



Étude expérimentale des propriétés mécaniques de l'interface pâte de ciment-granulat

Mouad Jebli, Frédéric Jamin, Céline Péliissou, Eric Garcia-Diaz, Moulay Saïd
El Youssoufi

► To cite this version:

Mouad Jebli, Frédéric Jamin, Céline Péliissou, Eric Garcia-Diaz, Moulay Saïd El Youssoufi. Étude expérimentale des propriétés mécaniques de l'interface pâte de ciment-granulat. Conférence Internationale Francophone NoMaD 2018, Nov 2018, Liège, Belgique. hal-01937951

HAL Id: hal-01937951

<https://hal.science/hal-01937951>

Submitted on 28 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ETUDE EXPERIMENTALE DES PROPRIETES MECANQUES DE L'INTERFACE PATE DE CIMENT-GRANULAT

M. Jebli ^{A,D}, F. Jamin ^{A,D}, C. Pélissou ^{B,D}, E. Garcia-Diaz ^C, M.S. El Youssoufi ^{A,D}

^A LMGC, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France.

^B Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire IRSN, B.P. 3, 13115 Saint-Paul-lez-Durance Cedex, France.

^C C2MA, IMT Mines Alès, Alès, France.

^D MIST Lab., IRSN, CNRS, Univ. Montpellier, France.

RESUMÉ :

Les propriétés mécaniques de l'interface pâte de ciment-granulat sont des facteurs clés que l'on associe à la résistance et à la durabilité des bétons. Leur caractérisation fine est un point essentiel à la compréhension du béton. Si l'existence et la composition de l'interface sont maintenant bien documentées dans la littérature, leurs conséquences sur les propriétés mécaniques macroscopiques du béton relèvent d'un sujet encore peu traité dans la littérature. Depuis quelques années, on note un intérêt particulier des chercheurs pour explorer et comprendre les propriétés intrinsèques de cette interface.

Cette étude constitue une contribution expérimentale à l'étude des propriétés mécaniques de l'interface pâte de ciment/granulat directement à l'échelle locale. Des essais expérimentaux sont effectués sur des échantillons parallélépipédiques constitués de granulats calcaires liés par une pâte de ciment portland préparée avec un rapport Eau/Ciment de 0,5. Les échantillons sont préparés en utilisant des moules spécifiques, adaptés aux dimensions voulues des échantillons. La forme des échantillons préparés et les outils expérimentaux développés permettent d'avoir une localisation de la rupture au niveau de l'interface pâte de ciment-granulat. Ils sont ensuite immédiatement placés dans un bac d'eau saturée en chaux afin d'éviter une lixiviation précoce de l'interface.

A différents stades de l'hydratation, les échantillons sont soumis soit à des essais de traction directe, soit à des essais de cisaillement direct pour différentes contraintes normales (confinement). Ces essais ont pour objectif de caractériser les propriétés mécaniques de l'interface. Les dispositifs expérimentaux utilisés ont été conçus et réalisés pour les besoins de cette étude, de manière à être adaptés à la taille et à la forme des échantillons.

L'étude des propriétés mécaniques à l'échelle locale révèle que l'interface pâte de ciment-granulat est la zone la plus faible de la liaison «pâte de ciment / granulat».

MOTS CLES : béton, interface pâte de ciment-granulat, hydratation, traction directe, cisaillement direct.

1. INTRODUCTION

Il est généralement admis par de nombreux chercheurs que la microstructure de l'interface entre les granulats et la pâte de ciment est caractérisée par une porosité supérieure à la pâte de ciment. Scrivener (Scrivener, 1999) a formalisé ce concept d'interface. Ses travaux ont été poursuivis par Mindess (Mindess, 1996) et Zheng (Zheng & Zhou., 2005), qui ont identifié cette zone comme un point faible dans le béton. Dès lors, le comportement mécanique du béton est fortement influencé par les propriétés de l'interface (Alexander & Taplin, 1964 ; Ramesh et al., 1995 ; Mohamed & Hansen, 1999 ; Prokopski & Halbiniak, 2000 ; Akcaoglu et al., 2004). En utilisant des méthodes et des matériaux différents, ces travaux montrent que le module d'élasticité du béton est fortement influencé par la fraction volumique de l'interface : plus le volume d'interface est grand, plus le module d'élasticité du béton diminue. Ce phénomène est d'autant plus accentué que le rapport Eau/Ciment est grand (Lee & Park, 2008). Kawakami (Kawakami, 1992) et Husem (Husem, 2003) ont étudié la possibilité de corréler les résultats expérimentaux entre la résistance en compression/flexion du béton et la résistance en traction/flexion. Leurs résultats indiquent que la résistance du béton dépend de celle de la liaison granulat-mortier.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude expérimentale est de déterminer les propriétés mécaniques à l'échelle de l'interface, entre le granulat et la pâte de ciment formant ainsi un composite, par des essais directs de traction et de cisaillement. Pour satisfaire cet objectif, des dispositifs expérimentaux innovants ont été élaborés pour solliciter directement l'interface.

