

Simulation expérimentale de la lixiviation des ouvrages hydrauliques en béton : impact de la concentration en ions calcium à flux continu

GAUTHIER Aliénor^{1,2}, KADDAH Farah¹, HILLOULIN Benoît¹, ROZIERE Emmanuel¹, LOUKILI Ahmed¹

¹ Ecole Centrale de Nantes, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR-CNRS 6183, 1 rue de la Noë, BP 92101, F-44321 Nantes, France.

² Edycem, Rue du Fléchet, 85600 Boufféré, France

RESUME Le phénomène de lixiviation est toujours un problème d'actualité. Malgré le respect de la norme NF EN 206/CN et des normes connexes relatives à la durabilité des ouvrages en béton, des dégradations significatives ont pu apparaître, notamment dans des usines de production d'eau potable. L'influence du calcium est connue mais n'est pas prise en compte dans ces normes. Le but de cette étude est d'étudier l'impact de la concentration en ions calcium de la solution agressive sur la lixiviation du béton, dans le cas d'une eau minérale. Des éprouvettes de mortier sont soumises à un essai de lixiviation à flux continu, pour garder les conditions aux limites constantes. Un suivi macroscopique des variations dimensionnelles a été réalisé, et des images à l'échelle microscopique ont été obtenues, de manière à étudier la microstructure.

Mots-clefs lixiviation, béton, durabilité, composition de l'eau, ions calcium

I. INTRODUCTION

La lixiviation du béton est toujours un problème d'actualité. Malgré la prise en compte de plusieurs facteurs d'influence de la lixiviation dans les normes (NF EN 206/CN notamment) (AFNOR, 2012), tels que le pH ou encore le titre alcalimétrique complet (TAC), certains ouvrages subissent des dégradations, pouvant compromettre leur durabilité. C'est notamment le cas pour certaines usines de potabilisation de l'eau, dans lesquelles l'eau est transformée au cours des différentes étapes du traitement. Sa composition chimique évolue, et peut ainsi prendre des valeurs singulières. Les réservoirs sont construits en béton, et ces ouvrages sont directement soumis à ces changements de composition chimique, avec un flux d'eau continu et important.

Le phénomène chimique ayant lieu est celui de la lixiviation du béton, c'est-à-dire, principalement, la dissolution de la portlandite et la décalcification des C-S-H lors de la percolation d'une eau agressive (Guillon, 2004). Le phénomène de lixiviation par de l'eau déminéralisée a été largement étudié, et quelques ions ont également fait l'objet de beaucoup d'études, tels que les chlorures ou les sulfates. Cette étude, menée dans le cadre de la chaire entre Centrale Nantes et Edycem, a pour objectif d'étudier les eaux minéralisées, et notamment l'impact de la concentration en ions calcium de la solution agressive sur la lixiviation du mortier.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Eprouvettes de mortier

Des éprouvettes de 2 cm de diamètre et 17 cm de hauteur ont été réalisées en utilisant un ciment SR0 et du sable siliceux 0/2 (Massaad et al., 2017). Étant donné la très faible quantité de C_3A et la grande quantité de C_3S (0% et 58,8% respectivement), l'hydratation de ce ciment produit une grande proportion de portlandite, ce qui est a priori propice à une meilleure observation de la dégradation. Le rapport eau sur ciment choisi valait 0,6. Les éprouvettes ont été démoulées à trois jours puis conservées dans une eau saturée en chaux, dans une salle régulée à 20°C, jusqu'à l'essai de lixiviation. De la résine époxy a ensuite été appliquée aux extrémités des échantillons de mortier. Les échantillons de mortier ont été soumis à l'essai de lixiviation à l'âge de 60 jours.

B. Protocole de lixiviation

Deux dispositifs étaient mis en parallèle, de manière à pouvoir tester deux eaux minérales, qui diffèrent par leur quantité en ions calcium. Celles-ci étaient fabriquées à partir d'eau de ville puis stockées en amont du dispositif dans deux cuves. Leur concentration en ions calcium, contrôlée par ajout de nitrate de calcium, était respectivement de 1,5mmol/l pour l'eau E1.5 et 17,5mmol/l pour l'eau E17.5. Le pH, égal à 7, est ajusté en ajoutant de l'acide nitrique. Les eaux minérales étaient ensuite amenées à l'aide d'une pompe vers les récipients contenant les éprouvettes de mortier, selon un flux continu réglé à un débit d'un litre par heure, en circuit ouvert. Dans chaque dispositif, trois éprouvettes de mortier étaient immergées. Des éprouvettes témoin de mortier provenant de la même gâchée ont été gardées dans une eau saturée en chaux. Le flux a été déterminé de sorte que l'eau en sortie ait les mêmes caractéristiques (pH et ions calcium) que l'eau à l'intérieur de la cuve. Ainsi, les conditions aux limites des échantillons de mortier étaient constantes au cours de l'essai, et l'eau au contact de l'éprouvette n'était pas saturée en ions calcium et hydroxydes. L'essai a duré 216 jours.

III. Résultats et interprétation

A. Suivi macroscopique des variations dimensionnelles

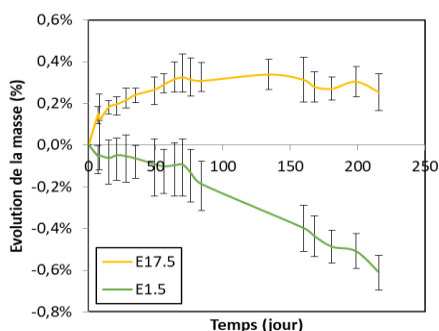


FIGURE 2. Gains de masse, dus à la lixiviation, obtenus au cours de l'essai de lixiviation sur les éprouvettes de mortier, selon la solution.

