



HAL
open science

Étude expérimentale de la lixiviation du béton à l'échelle de l'interface pâte de ciment-granulats

Mouad Jebli, Boleslaw Bm Mielniczuk, Frédéric Fj Jamin, Céline Cp Pelissou,
Moulay Saïd Sel El Youssefi

► To cite this version:

Mouad Jebli, Boleslaw Bm Mielniczuk, Frédéric Fj Jamin, Céline Cp Pelissou, Moulay Saïd Sel El Youssefi. Étude expérimentale de la lixiviation du béton à l'échelle de l'interface pâte de ciment-granulats. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. <hal-01167695>

HAL Id: hal-01167695

<https://hal.science/hal-01167695v1>

Submitted on 24 Jun 2015

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.



HAL Authorization

Étude expérimentale de la lixiviation du béton à l'échelle de l'interface pâte de ciment-granulats

M. Jebli ^{1,3,*}, B. Mielniczuk ^{2,3}, F. Jamin ^{1,3}, C. Pelissou ^{2,3}, M.S. El Youssoufi ^{1,3}

¹ Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, UMR 5508 UM2-CNRS, Université de Montpellier, CC048, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5

² Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire IRSN, B.P. 3, 13115 Saint-Paul-lez-Durance Cedex

³ Laboratoire de Micromécanique et d'Intégrité des Structures MIST, IRSN-CNRS - Université de Montpellier, CC048, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5

* E-mail : mouad.jebli@univ-montp2.fr

RÉSUMÉ. Cet article présente une étude expérimentale de caractérisation du comportement mécanique à l'échelle locale du béton sain et dégradé par lixiviation. Un protocole expérimental a été mis au point pour étudier les effets du mécanisme de lixiviation du calcium au niveau de la zone de transition interfaciale sur les propriétés mécaniques du béton à l'échelle de l'interface ciment-granulats. Compte tenu de la lenteur du temps caractéristique du phénomène de lixiviation, la mise en situation expérimentale au laboratoire est accélérée en remplaçant l'eau par une solution de nitrate d'ammonium. Afin de quantifier le développement et la cinétique de dégradation au niveau de la liaison cimentée, les fronts de lixiviation du béton sont caractérisés à différents degrés de dégradation en utilisant la phénolphtaléine comme traceur. Des essais mécaniques locaux (compression et traction) sont réalisés sur des échantillons constitués de deux granulats liés par une pâte de ciment. Les essais portent sur des échantillons sains à différents stades d'hydratation et sur des échantillons dégradés chimiquement. Les résultats obtenus montrent l'effet de la lixiviation sur les propriétés mécaniques des échantillons, et permettent de corréler l'avancement de la lixiviation à l'évolution de ces propriétés à l'échelle locale considérée.

ABSTRACT. This paper presents an experimental study to characterize the mechanical behaviour at the local scale of sound and degraded concrete by leaching. An experimental protocol was developed to study the effects of calcium leaching mechanism at the interfacial transition zone (ITZ) on the mechanical properties of the concrete on the scale of the cement-aggregate interface. As the process of lixiviation with the deionised water occurs very slowly, the experimental study in the laboratory is accelerated by replacing the water by ammonium nitrate solution. To quantify the development and kinetics of degradation at the cemented bond, the concrete leaching fronts are characterized at different levels of degradation by using phenolphthalein. Local mechanical tests (compression and tensile) are performed on samples consisting of two aggregates bound by cement paste. Tests are related on sound samples at different hydration time and on chemically degraded samples. The results show the effect of leaching on the mechanical properties of the samples and allow to correlate the progress of leaching to the evolution of these properties locally considered.

MOTS-CLÉS : Béton, lixiviation, interface pâte de ciment-granulats, zone de transition interfaciale (ITZ), essais mécaniques.

KEY WORDS: Concrete, leaching, cement paste-aggregate interface, interfacial transition zone (ITZ), mechanical tests.

1. Introduction

La durabilité et le vieillissement du béton sont des problématiques qui intéressent une communauté scientifique très large du génie civil, couvrant un spectre allant des sciences des matériaux jusqu'aux calculs de structures. L'élaboration, la mise en œuvre, la prédiction du comportement et de la rupture sous sollicitations diverses, ainsi que l'évaluation de la durée de vie en service, sont autant de questions qui interrogent les chercheurs, les ingénieurs et les industriels du secteur. Très souvent, le béton est utilisé dans des structures exposées à des sollicitations mécaniques et environnementales extrêmes, pouvant présenter un impératif de sûreté. On peut citer à titre d'exemples les enceintes de confinement des centrales nucléaires ou encore les barrières ouvragées des sites de stockage de déchets radioactifs. Dans ce dernier cas, les ouvrages en béton accueillant les déchets doivent avoir une durée de vie très longue, ce qui nécessite une connaissance des mécanismes physico-chimiques qui sont à l'origine de la dégradation des propriétés chimiques et mécaniques du béton. Garantir la sûreté de telles installations est, bien évidemment, au cœur des défis sociétaux imposés par les choix stratégiques en matière énergétique. La nature du matériau béton, poreux et multiphasique, avec la coexistence de plusieurs échelles toutes déterminantes, fait que son comportement vis-à-vis de sollicitations mécaniques et environnementales extrêmes doit être appréhendé par le biais d'approches multi-physiques et multi-échelles. Dans ce cadre, la lixiviation apparaît comme l'un des mécanismes de dégradation les plus probables à moyen et long termes.

