
Caractérisation expérimentale de la résistance au cisaillement de l'interface pâte de ciment-granulat

M. Jebli^{1,2}, F. Jamin^{1,3}, E. Garcia-Diaz², M.S. El Youssoufi^{1,3}

¹ LMGC, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France.

² C2MA, Ecole des mines d'Alès, Alès, France.

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

E-mail : mouad.jebli@umontpellier.fr

RÉSUMÉ. Il est généralement admis que la microstructure de la zone d'interface entre les granulats et la pâte de ciment dans un béton est caractérisée par une porosité supérieure à celle de la pâte de ciment. Les propriétés de cette zone de fragilité influencent fortement le comportement mécanique du béton à l'échelle macroscopique et, donc, à l'échelle de la structure. Dans ce travail, la résistance à la rupture en cisaillement de la liaison pâte de ciment-granulat est analysée expérimentalement, directement à l'échelle locale. Les essais expérimentaux sont effectués sur des échantillons parallélépipédiques constitués de granulats calcaires et de pâte de ciment portland préparée avec un rapport Eau/Ciment de 0,5. Les configurations des échantillons et du dispositif expérimental développé permettent d'appliquer un cisaillement direct jusqu'à la rupture au niveau de l'interface pâte de ciment-granulat. A différents stades de l'hydratation, des composites pâte de ciment-granulat sont soumis à des essais de cisaillement direct. Ces essais ont permis de caractériser la résistance au cisaillement de l'interface. Des essais similaires sur des échantillons de pâte de ciment pure sont utilisés comme référence pour des comparaisons.

ABSTRACT. It is generally accepted that the microstructure of the interface between the aggregates and the cement paste is characterized by a higher porosity than that of cement paste. The properties of this weak area strongly influence the mechanical behavior of concrete at the macroscopic scale and therefore across the structure.

In this work, the shear strength of the cement paste-aggregate interface is analyzed experimentally, directly at the local scale. The experimental tests are carried out on parallelepipedic samples consisting of limestone aggregate and a Portland cement paste prepared with a water / cement ratio of 0.5. The shape of the prepared samples and of the experimental device developed provides to apply direct shear until rupture at the cement paste / aggregate interface.

At different stages of hydration, the composites are subjected to direct shear tests. These tests made it possible to characterize the shear strength of the interface. Similar tests on cement paste samples are used as reference for comparison.

MOTS-CLÉS : béton, interface pâte de ciment / granulat, granulat calcaire, essai de cisaillement direct.

KEY WORDS: concrete, cement paste / aggregate interface, limestone aggregate, direct shear test.

1. Introduction

Il est généralement admis par de nombreux chercheurs que la microstructure de la zone d'interface entre les granulats et la pâte de ciment est caractérisée par une porosité supérieure. Cette zone, communément nommée zone de transition interfaciale, est souvent considérée comme un point faible dans le béton [ALE 64 ; SAI 86; PRO 00; JEB 16]. Les propriétés mécaniques de cette zone restent cependant mal identifiées. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude expérimentale est de caractériser les propriétés mécaniques au cisaillement d'un composite formé de pâte de ciment et d'un granulat calcaire à l'échelle locale. Pour satisfaire cet objectif, un dispositif expérimental adapté a été développé afin de solliciter directement le composite à l'échelle de l'interface pâte de ciment-granulat. Des essais similaires sur des échantillons de pâte de ciment pure sont réalisés en vue de comparaisons.

2. Protocole expérimental

2.1. Caractéristiques des échantillons

La pâte de ciment est préparée à base d'un ciment Portland CEM II 32.5 CE CP2 NF et d'un rapport eau/ciment de $E/C = 0,5$. Les granulats, de forme parallélépipédique ($10 \times 10 \times 15 \text{ mm}^3$), sont extraits d'un même bloc de roche calcaire. Les échantillons (composite et pâte de ciment pure) ont été réalisés à l'aide d'un dispositif spécifique permettant d'obtenir les dimensions précisées à la figure 1a), et ont été conservés dans un bain thermostaté d'eau saturée en chaux.