Après une description des matériaux et des équipements, on présente les résultats expérimentaux obtenus à la rupture pour une pâte de ciment pure et pour le composite en fonction du temps d'hydratation. Ces résultats sont ensuite analysés et discutés.

2. MATERIAUX ET GEOMETRIES DES ECHANTILLONS

Dans cette étude, des échantillons de pâtes de ciment pures et des composites « pâte de ciment-granulats » ont été confectionnés. Des moules spécifiques ont été élaborés pour permettre de maîtriser les caractéristiques géométriques des échantillons de forme parallélépipédique.

2.1. Matériaux

Le ciment choisi est un ciment Portland CEM II 32.5 CE CP2 NF qui a été utilisé pour préparer la pâte de ciment avec un rapport eau/ciment (E/C) de 0,5. Les granulats naturels de calcaire de forme parallélépipédique ont été fabriqués de dimensions $10 \times 10 \times 15 \text{ mm}^3$. Les étapes de fabrication des granulats sont présentées sur la Figure 1a.

Pour assurer une homogénéité de l'état de surface, les granulats secs à l'état brut de sciage ont été utilisés pour les essais. Les granulats calcaires réagissent avec la pâte de ciment, conduisant à une bonne adhérence (Kamali et al., 2014), mais n'empêchant pas l'apparition de l'interface pâte de ciment-granulat. Visible au MEB (Figure 1b), l'épaisseur de cette interface est dans notre cas d'environ $25 \mu\text{m}$.

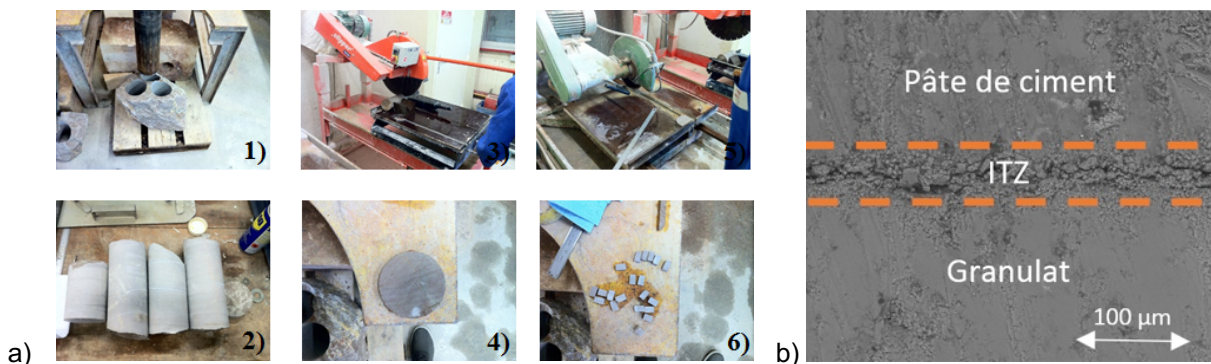


Figure 1. a) Étapes de fabrication des granulats et b) Observation au MEB de l'interface.

2.2. Géométrie des échantillons

En fonction des essais mécaniques, deux types d'échantillons, dont les dimensions sont précisées sur la Figure 2, ont été réalisés :

- Pour les essais de traction directe, les échantillons présentent une mince couche de pâte de ciment de 2 mm entre deux granulats calcaires (Figure 2a). Cette épaisseur de la pâte a été choisie pour se rapprocher de la distance maximale de la pâte (EMP) qui dépend de la compacité d'un échantillon g , de la compacité du granulat g^* et du diamètre de granulat maximal d_{max} (DE Larrard, 1999) par la relation suivante :

$$EMP = d_{max} \left(\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \quad [1]$$

L'EMP est généralement de l'ordre de 2 mm à l'échelle macroscopique pour un béton avec une fraction volumique des granulats entre 60 et 70% et un g^* de l'ordre de 85%.

- Pour les essais de cisaillement direct, les échantillons sont constitués d'un granulat calcaire et d'une pâte de ciment (Figure 2b).

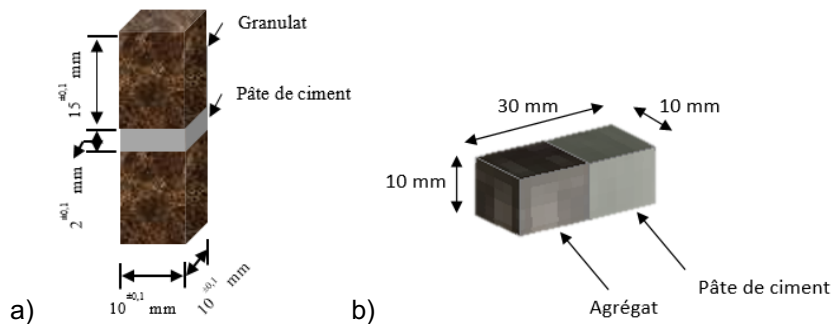


Figure 2. Dimensions des échantillons pour les essais directs : a) de traction et b) de cisaillement.

