

Caractérisation à l'échelle locale de la dégradation de l'interphase ciment-granulat par un traitement hygrothermique

T. Tlajji^{1,2,3}, F. Jamin^{2,3}, M. Jebli^{2,3}, C. Pélissou^{1,3}, M.S. El Youssoufi^{2,3}

¹ Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire IRSN, B.P. 3, 13115 Saint-Paul-lez-Durance Cedex

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

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

RESUME Ce travail s'intéresse à une caractérisation à l'échelle locale de l'interphase ciment-granulat sain et dégradé thermiquement, puis, à terme, atteint de la pathologie de Réaction Sulfatique Interne (RSI). Cette caractérisation est réalisée à partir de plusieurs essais mécaniques associés à des mesures d'expansion et à des observations au microscope électronique à balayage (MEB). Les échantillons de forme parallélépipédique, dits composites, sont constitués d'une pâte de ciment liée à un granulats siliceux. La forme de ces échantillons permet de rendre plus accessible l'étude du comportement mécanique de l'interphase. Deux sens de coulage ont été effectués (horizontal et vertical). Dans une enceinte climatique permettant de réguler l'humidité relative proche de 100%, un cycle thermique a été appliqué aux échantillons au jeune âge avant qu'ils soient conservés dans de l'eau déminéralisée à 38°C. Les résultats montrent une expansion du composite plus importante que celle de la pâte de ciment après 28 jours de conservation. Suite au traitement thermique appliqué, la résistance à la traction du composite est plus affectée que celle du ciment où le sens de coulage lors de la préparation présente une incidence sur les résultats. Par ailleurs, des observations au MEB montrent que le sens de coulage et le traitement thermique modifient la microstructure de l'interphase ciment/granulat.

Mots-clefs : Échelle locale, interphase, dégradation hygrothermique

I. INTRODUCTION

Les dégradations du béton peuvent être d'origine mécanique, chimique et/ou thermique. Les dégradations d'origine thermique peuvent être associées soit à l'exothermie de l'hydratation du ciment, soit au traitement thermique appliqué aux pièces préfabriquées afin d'accélérer la prise. De plus, le matériau peut être exposé à un échauffement tardif après la prise. Dans tous les cas, les élévations de température (au-delà de 65°C) constituent un risque de développement à long terme d'une pathologie nommée Réaction Sulfatique Interne (RSI) ((Barbarulo et al., 2005) & (Kchakech, 2019)). Cette pathologie peut conduire à la fissuration du matériau, provoquant la dégradation de sa tenue mécanique. La présente étude s'intéresse au comportement, à l'échelle locale, de l'interphase ciment-granulat soumis à des sollicitations hygrothermiques durant la phase d'hydratation dans le but d'accélérer le déclenchement de la RSI. Une méthodologie d'observation de la dégradation a été mise en place afin de caractériser son incidence au niveau de l'interphase.

II. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

A. Choix des matériaux et du sens de coulage

Les matériaux choisis dans cette étude visent à favoriser l'apparition de la RSI. Les échantillons de forme parallélépipédique (Fig. 1a), dits « composites », sont constitués de pâte de ciment portland CEM I 52.5 CE CP2 NF préparée avec un rapport eau/ciment de 0,47 liée à un granulats siliceux de la carrière Oscar Savreux (Paris). Des échantillons de pâte de ciment pure ont été confectionnés afin de servir de référence pour cette étude. La préparation des échantillons est effectuée à l'aide de deux types de moules (Fig. 1b) permettant d'étudier l'influence du sens de coulage de la pâte (horizontal avec des moules en acier et vertical avec des moules en silicone).

B. Traitement thermique au jeune âge

Afin d'accélérer l'apparition de la pathologie, les échantillons subissent un traitement hygrothermique, juste après leur fabrication, dans une enceinte climatique « Weiss » qui permet d'imposer les cycles thermique et hydrique souhaités. Une étude récente, réalisée par Jebli et al. (2018a), a permis de retenir un cycle hygrothermique pour les éprouvettes de petites dimensions. Ce cycle consiste à maintenir une humidité relative proche de 97% et de réaliser une montée en température de 5°C/heure, suivie d'un palier de 2 heures à 80°C, puis d'une descente de 5°C/heure (Fig. 1c). Après le cycle hygrothermique, les éprouvettes sont conservées dans un bac d'eau déminéralisée de 25 litres à une température de 38°C. Les échantillons n'ayant pas subi un traitement hygrothermique, dits « sains », sont conservés dans de l'eau saturée en chaux.