La dégradation chimique du béton par lixiviation est le résultat d'une attaque par l'eau qui conduit à la dissolution des hydrates de pâte de ciment [ADE 92], notamment des espèces contenant du calcium (Ca^{2+}). La portlandite (CH) est le premier minéral dissout dans le processus de lixiviation, suivi par la décalcification progressive du silicate de calcium hydraté (C-S-H) au cours du temps ([REV 92], [CAR 96]). Cette dégradation, qui se développe à partir de la surface par diffusion des produits dissouts vers l'extérieur, mène à une augmentation importante de la porosité du béton. Progressivement, les propriétés physico-chimiques et mécaniques du béton s'en trouvent modifiées et une perte de rigidité ainsi que de résistance du béton sont constatées [MAS 90]. La plupart des études expérimentales concernant l'effet de la lixiviation sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires sont réalisées à l'échelle macroscopique ([CAR 96], [NGU 05], [LEB 01]) et montrent que la rigidité du béton est considérablement réduite après la dissolution totale de la portlandite et la dissolution progressive du silicate de calcium hydraté. On note également que la modification de la microstructure augmente la ductilité du matériau chimiquement dégradé. Cependant, l'effet de la lixiviation sur la Zone de Transition Interfaciale (ITZ) reste peu abordé dans la littérature, bien que la présence des granulats semble devoir influencer le processus de lixiviation et le comportement mécanique du béton lixivié [NGU 05]. Il y a donc un intérêt certain à réaliser des investigations à l'échelle locale en vue de comprendre le mécanisme de dégradation par lixiviation et de caractériser l'effet de la lixiviation au niveau de la Zone de Transition Interfaciale (ITZ) sur les propriétés mécaniques à cette échelle.

La Zone de Transition Interfaciale (ITZ) peut être considérée comme une phase supplémentaire introduite par la présence des granulats [MAS 80]. Elle est caractérisée par une porosité très élevée et une haute concentration de la portlandite ([ZIM 85], [OLL 95]) ce qui facilite la lixiviation du calcium. Une série d'expérimentations [CAR 97] a été réalisée sur une pâte de ciment et un mortier, avec ou sans fumée de silice, pour montrer qu'il y a un effet de l'ITZ sur les propriétés mécaniques du béton. Une étude expérimentale plus récente [BUZ 08] a montré que l'interface béton-roche dégradée, à profondeur de lixiviation fixée, produit un changement radical du comportement en raison de la perte locale de la résistance mécanique.

La lixiviation par l'eau d'une éprouvette de pâte de ciment est un processus de dégradation très lent [ADE 92]. Il a été montré que pour un béton ayant un rapport Eau/Ciment de 0,4, une dégradation sur une profondeur de 4 cm nécessiterait une durée de lixiviation de l'ordre de 300 ans. Il est alors nécessaire, pour des expérimentations en laboratoire, de recourir à des techniques permettant d'accélérer ce phénomène. Parmi les méthodes existantes, on peut citer l'application d'un champ électrique [SAI 92], l'augmentation de la température [KAM 03] ou l'immersion des échantillons dans une solution de nitrate d'ammonium (NH_4NO_3). Cette dernière méthode a été choisie par plusieurs auteurs ([CAR 96], [TOG 98], [LEB 01], [HEU 03], [BUR 06], [KAM 08]) car elle provoque une dégradation similaire à ce que l'on constate dans le cas de l'eau, mais avec un temps caractéristique bien plus court. Le principe de l'accélération de la dégradation par le nitrate d'ammonium est la pénétration des ions NH_4^+ et NO_3^- , issue de la dissolution NH_4NO_3 , dans la solution interstitielle par diffusion. Les ions NH_4^+ réagissent avec les OH^- de la solution interstitielle et les ions NO_3^- réagissent avec les ions de calcium Ca^{2+} issus de la dissolution des hydrates. Cette consommation d'ions Ca^{2+} perturbe l'équilibre chimique du calcium entre les deux phases liquides et solides, ce qui entraîne la dissolution des hydrates afin de libérer de nouveaux ions de calcium.