Les échantillons sont préparés en utilisant des moules spécifiques fabriqués pour qu'ils soient adaptés aux dimensions voulues (Figure 3). Les moules sont constitués de deux parties : une partie inférieure dissociable pour faciliter le démoulage des échantillons, et une partie supérieure qui sert à fixer la distance entre deux les granulats à l'aide des vis. Les étapes de fabrication des composites sont présentées sur la Figure 3.

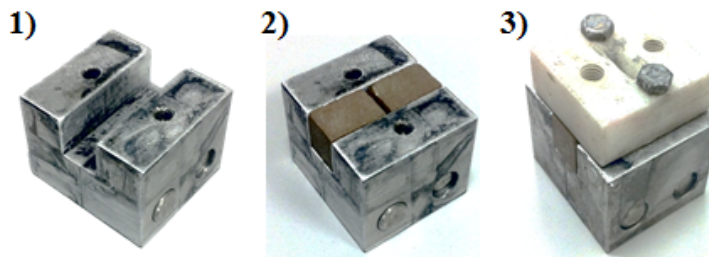


Figure 3. Étapes de fabrication des échantillons parallélépipédiques

Des essais mécaniques ont également été menés sur des échantillons de pâte de ciment pure, de dimensions équivalentes à celles présentées à la Figure 2, ainsi des essais de compression sur les granulats, afin d'obtenir les propriétés mécaniques de référence. Après fabrication, tous les échantillons sont démoulés au bout de 24 heures d'hydratation et sont immédiatement plongés dans l'eau saturée en chaux à une température de 21°C pour éviter une lixiviation précoce de l'interface.

3. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

A différentes étapes du temps d'hydratation (2, 7, 15, 28 et 90 jours), trois échantillons sont soumis à des essais directs de traction et de cisaillement pour mesurer leur résistance à la rupture. Les essais ont été réalisés sur une machine d'essai de type "Mechanical Testing Système" (MTS) en imposant une vitesse déplacement constante de 0,01 mm/s. Tous les essais mécaniques ont été filmés avec une caméra rapide Vision Research Phantom v12 (vitesse d'acquisition de 10 à 40 mille images par seconde), pour corriger les déplacements au cours des essais par la corrélation d'image. Dans notre cas, le déplacement est calculé sur un élément de surface le plus proche de la zone de rupture (Figure 4), pour calculer le saut de déplacement de l'ouverture de la fissure.

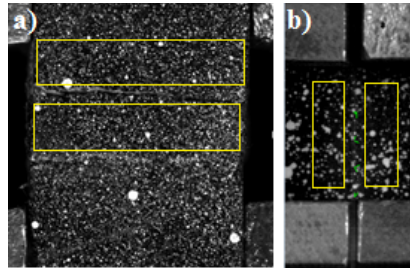


Figure 4. Zone de calcul des déplacements par corrélation d'image pour a) l'essai de traction et b) l'essai de cisaillement.

3.1. Essai de traction directe

A l'échelle macroscopique, les essais de traction directe sur le béton sont difficiles à réaliser et présentent une grande dispersion des résultats (Saito & Kawamura, 1986). Plusieurs types d'essais de traction sont utilisés pour calculer la résistance à la traction du béton, comme l'essai de fendage ou l'essai de flexion trois points. L'essai de traction directe sur le béton à l'échelle de l'interface pâte de ciment - granulat est cependant moins étudié.

Pour réaliser les essais mécaniques de traction directe, les dispositifs expérimentaux ont été élaborés et fabriqués de manière à être adaptés à la taille et à la forme des échantillons. Le principe de ces essais est assez simple, mais la préparation et la mise en place doivent être effectuées avec précaution. En effet, chaque défaut dans l'alignement des dispositifs de traction ou dans l'inclinaison de l'échantillon induit de la flexion parasite qui altère les résultats. Quatre cales en acier percées d'un trou sont d'abord collées sur l'échantillon comme indiqué sur la Figure 5. Pour réaliser l'essai, l'échantillon est fixé à l'aide des tiges en acier placées dans les trous des cales et des supports en « U » fixés sur la machine.

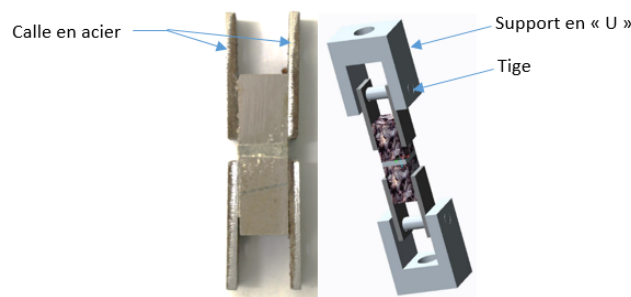


Figure 5. Dispositif expérimental pour l'essai de traction directe.

