaire Représentatif (VER) pour lequel les propriétés ultimes sont fortement liées aux interactions pâte de ciment/granulat .

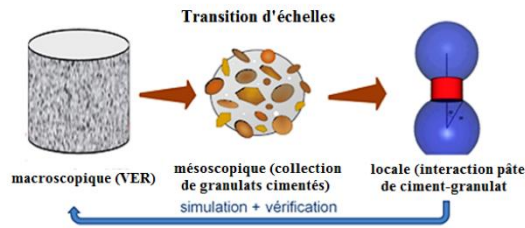


Figure 1 Transition d'échelles dans les matériaux cimentaires [JEBLI 16].

En effet, la présence des granulats modifie la microstructure de la pâte de ciment en introduisant une interface aux propriétés spécifiques. Différentes appellations ont été utilisées pour faire référence à cette zone : auréole de transition, zone de transition interfaciale (Interfacial Transition Zone en anglais) ou encore interphase. Cette interphase constitue une zone de fragilité dans le béton. Ses propriétés affectent fortement le comportement mécanique du béton à l'échelle macroscopique et donc à l'échelle de la structure.

2. Matériels et méthodes

On utilise dans cette étude des résultats expérimentaux obtenus récemment par Jebli [JEBLI 16, JEBLI 18] sur un essai de cisaillement à l'échelle locale d'un composite pâte de ciment/granulat pour différents temps d'hydratation et contraintes de confinement. Le composite est composé de deux blocs parallélépipédiques de calcaire (granulat) et de pâte de ciment (**Figure 2**). Les propriétés élastiques de ces deux matériaux sont obtenues par des essais de compression uniaxiale et sont données dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 Propriétés élastiques du calcaire et de la pâte de ciment.

Matériau	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson
Calcaire	60	0.3
Pâte de ciment	12.5	0.3

Ces données vont être utilisées pour valider les résultats expérimentaux à travers un modèle numérique qui s'appuie sur une approche de zones cohésives que l'on détaille dans le paragraphe suivant.

3. Modèles des zones cohésives

Dans cette étude, on met en œuvre un modèle éléments finis du composite (pâte de ciment – granulat calcaire) en considérant un contact non parfait à l'interface entre les matériaux. Pour caractériser cette interface non-parfaite, et évolutive, un modèle de zone cohésive (CZM) est utilisé. Le modèle choisi ici couple adhésion, frottement et contact unilatéral [RAOUS 99,].

Le principe du traitement du modèle de zone cohésif simultanément avec le contact frottant a été proposé dans les travaux de Raous et al. [RAOUS 99] et Bretelle et al. [BRE 01]. On se limitera dans cette partie à présenter les principales équations de la loi cohésive, ainsi que ses paramètres. Le modèle considère la non-pénétration entre deux corps en contact ; la force de cohésion R entre les deux corps est décomposée en une partie normale R_N et une partie tangentielle R_T telles que $R_N = R.n$, associées à des déplacements normal u_N et tangentiel u_T .

Le saut de déplacement est décomposé de la manière suivante :

$$[u] = [u_N].n + [u_T] \text{ avec } [u_N] = [u].n$$

Par ailleurs, on introduit une variable β qui représente l'intensité d'adhérence qui évolue au cours du chargement et qui est liée à un paramètre d'endommagement D de telle sorte que :

$$\beta = 1 - D$$

On peut ainsi lier l'endommagement à la variable β de la manière suivante :

- $\beta = 1$ adhérence totale.
- $0 < \beta < 1$ adhérence partielle.
- $\beta = 0$ pas d'adhérence.

Dans ce problème, on résout :

$$\begin{aligned} \text{Si } & \begin{cases} [|u_N|] \geq 0, & (R_N + R_N^{adh}) \geq 0, & [|u_N|] \cdot (R_N + R_N^{adh}) = 0 \\ |R_T + R_T^{adh}| < \mu(\beta) \cdot (R_N + R_N^{adh}) & \Rightarrow V_T = 0 \end{cases} \\ \text{Sinon } & |R_T + R_T^{adh}| = \mu(\beta) \cdot (R_N + R_N^{adh}) \Rightarrow V_T = -\lambda \cdot \frac{R_T + R_T^{adh}}{||R_T + R_T^{adh}||}, \lambda > 0 \\ \text{avec } & R^{adh} = K(\beta) \cdot [|u|] \text{ et } K(\beta) = \beta(C_N n \otimes n + C_T \frac{u_T \otimes u_T}{||u_T||^2}) \end{aligned}$$

avec C_N et C_T les raideurs normales et tangentielles.