L'étude proposée constitue une contribution à la caractérisation expérimentale de l'impact de la dégradation chimique par lixiviation des matériaux cimentaires sur les propriétés mécaniques à l'échelle de l'interface pâte de ciment-granulat. Dans ce contexte, une première étude [MIE 15] a été réalisée sur la caractérisation du comportement du béton à l'échelle de l'interface ciment-granulat d'échantillons sains, lors du processus d'hydratation en modifiant le processus de conditionnement des échantillons. Les interactions à cette échelle sont analysées expérimentalement à travers des essais mécaniques de compression et de traction réalisés avec un dispositif spécifique.

2. Matériaux

Les échantillons sont constitués de deux granulats sphériques de calcite de 8 mm de diamètre, liés par une pâte de ciment CEM II/B 32,5 portland avec un rapport E/C de 0,5 (figure 1a). La distance entre les deux granulats est fixée à 1,7 mm à l'aide de l'accessoire montré à la figure 1b qui assure la répétabilité de la distance entre les grains et le parallélisme des trous. L'échantillon obtenu a un diamètre de 8 mm et une hauteur totale d'environ 18 mm. Cette géométrie spécifique des échantillons nous permet de considérer le béton comme triphasique : granulat – ITZ – pâte de ciment (figure 1c). Ainsi, on peut suivre l'effet direct de la lixiviation au niveau de l'interface pâte de ciment-granulats sur la durabilité du matériau cimentaire.

Dans cette étude expérimentale, deux séries d'échantillons ont été réalisées, une première qui a été maintenue dans un environnement endogène, constitué d'une solution d'eau saturée en chaux (série saine), et une seconde qui a été immergée, après avoir été maintenue 40 jours dans le même environnement endogène, dans la solution agressive de nitrate d'ammonium (série dégradée).

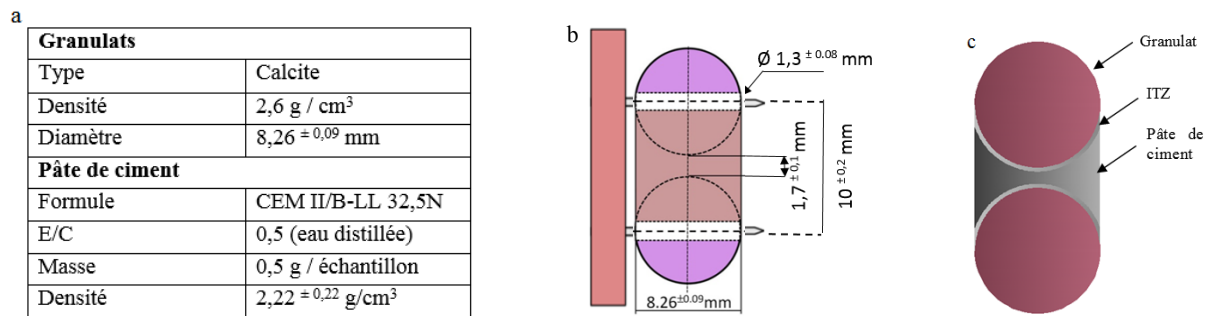


Figure 1. (a) Caractéristiques des matériaux, (b) Dimensions de l'échantillon et (c) Illustration des trois phases de l'échantillon de béton.

3. Protocoles expérimentaux

Après fabrication, tous les échantillons sont démoulés au bout de 24 heures d'hydratation et sont immédiatement plongés dans de l'eau saturée en chaux à une température de 21°C, afin de limiter les effets des retraits endogène et de dessiccation. Pour la série saine, les échantillons sont testés à différents stades d'hydratation de 1 à 40 jours. Pour la série dégradée, les échantillons sont maintenus dans un environnement endogène les 40 premiers jours, et sont ensuite plongés dans un bac de solution de nitrate d'ammonium de concentration égale à 6 moles / litre dont le pH initial est égal à 6 et contrôlé en continu avec un pH-mètre. Les échantillons sont testés à différents stades de dégradation, correspondant à des conditionnements de 1 à 101 heures. Les échantillons obtenus permettent ainsi de mesurer la profondeur de la dégradation chimique et de caractériser les propriétés mécaniques en fonction du temps de dégradation.

Pour les échantillons dégradés, la profondeur de lixiviation est mesurée par la méthode de pénétration de la phénolphthaléine qui réagit avec le pH de la solution interstitielle ([LEB 01], [NGU 05]). Lors de l'altération de la pâte cimentaire, le pH varie de la valeur initiale de la pâte (pH=13) à celui de la solution de nitrate d'ammonium (pH = 6). Ainsi, deux zones distinctes peuvent être observées : une zone saine de couleur rose et une zone dégradée de couleur grise.