3.2. Essai de cisaillement direct

L'essai de cisaillement direct est largement utilisé en mécanique des sols pour déterminer la cohésion locale C et l'angle de frottement interne ϕ . Néanmoins, cet essai est parmi les essais les plus difficiles à réaliser sur les matériaux cimentaires pour caractériser l'interface pâte de ciment-granulat à cause de l'absence d'outils expérimentaux adaptés.

L'objectif de notre approche originale est de pouvoir accéder à la loi de Mohr-Coulomb de l'interface (angle de frottement et cohésion) pour différentes contraintes normales. Pour réaliser cet essai, des dispositifs expérimentaux ont été dessinés et fabriqués de manière à ce que la rupture se localise précisément à l'interface.

Le dispositif est constitué de deux demi-boîtes, la distance entre ces deux demi-boîtes est voisine de 0,5 mm pour minimiser la flexion de l'échantillon. Des vis aux extrémités des demi-boîtes servent à fixer la position de l'interface au milieu des deux demi-boîtes, pour éviter le déplacement de l'échantillon pendant l'essai et pour appliquer la force normale N . Pour mesurer cette force de confinement appliquée, un capteur de force (de type LMCKD-200N) est installé à l'extrémité de l'échantillon. La Figure 6 illustre l'appareil expérimental où l'échantillon est placé à l'intérieur des deux demi-boîtes.

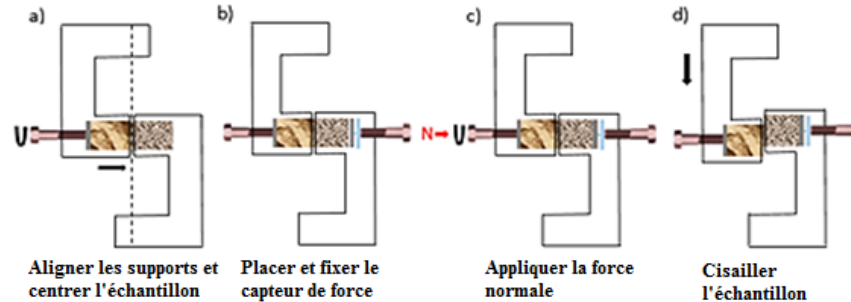


Figure 6. Schémas des étapes du mode opératoire d'essai de cisaillement.

Le principe de l'essai consiste à appliquer une force normale N de confinement, mesurée par le capteur de force, créant une contrainte normale σ dans le plan horizontal. Au cours de l'essai, la vitesse de déplacement est imposée de 0,01 mm/s au niveau de l'une des demi-boîtes, l'autre demi-boîte restant fixe. Au cours de ce déplacement, la force de cisaillement T est mesurée dans le plan vertical, grâce à un capteur de force lié à la MTS, permettant d'avoir accès à la contrainte de cisaillement τ . Les relations entre ces grandeurs sont :

$$\sigma = \frac{N}{A'} \quad \tau = \frac{T}{A'} \quad [2]$$

où A' est la section corrigée de l'échantillon au cours de l'essai.

En faisant varier la force normale N , on en déduit 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. Pour cette étude, deux familles d'essais de cisaillement direct ont été réalisées :

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

Ces deux protocoles permettent d'obtenir pour le premier l'évolution de la cohésion C entre la pâte de ciment et le granulat en fonction du temps d'hydratation et, pour le second, l'angle de frottement ϕ pour un temps d'hydratation donné.

4. RESULTATS EXPERIMENTAUX

On présente maintenant l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus à partir des essais directs de traction et de cisaillement sur la pâte de ciment pure et le composite.

4.1. Essai de traction directe

Dans cette étude, des essais de traction directe sont effectués sur les échantillons constitués de deux granulats, liés par une pâte de ciment de 2 mm d'épaisseur. Les essais doivent être effectués très minutieusement pour éviter l'inclinaison de l'échantillon. En outre, il existe d'autres paramètres qui peuvent influencer les résultats de l'essai, comme par exemple les microfissures au niveau de l'interface.

Pour cette raison, chaque essai a systématiquement été réalisé sur trois échantillons afin de moyennner les résultats.

La Figure 7 donne l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation respectivement pour la pâte de ciment pure (Figure 7a) et pour le composite « pâte de ciment-granulat » (Figure 7b). On observe une augmentation significative de la contrainte à la rupture $\sigma_r(j)$ au début de l'hydratation puis une stabilisation progressive après trois semaines d'hydratation aussi bien pour le composite que la pâte de ciment.