2.2. Dispositif d'essai de cisaillement direct

Afin de caractériser les propriétés mécaniques au cisaillement du composite à l'échelle locale de l'interface, un dispositif expérimental de cisaillement direct de l'échantillon a été conçu et développé de manière à ce que la rupture soit localisée précisément au niveau de l'interface du composite. Ce dispositif permet également d'appliquer une contrainte de confinement à travers une force normale à l'interface plane du composite, et réaliser ainsi des essais de résistance au cisaillement pour différents niveaux de confinement.

Le dispositif est constitué de deux demi-boîtes où le composite est inséré. L'interface du composite se trouve disposée entre les deux demi-boîtes distantes d'environ 0,5 mm afin de minimiser les effets de flexion du composite. Des vis aux extrémités des demi-boîtes servent à (i) fixer la position de l'interface dans le plan de séparation des deux demi-boîtes, (ii) éviter le déplacement de l'échantillon pendant l'essai et (iii) appliquer la force normale de confinement N . Pour mesurer cette force, un capteur de force (de type LCMKD-200N) est installé à l'extrémité de l'échantillon. La figure 1b) illustre le dispositif expérimental où l'échantillon est placé à l'intérieur des deux demi-boîtes.

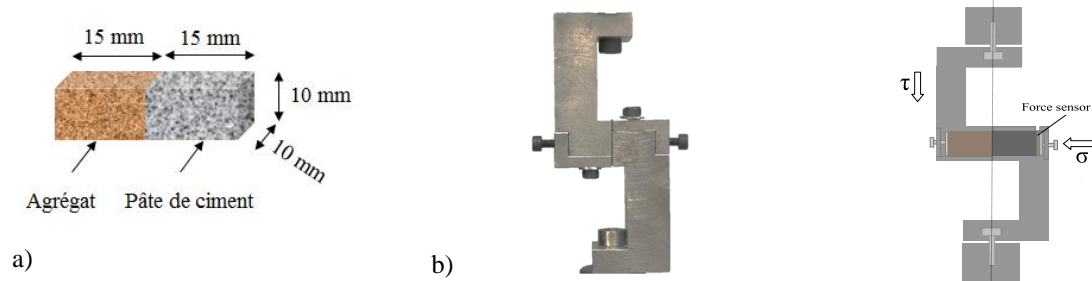


Figure 1. Dimensions des échantillons a) et dispositif expérimental pour l'essai de cisaillement direct b).

2.3. Protocole d'essai de cisaillement direct

Le principe de l'essai consiste à appliquer une force normale de confinement N , correspondant à une contrainte normale σ sur l'interface plane. Au cours de l'essai, une demi-boîte reste fixe et la seconde est déplacée à vitesse constante de 0,01 mm/s jusqu'à la rupture. Lors de ce déplacement, un capteur de force permet de mesurer la force de cisaillement T , qui donne accès à la contrainte de cisaillement τ . Le champ de déplacement réel est obtenu par corrélation d'images.

En faisant varier la force normale N , on peut déduire l'évolution de la contrainte de cisaillement à la rupture τ_r en fonction de la contrainte normale σ appliquée au cours de l'essai. Dans cette étude, deux séries d'essais expérimentaux ont été réalisées sur les mêmes types d'échantillons :

- à différents temps d'hydratation (2 ; 7 ; 15 ; 28 et 40 jours) et une contrainte normale de 0 MPa,
- à différentes contraintes normales (0 ; 0,5 ; 1 et 1,5 MPa) et un temps d'hydratation de 40 jours.

Le protocole expérimental associé à ces séries d'essais permet d'obtenir l'évolution des caractéristiques de résistance au cisaillement de l'interface pâte de ciment-granulat en fonction du temps d'hydratation.

3. Résultats expérimentaux

Les essais de cisaillement direct sont réalisés, sur le composite pâte de ciment – granulat et sur la pâte de ciment pure, pour étudier leur résistance au cisaillement. Les courbes de contrainte – déformation obtenues pour la première série d'essais (sans contrainte normale), sont présentées sur la figure 2 à différents stades d'hydratation au cours des 40 premiers jours, pour la pâte de ciment (figure 2a) et pour le composite sollicité au niveau de l'interface pâte de ciment-granulat (figure 2b).