Les échantillons sains et dégradés, à raison de quatre échantillons à chaque échéance de temps, ont été soumis à des essais de compression et de traction pour mesurer leurs rigidités et leurs résistances. Tous les essais ont été effectués sur une machine d'essai de type "Mechanical Testing Système" pourvue d'un capteur de force de 5000±10 N pour les essais de compression, et de 500±1 N pour les essais de traction. L'évolution des échantillons lors des essais mécaniques de compression et de traction est enregistrée avec une caméra rapide Vision Research Phantom v12 (la vitesse d'acquisition utilisée étant de dix à quarante mille images par seconde).

Les essais mécaniques ont été réalisés avec une vitesse de déplacement constante de $10 \mu\text{m/s}$ au cours du chargement. La force et le déplacement sont mesurés dans la direction axiale pendant l'essai ; le déplacement étant vérifié par les résultats de l'imagerie. Des accessoires spécifiques ont été conçus et réalisés de manière à adapter les essais locaux aux conditions de sollicitations de la machine. Ces accessoires sont illustrés de façon sommaire sur la figure 2 qui présente le dispositif expérimental pour les essais de compression et de traction. Lors de l'essai de compression, l'échantillon est placé entre deux plateaux. La position initiale de l'échantillon est réglée et la forme sphérique des grains minimise l'effet de frottement ; la charge axiale étant raisonnablement assimilable à une charge ponctuelle. Lors des essais de traction, l'échantillon est fixé à l'aide de tiges en acier HSS très rigide pour éviter toute flexion des tiges (diamètre 1,3 mm). Ces tiges sont placées dans les trous des grains afin d'assurer un chargement centré. Avant chaque essai, les dimensions et la masse exactes de chaque échantillon sont mesurées. Les essais permettent la caractérisation du comportement mécanique et de la rupture à l'échelle de la liaison cimentaire, avec une géométrie de l'échantillon proche de la réalité. Pour l'essai de compression, la fissuration se développe selon une génératrice (figure 3a), alors que pour l'essai de traction, la fissuration se développe à l'interface pâte de ciment-granulat (figure 3b).

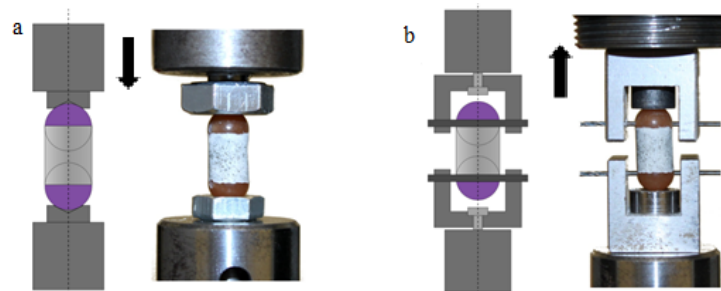


Figure 2. Photos des supports et accessoires pour les essais de compression (a) et de traction (b).

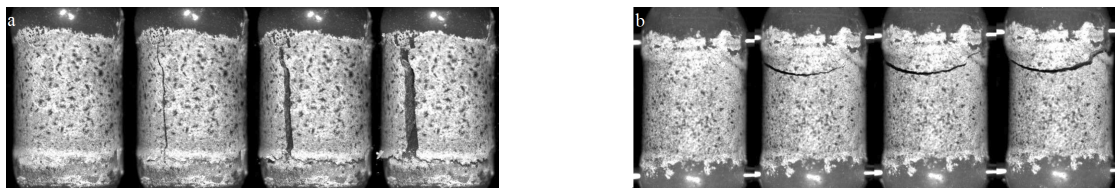


Figure 3. Modes de fissuration lors des essais de compression (a) et de traction (b).

4. Résultats expérimentaux

Dans cette partie, on se propose de présenter et de discuter l'ensemble des résultats obtenus au cours des essais mécaniques, aussi bien les essais de compression que de traction, sur des échantillons sains et sur des échantillons dégradés chimiquement par lixiviation.

4.1. Echantillons sains

Les courbes force – déplacement, obtenues lors des essais de compression et de traction, sont présentées sur les figures 4a) pour la compression et 4b) pour la traction à différents stades d'hydratation au cours des 40 premiers jours.