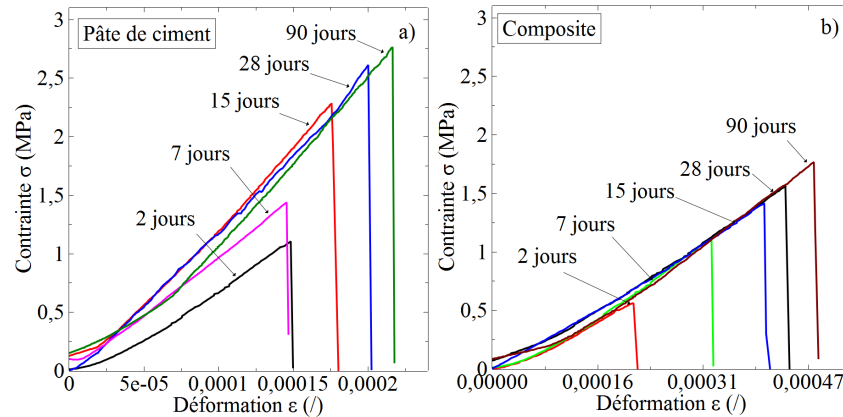


Figure 7. Courbes contrainte-déformation en traction directe en fonction du temps d'hydratation a) de la pâte de ciment pure et b) du composite.

Pour tous les essais de traction, on observe que toutes les ruptures sur le composite se produisent à l'interface pâte de ciment-granulat (Figure 8) qui représente la zone la plus fragile. On constate également un comportement quasi-fragile pour les deux types d'échantillons. A cette échelle, on remarque une seule fissure qui se propage rapidement à travers l'interface pâte de ciment-granulat, ce qui provoque une chute brutale de la contrainte de traction au moment de la rupture. Des résultats similaires ont été obtenus par (Mielniczuk et al., 2016) et (Jebli et al., 2016) avec des granulats sphériques.

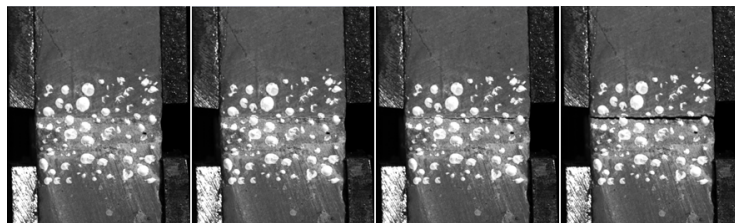


Figure 8. Évolution de la fissure à l'interface d'un échantillon au cours de l'essai de traction (28 jours).

Les évolutions de la contrainte à la rupture σ_r au cours des essais de traction de la pâte de ciment et du composite en fonction du temps d'hydratation j sont présentées sur la Figure 9a. Cette évolution a été approchée par une fonction exponentielle, basée sur les équations proposées dans l'Eurocode 2 (Eurocode, 2004), afin d'estimer la résistance à la traction des échantillons de pâte de ciment pure et de composite. La Figure 9b montre l'évolution du module de Young E_T en fonction du temps d'hydratation j . On remarque que le module de Young est trois fois plus grand dans la pâte de ciment que celui du composite.

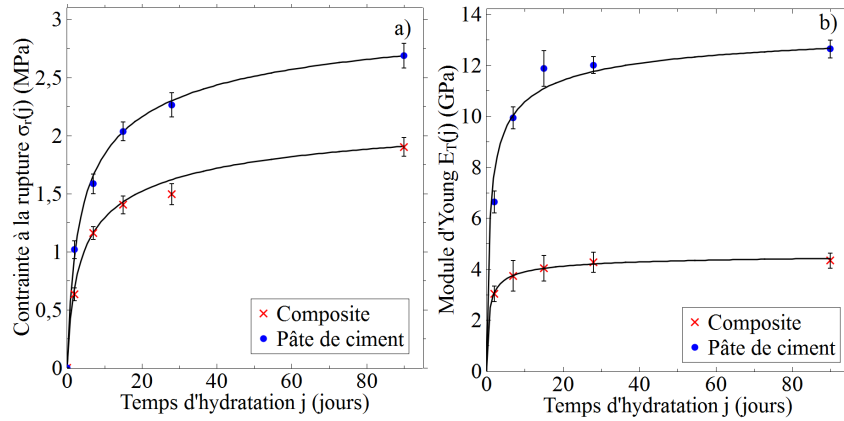


Figure 9. Évolutions de la contrainte à la rupture a) et de module de Young b) de la pâte de ciment et du composite en fonction du temps d'hydratation.

Les résultats expérimentaux montrent une augmentation plus rapide de la résistance de la pâte de ciment pure que celle du composite. De plus, la valeur de la contrainte à la rupture des composites représente 70% de celle de la pâte de ciment, quel que soit le temps d'hydratation. Les résultats (contrainte-déformation) suggèrent que le composite a une déformation plus importante que la pâte de ciment. Ce constat s'explique par une porosité plus élevée de l'interface que la pâte de ciment pure. L'augmentation de la déformation du béton à l'échelle macroscopique lors d'essais de compression est aussi observée avec l'augmentation du rapport E/C qui augmente la porosité du béton (Lee & Park, 2008).