Pour résoudre ce problème, on utilise une loi d'évolution de β qui dépend de paramètres comme l'énergie de rupture, la contrainte maximale, etc [PER 05].

4. Identification numérique

La géométrie est maillée avec des éléments finis de type hexaèdre (**Figure 2**), et le pas de temps est calibré en fonction des paramètres des matériaux et de la taille de maille.

A chaque pas de temps, une détection des contacts est réalisée, la rupture se produisant lorsque le contact est perdu entre les deux matériaux. Pour calibrer la loi cohésive, plusieurs paramètres doivent être ajustés : les rigidités normale et tangentielle (C_N et C_T), le coefficient de frottement μ , l'énergie d'adhésion W et la résistance à la rupture.

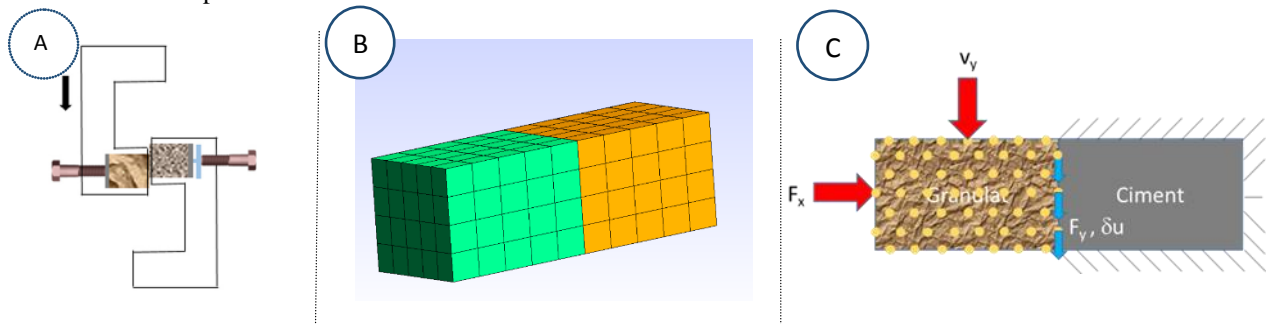


Figure 2 A) Schéma du dispositif expérimental de l'essai de cisaillement [JEBLI 18], B) Géométrie maillée et C) Schéma illustrant les conditions aux limites et les efforts appliqués.

Les autres paramètres de la loi cohésive sont déterminés à partir des courbes expérimentales contraintes-saut de déplacement [JEBLI 18]. Le coefficient de frottement $\mu=0.4$ est identifié sur la partie post-pic de ces courbes pour un temps d'hydratation égal à 40 jours. L'énergie W correspond à la surface calculée sous la courbe, σ_{max} est la contrainte à la rupture et C_T est déterminée selon l'équation suivante : $C_T = 0.5 \sigma_{max}^2 / W$ pour la partie linéaire de la courbe. Ce travail est effectué pour différents temps d'hydratation et pour différentes contraintes de confinement.

5. Résultats et interprétations

Une validation numérique à partir des essais expérimentaux de cisaillement direct réalisés lors de la thèse de Mouad JEBLI [JEBLI 16, JEBLI 18] a été effectuée :

1. A différents temps d'hydratation (7, 15 et 28 jours) et à contrainte normale nulle.

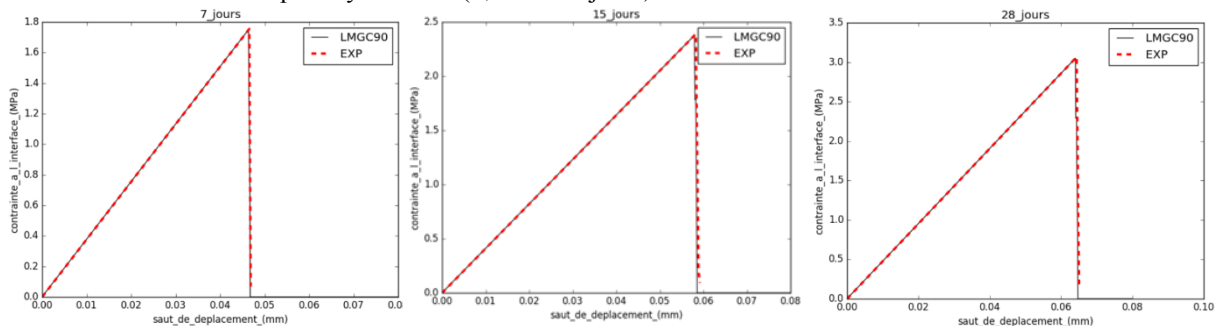


Figure 3 Comparaison des résultats du modèle de loi cohésive (LMGC90) et des résultats expérimentaux [JEBLI 18] pour différents temps d'hydratation.