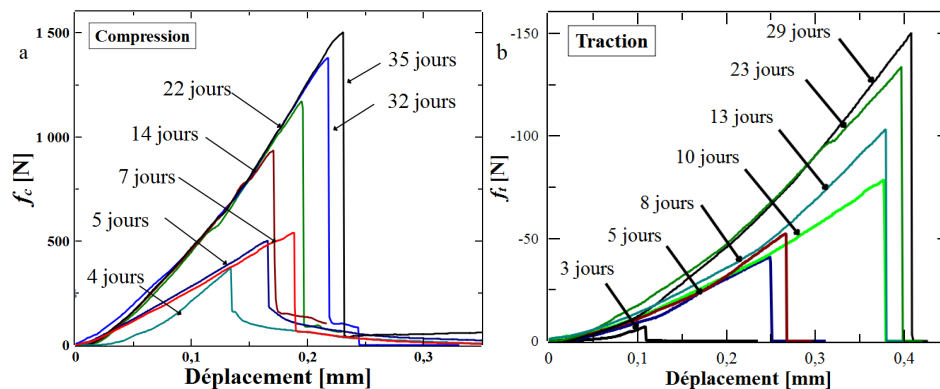


Figure 4. Courbes force - déplacement lors des essais de compression (a) et de traction (b).

Ces figures montrent une augmentation rapide de la force à la rupture et de la raideur des échantillons au début de l'hydratation. On note des valeurs de la raideur presque constantes au-delà d'une première période d'hydratation d'environ trois semaines. Les échantillons sollicités à l'essai de compression présentent un comportement ductile à très jeune âge (première semaine) qui devient de plus en plus fragile par la suite. Ces résultats confirment les tendances obtenues par [MIE 15] pour les essais de compression. Par contre, le conditionnement de conservation des échantillons étant différent, on constate une augmentation de la force à la rupture pour les essais de traction en raison de la limitation des retraits à l'interface au cours du conditionnement.

Les valeurs de la force à la rupture notée $f(j)$ en fonction du temps d'hydratation j (en jours), pour les essais de compression et de traction, sont présentées sur la figure 5. On constate une augmentation des forces à la rupture en compression et en traction au cours de l'hydratation, avec une baisse de vitesse d'évolution de la force après 28 jours. Comme pour l'échelle macroscopique, on note à l'échelle locale une bonne résistance à la compression et une faible résistance à la traction. On note également un rapport de dix entre les forces à la rupture en compression $f_c(j)$ et en traction $f_t(j)$, ce qui est généralement admis dans la littérature à l'échelle macroscopique.

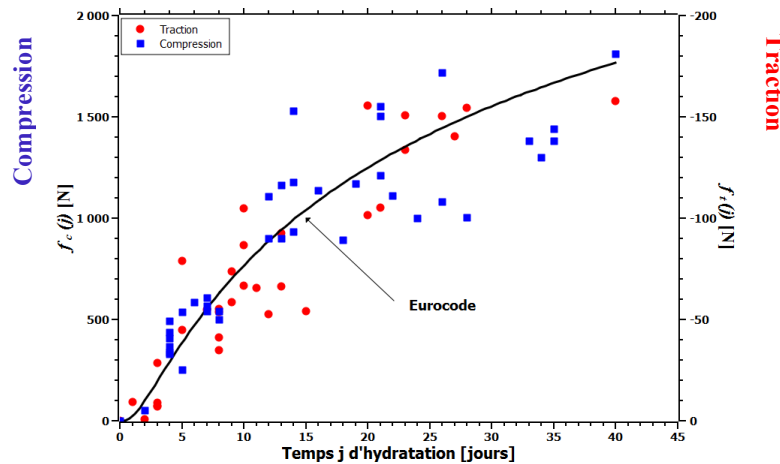


Figure 5. Evolution de la force à la rupture en fonction du temps d'hydratation lors des essais mécaniques.

L'évolution de la force à la rupture en fonction du temps d'hydratation a pu être approchée par une fonction exponentielle, en se basant sur les équations [1] et [2] présentées dans l'Eurocode 2 [STA 04], pour estimer les forces à la rupture obtenues expérimentalement en compression $f_c(j)$ et en traction $f_t(j)$ du béton à l'âge de j jours.

$$f_c(j) = \beta_{cc}(j) f_c(28) \quad [1]$$

$$f_t(j) = (\beta_{cc}(j))^\alpha f_t(28) \quad [2]$$

où $f_c(28) = 1500$ N et $f_t(28) = 150$ N sont les forces à la rupture respectivement en compression et en traction des échantillons à 28 jours, et β_{cc} est un coefficient qui dépend de l'âge du béton suivant la relation :

$$\beta_{cc} = \exp \left(s \left[1 - \left(\frac{28}{j} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right) \quad [3]$$

où s est un coefficient qui dépend du type de ciment et α est un exposant dépendant de l'âge du béton. Ces deux paramètres ont été déterminés par interpolation linéaire. Pour les résultats obtenus dans cette étude, $s = 1$ et $\alpha = 1$. On peut noter par ailleurs que la valeur de α préconisée par l'Eurocode 2 pour des valeurs de $j < 28$ jours est l'unité.