4.2. Essai de cisaillement direct

Les essais de cisaillement sont réalisés sur le composite et la pâte de ciment pour étudier le comportement mécanique et définir les lois de comportement au cisaillement de l'interface et la pâte de ciment pure.

Les courbes de contraintes – déformations, obtenues lors des essais de cisaillement direct (sans contrainte normale), sont présentées sur la Figure 10 à différents stades d'hydratation au cours des 40 premiers jours pour la pâte de ciment et l'interface pâte de ciment-granulat.

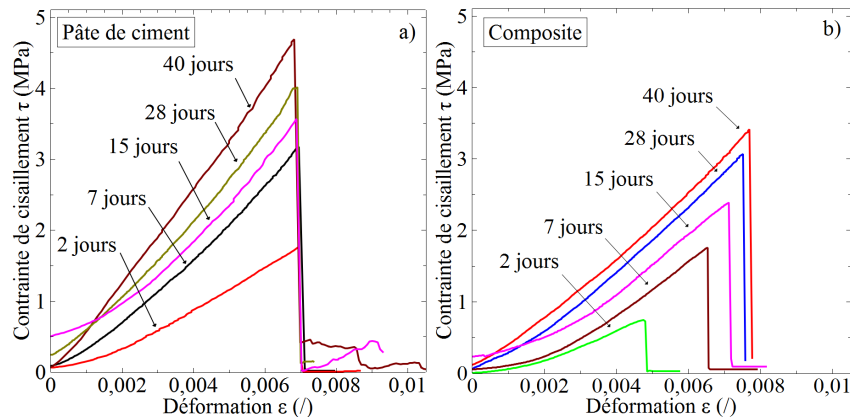


Figure 10. Courbes contrainte - déformation lors des essais de cisaillement : a) du composite b) de la pâte de ciment.

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 début de l'hydratation. Comme pour l'essai de traction, on constate un comportement quasi-fragile de la rupture au cisaillement avec une absence de la partie adoucissante de la courbe contrainte-déformation.

Pour l'essai de cisaillement de la pâte de ciment et du composite « pâte de ciment-granulat », les valeurs de la contrainte à la rupture τ_r et du module de cisaillement E_s en fonction du temps d'hydratation j sont présentées sur la Figure 11. Le module de cisaillement des échantillons a été estimé à partir de la pente de la partie linéaire des courbes contrainte-déformation (Figure 10). On constate une augmentation similaire des contraintes à la rupture et du module de cisaillement au cours de l'hydratation pour les deux types d'échantillons. On remarque que le module de cisaillement est 1,5 fois plus grand dans la pâte de ciment que celui du composite.

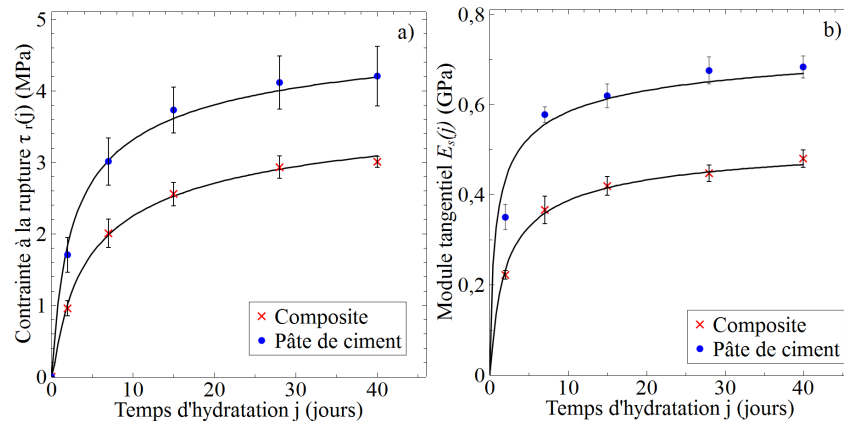


Figure 11. Évolutions a) de la contrainte à la rupture b) du module de cisaillement en fonction du temps d'hydratation pour le composite et la pâte de ciment.

Après la caractérisation de l'effet du temps d'hydratation sur la contrainte de cisaillement respectivement pour la pâte de ciment pure et pour le composite « pâte de ciment-granulat », on s'intéresse à l'influence de la contrainte normale sur les résistances au cisaillement. Les échantillons avec un temps d'hydratation fixe (40 jours) sont soumis à des essais de cisaillement direct à différentes contraintes normales. Les courbes de contraintes-déformations obtenues sont présentées sur les Figures 12 pour différentes contraintes de confinement : 0 ; 0,5 ; 1 et 1,5 MPa.