FIGURE 1. a) Dimensions des éprouvettes de pâte de ciment et de composite, b) Moules verticaux (à gauche) et horizontaux (à droite) utilisés, c) Cycle thermique et humidité relative appliqués.

C. Suivi de l'expansion

Pour réaliser le suivi de l'expansion des échantillons, la méthode de corrélation d'images a été utilisée. Cette méthode consiste à déposer un mouchetis sur une face de l'échantillon puis à photographier cette face au cours du temps. La mesure de l'expansion est réalisée en suivant la distance entre deux mêmes points, clairement identifiés. Quatre mesures sont effectuées sur chaque échantillon de sorte que les distances suivies sur le composite soient prises de part et d'autre de l'interphase.

D. Caractérisation mécanique de l'interphase sur l'essai de traction

Pour réaliser les essais mécaniques de traction directe à l'échelle locale, des dispositifs expérimentaux ont été conçus et réalisés par Jebli et al. (2018b), de manière à être adaptés à la taille et à la forme des échantillons. L'essai de traction directe consiste à coller deux plaques métalliques (calles) de chaque côté de l'échantillon qui permettent de réaliser l'essai à l'aide d'un support comme indiqué sur la Fig. 2.c. La presse utilisée est une presse universelle MTS. L'essai est piloté en déplacement avec une vitesse de 10 $\mu\text{m/s}$.

III. RESULTATS

Au cours de la dégradation, des mesures de l'expansion sont systématiquement effectuées sur une pâte de ciment et sur un composite. De plus, des essais de caractérisation du comportement en traction directe et des observations au MEB sont réalisés après 28 jours de conservation.

A. Suivi de l'expansion

Les expansions issues des mesures de déplacement, en fonction de la durée de conservation dans l'eau, ont été obtenues pour la pâte de ciment (Fig.2a) et pour le composite (Fig 2b). On observe une cinétique de gonflement linéaire jusqu'à 28 jours de conservation, beaucoup plus rapide sur les éprouvettes traitées thermiquement que sur les éprouvettes saines. Il n'y a pas de différence significative entre le composite et la pâte de ciment pure, sains et dégradés, quel que soit le mode de coulage. L'expansion maximale n'a pas encore été atteinte pour les deux types d'échantillons.

B. Résistance à la traction

Après 28 jours de conservation, trois essais de traction (Fig. 2c) sont réalisés sur le ciment et sur le composite. Les résultats sont présentés sur la Fig. 2.d. Une dispersion des résultats est observée sur la pâte de ciment pure qui est attribuée au mode de rupture, différent selon l'échantillon. La rupture du composite s'effectue toujours au niveau de l'interphase ciment-granulat. Une baisse de la résistance à la traction est plus notable sur les échantillons dégradés coulés verticalement que sur ceux coulés horizontalement.