4.2. Echantillons dégradés

4.2.1. Essais de dégradation chimique : lixiviation

Après avoir versé de la phénolphaléine sur les sections transversale et radiale des échantillons, deux zones distinctes peuvent être observées : une zone de couleur rose correspondant à la zone saine et une zone de couleur

grise correspondant à la zone dégradée. Quelques illustrations sont présentées sur la figure 6 pour différents temps de dégradation. Des mesures de l'épaisseur de dégradation ont été effectuées ; elles montrent une épaisseur de dégradation homogène, avec très peu de dispersion de l'ordre de $\pm 0,1\text{mm}$.

La cinétique de dégradation est régie par un processus de diffusion. Dans le cadre de cette étude, la figure 7 montre une évolution linéaire de l'épaisseur dégradée e en fonction de la racine carrée de la durée d'immersion dans la solution agressive de NH_4NO_3 de la forme :

$$e = k \times \sqrt{j} \quad [4]$$

où k est un coefficient permettant de prédire l'ampleur de la dégradation au cours du temps et dépend du type de ciment et des caractéristiques de la méthode d'accélération.

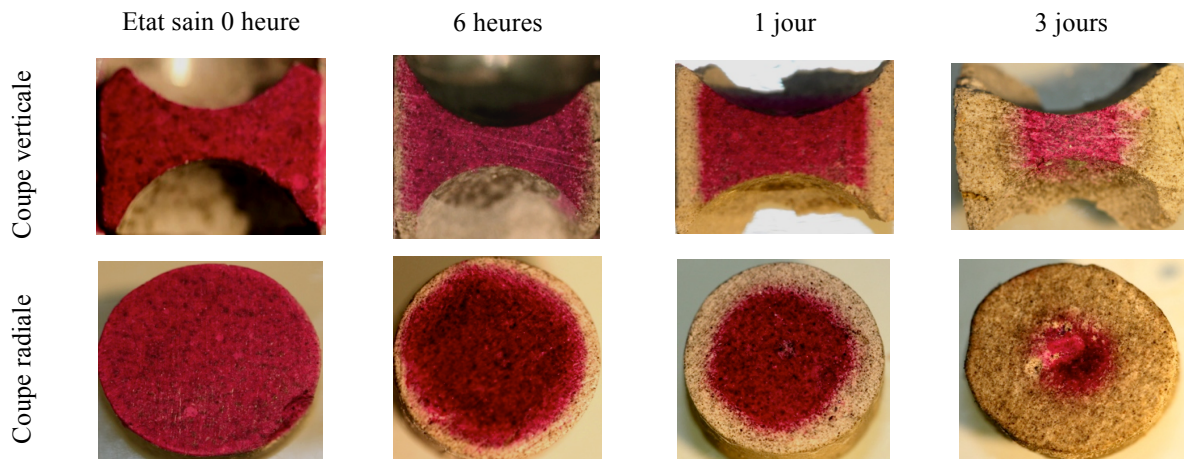


Figure 6. Mise en évidence de l'épaisseur dégradée dans le sens radial au moyen de la phénolphthaléine au cours du temps. Vues en plan vertical (images du haut) et en plan horizontal (images du bas).

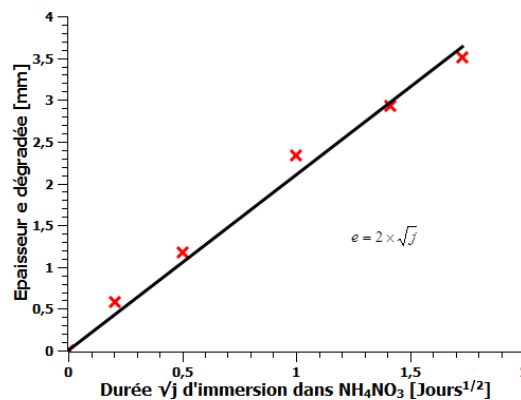


Figure 7. Evolution de l'épaisseur dégradée dans le sens radial en fonction de la durée d'immersion.

Cette évolution de la cinétique de dégradation a été montrée expérimentalement par d'autres auteurs ([CAR 96], [TOG 98]) ayant utilisé la même méthode d'accélération de la dégradation sur des échantillons macroscopiques. Dans notre cas, à l'échelle locale, la valeur de la pente est égale à 2 ce qui est similaire aux valeurs expérimentales obtenues par ces derniers à l'échelle macroscopique.