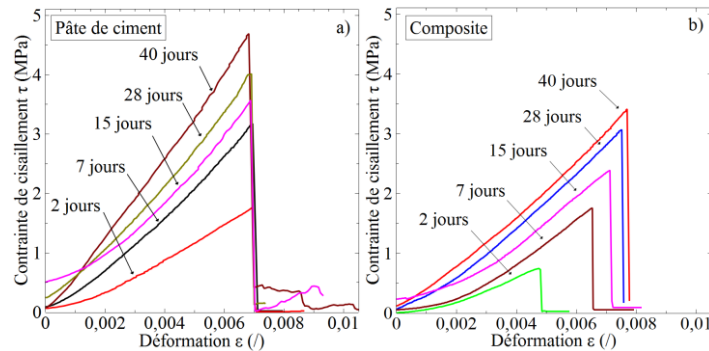


Figure 2. Courbes contrainte - déformation lors des essais de cisaillement de la pâte de ciment a) et du composite b) à différents stades d'hydratation.

Ces figures montrent une augmentation rapide de la contrainte à la rupture $\tau_r(j)$ et du module de cisaillement $E_s(j)$ des échantillons au cours de l'hydratation. On note une rupture quasi-fragile au cisaillement. Le comportement local post-rupture semble différent du comportement observé à l'échelle macroscopique.

Les valeurs de la contrainte à la rupture τ_r (en MPa) et du module de cisaillement E_s (en GPa) en fonction du temps d'hydratation j (en jours), pour le composite pâte de ciment – granulat et pour la pâte de ciment pure, sont présentées sur la figure 3. Le module de cisaillement des échantillons a été estimé à partir de la pente de la partie linéaire des courbes contrainte-déformation (figure 2). On constate une augmentation similaire des contraintes à la rupture (figure 3a) et du module de cisaillement tangentiel (figure 3b) au cours de l'hydratation pour les deux types d'échantillons avec des valeurs supérieures dans le cas de la pâte de ciment.

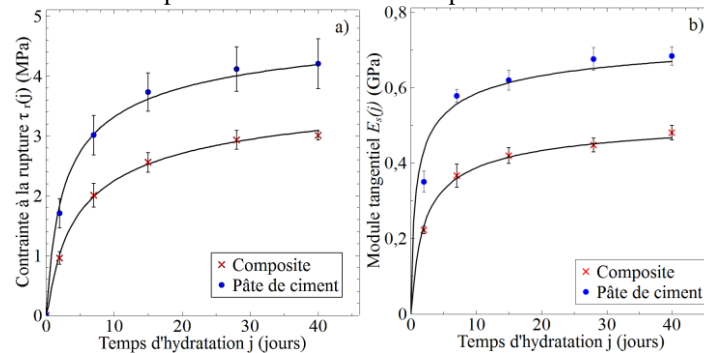


Figure 3. Evolution de la contrainte à la rupture au cisaillement a) et du module de cisaillement tangentiel b) en fonction du temps d'hydratation pour la pâte de ciment et pour le composite.

Après la caractérisation de l'effet du temps d'hydratation sur les propriétés mécaniques au cisaillement, on s'intéresse à l'influence de la contrainte normale de confinement sur la résistance au cisaillement. Une deuxième série d'essais concerne des échantillons, correspondant à un temps d'hydratation fixe de 40 jours, soumis à des essais de cisaillement direct à différentes contraintes normales de confinement (0 ; 0,5 ; 1 ; 1,5 MPa). Les courbes de contrainte-déformation obtenues sont présentées sur la figure 4.