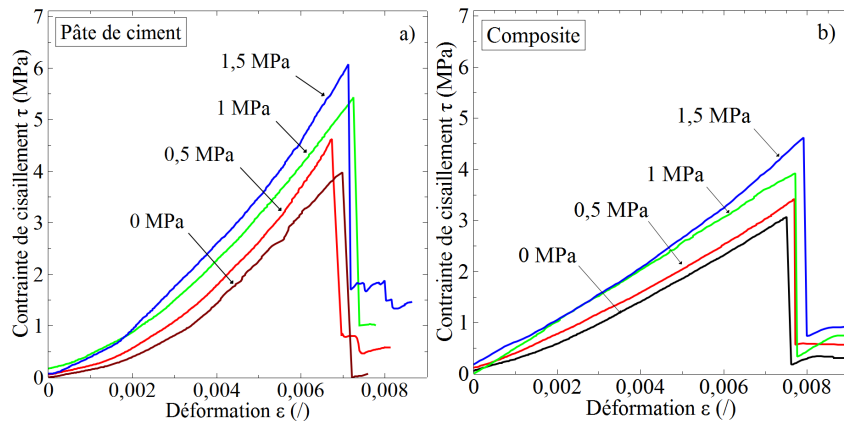


Figure 12. Évolutions des contraintes de cisaillement a) pour la pâte de ciment et b) pour le composite en fonction de la déformation à différentes contraintes normales à 40 jours d'hydratation.

On constate qu'il y a une forte dépendance du comportement mécanique du composite et de la pâte de ciment à la contrainte normale : la contrainte à la rupture de cisaillement augmente avec l'augmentation de la contrainte normale pour les deux types d'échantillons. Cette évolution en fonction de la contrainte normale permet de calculer l'angle de frottement interne local et la cohésion locale en exprimant la contrainte de rupture au cisaillement en fonction de la contrainte normale appliquée (Figure 13).

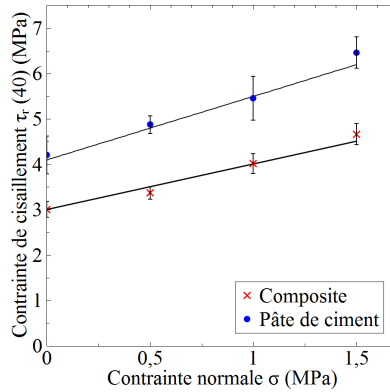


Figure 13. Droite de Mohr-Coulomb pour l'interface et la pâte de ciment en fonction de la contrainte normale à 40 jours d'hydratation.

On remarque une évolution linéaire de la contrainte de cisaillement avec l'augmentation de la contrainte normale, pour la pâte pure et le composite. Le critère de rupture de Mohr-Coulomb est défini par la relation suivante :

$$\tau_r(40) = \sigma \tan(\phi) + C \quad [3]$$

où $\tau_r(40)$ est la contrainte de cisaillement à la rupture à 40 jours, σ est la contrainte normale appliquée, C est la cohésion et $\tan(\phi)$ est la pente de l'enveloppe de rupture. Cette évolution nous permet d'accéder à la loi de cisaillement pour les deux types d'échantillons. Le Tableau 1 résume les résultats obtenus pour les valeurs locales de cohésion et d'angle de frottement interne pour un temps d'hydratation de 40 jours pour la pâte de ciment pure et le composite.

	Pâte de ciment	Composite
Cohésion C (MPa)	4,1	2,9
Angle de frottement ϕ (°)	54	47

Tableau 1. Cohésion C et l'angle de frottement ϕ de la pâte de ciment et du composite à 40 jours d'hydratation

Les résultats montrent que la cohésion locale c et l'angle de frottement local ϕ de la pâte sont plus élevés que celle du composite. Dans la littérature, il existe très peu d'essais similaires à cette échelle pour comparer les résultats obtenus. Les seuls résultats existants sont ceux de (Gu et al., 2013), qui ont identifié un angle de frottement de 35° à l'interface entre une roche en marbre et un mortier. L'étude a consisté à faire varier l'angle de contact entre les deux matériaux ($\alpha = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ et 60°), les résultats expérimentaux étant ajustés par des relations théoriques. Les auteurs n'ont pas constaté de différence significative entre la résistance au cisaillement de l'interface et la résistance au cisaillement du mortier.