4.2.2. Essais mécaniques : compression et traction

L'essai de compression permet de caractériser l'effet de la dégradation chimique de toute la liaison cimentaire entre deux grains sur les propriétés mécaniques à cette échelle. L'essai de traction permet de caractériser l'effet de l'altération de l'interface pâte de ciment-granulats sur la résistance à la traction. Les figures 8a et 8b montrent les courbes force - déplacement à différentes durées de dégradation chimique pour la compression et la traction, ainsi que le cas d'échantillon sain pris comme référence au bout de 40 jours d'hydratation.

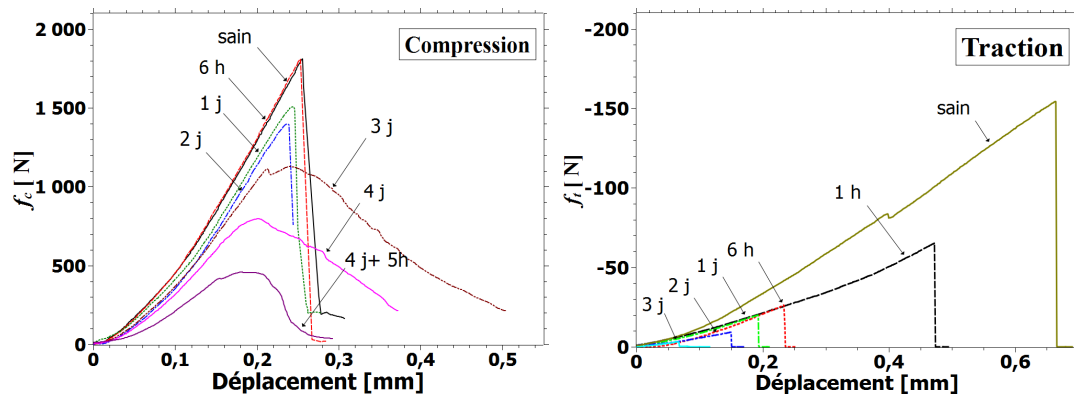


Figure 8. Comportement en compression (à gauche) et en traction (à droite) des éprouvettes partiellement dégradées.

Les résultats de la figure 8 montrent une baisse de la raideur et de la force à la rupture aussi bien en compression qu'en traction pour des durées de lixiviation de plus en plus grandes. On note un fort impact de la dégradation chimique sur le comportement mécanique, plus prononcé dans le cas de la traction qui impacte plus l'ITZ. Ce résultat n'a pas pu être observé ici avec la phénolphtaléine du fait de la fine épaisseur de l'ITZ qui varie entre 10 et 100 μm . Lors de l'essai mécanique de traction, on constate une chute rapide de la force de rupture à la traction d'environ 50% juste après 1 h de lixiviation dans la solution de Nitrate d'Ammonium. Ce résultat, montré ici expérimentalement, peut être corrélé à des résultats théoriques qui montrent que la cinétique de dégradation de l'ITZ est plus accélérée du fait de sa concentration en portlandite et d'une porosité plus élevée à l'interface. En effet, ces deux facteurs agissent en faveur d'une accélération des transports de matière, et donc d'une fragilisation plus rapide de l'ITZ.

Dans le cas de la compression, lorsque la pâte de ciment est totalement lixiviée, la force de rupture est environ trois fois plus faible que la valeur de référence. Ceci concorde avec les résultats obtenus par Le Bellégo [LEB 01] et Nguyen [NGU 05] à l'échelle macroscopique. Comme indiqué précédemment, lorsque le béton est soumis à une lixiviation, les hydrates sont dissouts et les composants sont transportés vers l'extérieur de l'échantillon par un effet d'osmose. Ce processus entraîne une augmentation de la porosité dans le béton qui provoque des pertes de raideur et de résistance. Par la suite, le comportement du béton dégradé devient de plus en plus ductile au fur et à mesure que la lixiviation progresse.

5. Conclusion

La plupart des études expérimentales concernant l'effet de la lixiviation sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires sont réalisées à l'échelle macroscopique et, dans des proportions moindres, à l'échelle mésoscopique. L'étude proposée ici constitue une contribution à l'étude des effets de la lixiviation à l'échelle de l'interface pâte de ciment-granulats. Ces effets sont qualifiés à l'aide d'essais de compression et de traction à cette échelle.

L'essai mécanique de compression a montré une chute de la résistance et un changement de comportement de fragile (échantillon sain) à ductile (échantillon dégradé). Ce phénomène semble provenir de l'augmentation de la porosité due à la diffusion des hydrates vers l'extérieur de l'échantillon.

L'essai mécanique de traction a permis de caractériser l'interface pâte de ciment-granulats. Il a montré une diminution très rapide de la résistance à la traction après seulement 1 heure de lixiviation, ce qui n'a pas été noté dans le cas de l'essai de compression. Ce résultat s'explique par la cinétique de dégradation de l'ITZ plus élevée, entraînant une perte de cohésion au niveau de la zone de transition interfaciale, d'où une dégradation plus significative des propriétés mécaniques.