2. A un temps d'hydratation de 40 jours et à différentes contraintes normales (0.5 , 1 et 1.5 MPa).

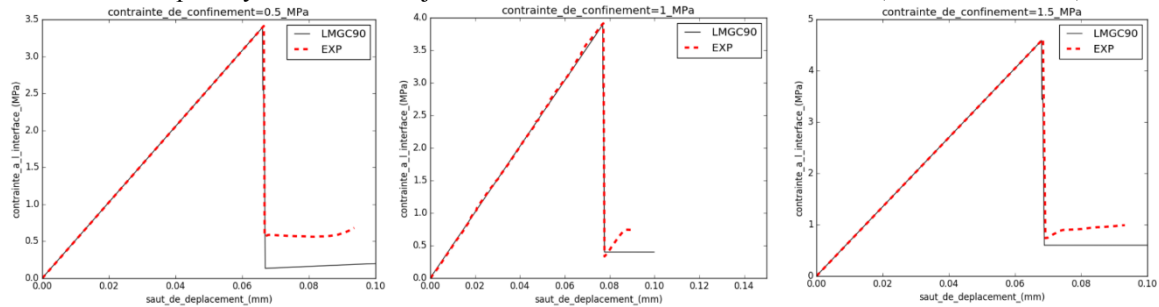


Figure 4 Résultats de simulation sur LMGC90 en utilisant un modèle de zone cohésive comparé à des résultats expérimentaux de l'essai de cisaillement pour différentes contraintes de confinement.

La simulation numérique permet de retrouver les mêmes résultats que ceux obtenus expérimentalement pour différents temps d'hydratation et différentes contraintes de confinement. Cependant, un décalage apparaît au niveau de la contrainte résiduelle pour les différentes contraintes de confinement. Ce décalage se présente toujours avec une valeur constante et qui n'est pas prédit par le modèle. Ceci s'explique par la présence d'une surface de contact lisse entre pâte de ciment et granulat dans la modélisation qui montre à la fin de l'essai un contact purement frottant de valeur $\mu\sigma_N$ à l'interface pâte/granulat.

6. Conclusion et perspectives

Une simulation de résultats d'essais de cisaillement sur un matériau composite utilisant un modèle de zone cohésive a permis d'identifier les paramètres mécaniques qui caractérisent la liaison « pâte de ciment – granulat calcaire » au niveau de l'interphase. Cette identification a été réalisée pour différents temps d'hydratation et pour différentes contraintes de confinement.

Les résultats numériques montrent que la modèle de zone cohésive permet de décrire ce type de comportement mécanique. Les paramètres identifiés localement vont permettre de modéliser le comportement d'un béton à l'échelle d'un volume élémentaire représentatif.

Bibliographie

- [BRE 01] BRETTELLE A. S., COCU M. et MONERIE Y.: Unilateral contact with adhesion and friction between two hyperelastic bodies. *International journal of engineering science*, 39(18): 2015–2032, 2001.
- [PER 05] PERALES.F. Fissuration des matériaux à gradient de propriétés. Application au Zircaloy hydruré.. Thèse de doctorat, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2005.
- [HAL 74] HALPHEN B. et QUOC Son N.: Plastic and visco-plastic materials with generalized potential. *Mechanics Research Communications*, 1(1):43–47, 1974.
- [JEBLI 16] JEBLI M : Caractérisation à l'échelle locale des propriétés mécaniques de l'interphase pâte de ciment-granulat et application à la lixiviation. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 2016.
- [JEBLI 18] JEBLI, M., JAMIN, F., MALACHANNE, E., GARCIA-DIAZ, E., & EI YOUSOUFI, M. S. (2018). Experimental characterization of mechanical properties of the cement-aggregate interface in concrete. *Construction and Building Materials*, 161, 16-25.
- [RAOUS 99] RAOUS M., CANGEMI L. et COCU M.: A consistent model coupling adhesion, friction, and unilateral contact. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 177(3): 383–399, 1999.