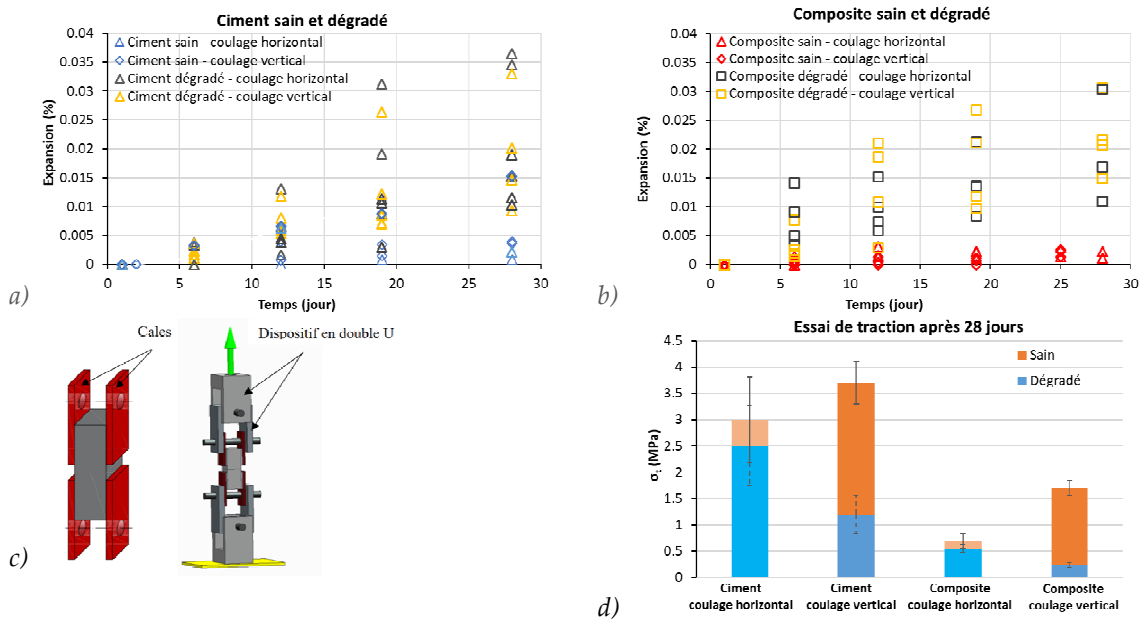


FIGURE 2. a) Expansion ciment, b) Expansion composite, c) Dispositif de l'essai de traction, d) Résistance à la traction du ciment et du composite sains et dégradés avec coulages horizontal et vertical.

C. Observations au MEB

Les observations au MEB, réalisées sur quelques composites sains, montrent que l'épaisseur de l'interphase change selon le sens du coulage (Fig. 3a et 3b). A cette échelle, les effets du micro-ressuage au niveau de l'interphase ne sont pas négligeables.

Suite au traitement hygrothermique, après 28 jours de conservation à 38°C dans l'eau, la liaison à l'interphase ciment/granulat est modifiée (Fig. 3a et 3c), ce qui expliquerait la diminution de la résistance à la traction (Fig.2b) entre l'état sain et l'état dégradé.

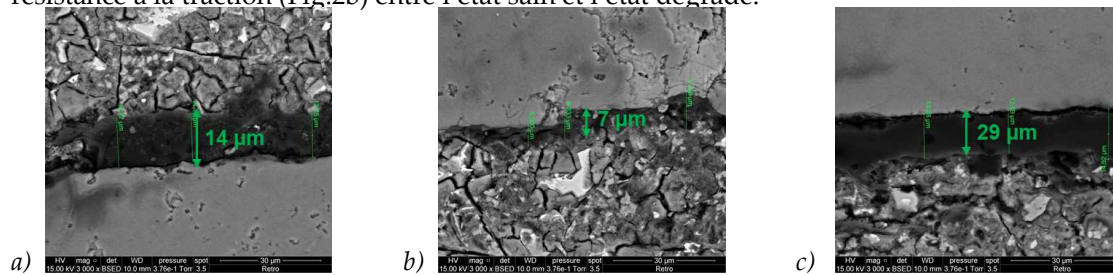


FIGURE 3. Interphase pour composite a) sain à coulage vertical, b) sain à coulage horizontal, c) dégradé à coulage vertical.

IV. CONCLUSION

Dans le cadre d'une étude sur la dégradation suite à un traitement hygrothermique sur des échantillons à l'échelle locale, permettant d'accélérer l'apparition de la RSI, cette dernière n'est pas encore observable après 28 jours de conservation. Néanmoins, ce traitement spécifique conduit clairement à une baisse de la résistance à la traction des échantillons qui est plus prononcée dans le cas d'un coulage vertical que dans le cas d'un coulage horizontal. Des observations au MEB montrent l'épaisseur de l'interphase ciment-granulat qui se révèle plus grande pour un coulage vertical et augmente après un traitement hygrothermique. Jusqu'à 28 jours de conservation, la formation différée d'ettringite, principal facteur de la pathologie RSI, ne semble pas encore se produire mais la dégradation due au conditionnement hygrothermique est notable.

REFERENCES

- B. Kchakech (2019). Risk of Delayed Ettringite Formation in Concrete Heated at a Mature Stage: Experimental Quantitative Evidence. *Key Engineering Materials*, (711), 287-294.
- M. Jebli, F. Jamin, C. Péliou, M.S. El Youssefi. (2018a). Caractérisation de l'expansion due à la réaction sulfatique interne à l'échelle de l'interphase pâte de ciment-granulat. *Les 36èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil (RUGC)*, Saint-Etienne.
- M. Jebli, F. Jamin, E. Malachanne, E. Garcia-Diaz, M.S. El Youssefi. (2018b). Experimental characterization of mechanical properties of the cement-aggregate interface in concrete. *Construction and Building Materials*, (161), 16-25.
- R. Barbarulo, H. Peycelon, S. Prené, J. Marchand (2005). Delayed ettringite formation symptoms on mortars induced by high temperature due to cement heat of hydration or late thermal cycle. *Cement and Concrete Research*, (35), 125-131.