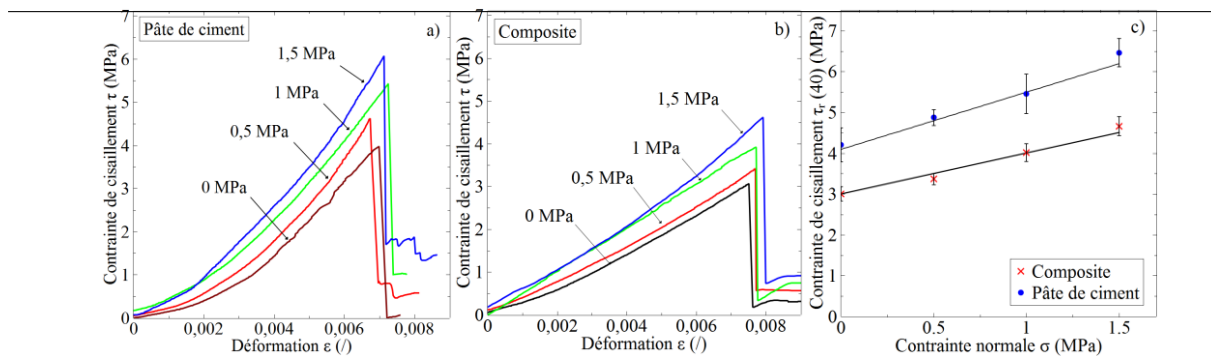


Figure 4. Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la déformation à différentes contraintes normales pour la pâte de ciment a) et le composite b,) et droites de Mohr – Coulomb déduites c).

On constate une augmentation de la contrainte à la rupture (la valeur au pic) de cisaillement avec la contrainte normale de confinement pour les deux types d'échantillons (figures 4a et 4b). Le module de cisaillement tangentiel augmente également dans le même sens. Cette évolution de la contrainte à la rupture en cisaillement en fonction de la contrainte normale de confinement permet de représenter la droite de Mohr-Coulomb (figure 4c), et de déduire l'angle de frottement et la cohésion.

Comme on peut le voir sur la figure 4c, la droite de Mohr-Coulomb semble bien représenter l'évolution de la contrainte à la rupture en cisaillement en fonction de la contrainte normale de confinement, à la fois pour pâte pure et pour l'interface. Selon la relation classique :

$$\tau_r = \sigma \tan(\phi) + c \quad [1]$$

où τ_r est la contrainte de cisaillement à la rupture, σ la contrainte normale, « c » la cohésion et « ϕ » l'angle de frottement, on peut déduire les deux caractéristiques de résistance au cisaillement des deux types d'échantillons (tableau 1) :

Cisaillement	Pâte de ciment pure	Composite pâte de ciment-granulat
Cohésion c (MPa)	4,1	2,9
Angle de frottement ϕ (°)	54	47

Tableau 1. Cohésion et angle de frottement pour la pâte de ciment et pour le composite

4. Conclusion

Une expérimentation originale a été réalisée pour l'étude de la résistance au cisaillement de l'interphase pâte de ciment – granulat par des essais de cisaillement direct. L'avantage du dispositif expérimental développé est la possibilité de réaliser des essais de résistance au cisaillement pour différents confinements à l'échelle directe de l'interface pâte de ciment – granulat. Les résultats des essais ont montré que :

- la résistance au cisaillement augmente avec le temps d'hydratation pour les deux types d'échantillons composite et pâte de ciment.
- la résistance au cisaillement de l'interphase est plus faible que celle de la pâte de ciment.

Les résultats obtenus sont bien représentés par une loi de type Mohr-Coulomb, qui a conduit à la détermination d'une cohésion et d'un angle de frottement à l'échelle de l'interface. La cohésion de l'interface est inférieure à celle de la pâte de ciment pure et l'angle de frottement de l'interface reste assez proche de celui de la pâte de ciment pure.

5. Bibliographie

- [ALE 64] Alexander K. M., Taplin J. H., « Analysis of the strength and fracture of concrete based on unusual insensitivity of cement-aggregate bond to curing temperature ». *Australian Journal of Applied Science*, 15(3), 160-170, (1964).
- [SAI 86] Saito M., Kawamura M., « Resistance of the cement-aggregate interfacial zone to the propagation of cracks ». *Cement and concrete research*, 16(5), 653-661. (1986).
- [PRO 00] Prokopski G., Halbiniak J. « Interfacial transition zone in cementitious materials ». *Cement and Concrete Research*;30 (4):579–83, (2000).
- [JEB 16] Jebli M., Jamin F., Garcia-Díaz E., El Omari M., El Youssoufi M.S. « Influence of leaching on the local mechanical properties of an aggregate-cement paste composite », *Cement and Concrete Composites*.12(73): 241-250, 2016.