L'étude de l'effet de la lixiviation à l'échelle locale révèle le rôle important de l'interface pâte de ciment-granulats lors du processus de dégradation chimique sur les propriétés mécaniques du béton. Une modélisation à cette échelle doit permettre, moyennant des outils numériques appropriés, des investigations à l'échelle du Volume Élémentaire Représentatif et une identification des lois de comportement à cette échelle dans le cadre de la problématique de durabilité et de vieillissement du béton.

6. Bibliographie

- [ADE 92] ADENOT F., Durabilité du béton : caractérisation et modélisation des processus physiques et chimiques de dégradation du ciment, PhD thesis, 1992.
- [BUR 06] BURLION N., BERNARD D., CHEN D., « X-ray microtomography: application to microstructure analysis of a cementitious material during leaching process », *Cement and Concrete Research*, vol. 36, no 2, p. 346–357, Elsevier, 2006.
- [BUZ 08] BUZZI O., BOULON M., HERVÉ M., SU K., « Leaching of rock-concrete interfaces », *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 41, no 3, p. 445–466, Springer, 2008.
- [CAR 96] CARDE C., FRANÇOIS R., TORRENTI J., « Leaching of both calcium hydroxide and CSH from cement paste: Modeling the mechanical behavior », *Cement and concrete research*, vol. 26, no 8, p. 1257–1268, Elsevier, 1996.
- [CAR 97] CARDE C., FRANÇOIS R., « Effect of the leaching of calcium hydroxide from cement paste on mechanical and physical properties », *Cement and Concrete Research*, vol. 27, no 4, p. 539–550, Elsevier, 1997.
- [HEU 03] HEUKAMP F., Chemomechanics of calcium leaching of cement-based materials at different scales: The role of CH-dissolution and CSH degradation on strength and durability performance of materials and structures, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [KAM 03] KAMALI S., GÉRARD B., MORANVILLE M., « Modelling the leaching kinetics of cement-based materials-influence of materials and environment », *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, no 4, p. 451–458, Elsevier, 2003.
- [KAM 08] KAMALI S., MORANVILLE M., LECLERCQ S., « Material and environmental parameter effects on the leaching of cement pastes: experiments and modelling », *Cement and Concrete Research*, vol. 38, no 4, p. 575–585, Elsevier, 2008.
- [LEB 01] LE BELLÉGO C., Couplage chimie mécanique dans les structures en béton armé attaquées par l'eau – Etude expérimentale et analyse numérique. LMT-ENS de Cachan, France, PhD Thesis, 2001.
- [MAS 80] MASO J., « La liaison entre les granulats et la pâte de ciment hydraté », *7ème Congrès International de la chimie des ciments*, Rapport principal, 1980.
- [MAS 90] MASON P., « The effects of aggressive water on dam concrete », *Construction and Building Materials*, vol. 4, no 3, p. 115–118, Elsevier, 1990.
- [MIE 15] MIELNICZUK B., JEBLI M., JAMIN F., EL YOUSOUFI M.S., PELISSOU C., MONERIE Y., « Experimental characterization of behavior and cracking of concrete across the cement-grain interface », *Cement and Concrete Research, in progress*.
- [NGU 05] NGUYEN V., Couplage dégradation chimique-comportement en compression du béton, PhD thesis, Ecole des Ponts ParisTech, 2005.
- [OLL 95] OLLIVIER J., MASO J., BOURDETTE B., « Interfacial transition zone in concrete », *Advanced Cement Based Materials*, vol. 2, no 1, p. 30–38, Elsevier, 1995.
- [REV 92] REVERTEGAT E., RICHET C., GEGOUT P., « Effect of pH on the durability of cement pastes », *Cement and Concrete Research*, vol. 22, no 2, p. 259–272, Elsevier, 1992.
- [SAI 92] SAITO H., NAKANE S., IKARI S., FUJIWARA A., « Preliminary experimental study on the deterioration of cementitious materials by an acceleration method », *Nuclear Engineering and Design*, vol. 138, no 2, p. 151–155, Elsevier, 1992.
- [STA 04] FOR STANDARDIZATION E. C., EN 1992-1-2 :2004 *Eurocode 2 :Design of concrete structures*, CEN, 2004.
- [TOG 98] TOGNAZZI C., « Influences couplées de la fissuration et de la dégradation sur transferts dans les bétons », *Congrès Universitaires de Génie Civil : Concours Jeunes Chercheurs*, 1998.
- [ZIM 85] ZIMBELMANN R., « A contribution to the problem of cement-aggregate bond », *Cement and Concrete Research*, vol. 15, no 5, p. 801–808, Elsevier, 1985.