5. Conclusions

Des essais originaux à l'échelle de l'interface pâte de ciment-granulat ont été réalisés pour caractériser les propriétés mécaniques de l'interface. Les résultats des essais de traction du composite ont montré que la résistance à la traction augmente avec le temps d'hydratation, avec des valeurs plus faibles par rapport à la pâte de ciment. La résistance en traction de l'interface représente 70% de celle de la pâte pure. Le module de Young du composite est plus faible que celui de la pâte de ciment. La diminution du module de Young dans le béton avec l'augmentation de la fraction volumique de l'interface est également observée à l'échelle macroscopique (Alexander & Taplin, 1964; Ramesh et al., 1996; Mindess, 1996). L'évolution de ces paramètres semble bien approchée par une fonction exponentielle communément admise à l'échelle macroscopique. La cinétique d'évolution des propriétés mécaniques (contrainte et module de Young) est la même pour le composite et pour la pâte de ciment. Ces résultats de l'essai de traction à l'échelle de l'interface pâte de ciment-granulat révèlent que l'interface est la zone la plus faible dans le composite.

Une expérimentation originale a été élaborée pour étudier le comportement mécanique de l'interface avec des essais de cisaillement direct. L'avantage de ce dispositif est qu'il permet d'appliquer différentes

contraintes normales et d'accéder à la loi de cisaillement de cette zone. Les résultats de ces essais montrent que la contrainte de cisaillement à la rupture augmente avec le temps d'hydratation, avec une augmentation similaire pour la pâte de ciment et le composite mais avec des valeurs supérieures de la contrainte à la rupture de la pâte par rapport au composite. La contrainte de cisaillement dans le composite est inférieure à celle dans la pâte pure avec des valeurs de déformation du composite légèrement plus élevées. L'application de la contrainte normale augmente la résistance au cisaillement. Cela permet de calculer la cohésion locale et l'angle de frottement local de l'interface et de la pâte de ciment, de la même manière qu'un essai de cisaillement direct à l'échelle macroscopique. La cohésion et l'angle de frottement locaux de la pâte de ciment sont supérieurs à ceux de l'interface.

6. Références

- Akçaoğlu T., Tokyay M., Çelik T. (2004), *Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression*. Cement and Concrete Composites, 26(6): 633-638.
- Alexander K. M., Taplin J. H. (1964), *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.
- De Larrard, F. (1999), *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*. CRC Press.
- Eurocode 2 (2004), *Design of Concrete Structures: Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. British Standards Institution.
- Gu X., Hong L., Wang Z. et Lin F. (2013), *Experimental study and application of mechanical properties for the interface between cobblestone aggregate and mortar in concrete*. Construction and Building Materials, 46: 156-166.
- Husem M. (2003), *The effects of bond strengths between lightweight and ordinary aggregate mortar, aggregate-cement paste on the mechanical properties of concrete*. Materials Science and Engineering: A, 363(1): 152-158.
- Jebli M., Jamin F., Garcia-Diaz E., El Omari M. et El Youssoufi M. S. (2016), *Influence of leaching on the local mechanical properties of an aggregate-cement paste composite*. Cement and Concrete Composites, 12(73): 241-250.
- Kamali-Bernard S., Keinde D., Bernard F. (2014), *Effect of aggregate type on the concrete matrix/aggregates interface and its influence on the overall mechanical behavior. A numerical study*. In Key Engineering Materials, Vol. 617, pp. 14-17.
- Kawakami H. (1992), *Effect of aggregate type on the mechanical behaviour of concrete*. In International union of testing and research laboratories for materials and construction, Toulouse, pages 179-186.
- Lee K. M., & Park J. H., (2008), *A numerical model for elastic modulus of concrete considering interfacial transition zone*. Cement and Concrete Research, 38(3): 396-402.
- Mielniczuk B., Jebli M., Jamin F., El Youssoufi M. S., Pelissou C. et Monerie Y. (2016), *Characterization of behavior and cracking of a cement paste confined between spherical aggregate particles*. Cement and Concrete Research, 79: 235-242.
- Mindess S. (1996), *Tests to determine the mechanical properties of the interfacial zone*. RILEM report, 47-63.
- Mohamed A.R., Hansen W. (1999), *Micromechanical modeling of crack-aggregate interaction in concrete materials*. Cement and Concrete Composite, 21(5): 349-59.
- MTS Systems Corporation, URL <http://www.mts.com/> 2002.
- Prokopski G, Halbiniak J. (2000), *Interfacial transition zone in cementitious materials*. Cement and Concrete Research, 30(4): 579-83.
- Ramesh G., Sotelino E.D., Chen W.F. (1996), *effect of transition zone on elastic moduli of concrete materials*. Cement and Concrete Research, 26: 611-622.
- Saito M., Kawamura M. (1986), *Resistance of the cement-aggregate interfacial zone to the propagation of cracks*. Cement and concrete research, 16(5): 653-661.
- Scrivener K.L. (1999), *Characterization of the ITZ and its quantification by test methods*, RILEM Publications S.A.R.L., Paris, pp. 3-18, RILEM Report 20.
- Vision Research, Phantom v12, URL <http://www.visionresearch.com/> 2011.
- Zheng J.J., Li, X.Z. Zhou C.Q. (2005), *Thickness of interfacial transition zone and cement content profiles around aggregate*. Magazine of concrete Research, 7(7): 397-406.