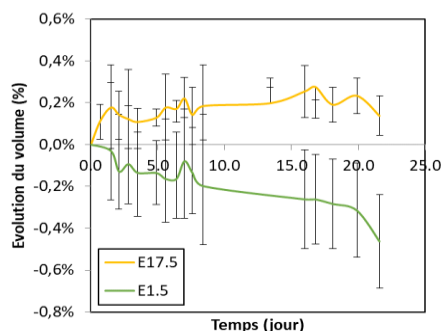


FIGURE 3. Gains de volume, dus à la lixiviation, obtenus au cours de l'essai de lixiviation sur les éprouvettes de mortier, selon la solution.

Les variations de masse (masse à éprouvette saturée à surface sèche) et de volume (différence avec la pesée hydrostatique) ont été suivies durant l'essai. Les variations des éprouvettes témoins ont été soustraites, de manière à avoir des variations de masse et de volume relatives (respectivement figure 2 et figure 3), et ne prendre en compte que les variations dues à la lixiviation. On observe une différence d'évolution nette entre les deux lots d'éprouvettes. Au bout de 216 jours, le bilan de variations de masse dû uniquement à la lixiviation, concernant l'eau E1.5, indique une perte de masse de 0,6% et une perte de volume de 0,45%. De la même manière, les éprouvettes contenues dans l'eau E17.5 ont gagné 0,25% de leur masse et 0,15% de leur volume.

B. Microstructure

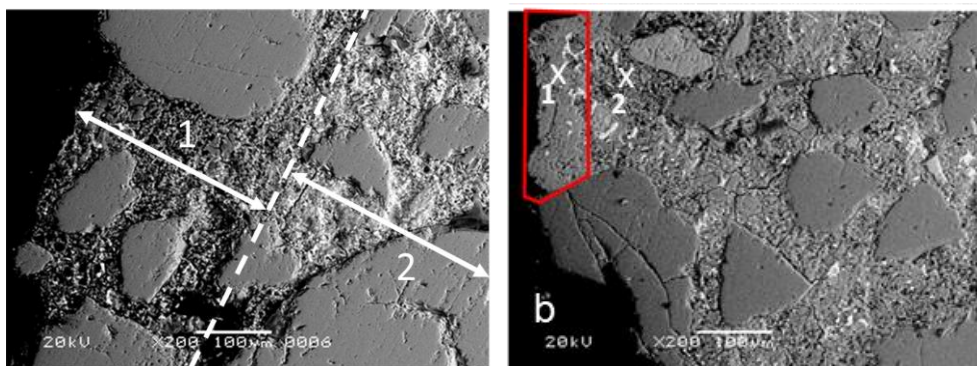


FIGURE 4. Images obtenues par microscope électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés. a) E1.5
b) E17.5

A la fin de l'essai de lixiviation, les échantillons, résinés avant polissage, sont observés via un microscope électronique à balayage. Les images récupérées sont rassemblées sur la Figure 4. Sur celle correspondant à une éprouvette immergée dans l'eau E1.5 (a), on constate un gradient de nuances de gris du bord (zone 1) au cœur (zone 2). Le bord est plus sombre, ce qui indique une plus grande porosité. Au contraire, l'éprouvette au contact de l'eau E17.5 est plus dense au bord (zone encadrée en rouge) que dans le reste de l'échantillon, comme le montre l'image (b). Un spectre EDS obtenu dans cette zone est disponible en Figure 5, un autre d'une zone plus au cœur est en Figure 6. Dans la zone dense, la présence plus faible de silice ainsi que la proportion plus importante de calcium montrent une plus faible présence de sable siliceux et de C-S-H, ce qui amène à penser qu'il y eu de la précipitation en surface de l'éprouvette, principalement composée de calcium.

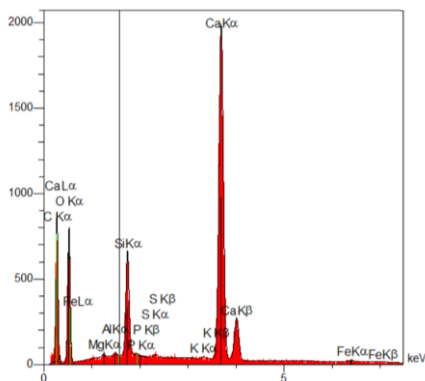


FIGURE 5. Spectre EDX au point 1 de l'image 4b.

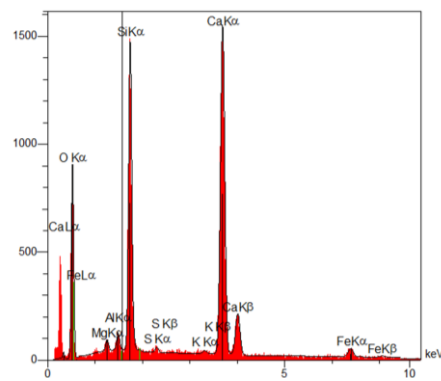


FIGURE 6. Spectre EDX au point 2 de l'image 4b.

C. *Interprétation des résultats*

Les résultats de suivi macroscopique et d'imagerie par microscope électronique à balayage semblent cohérents. Ils indiquent que l'eau E1.5 semble avoir causé la lixiviation de certains composants de la matrice cimentaire. La perte de masse est la somme entre la perte due à la dissolution des minéraux contenant du calcium (portlandite et C-S-H principalement), la perte due au décrochement de particules solides et le gain de masse du fait de l'eau venant remplacer la porosité nouvelle (Massaad et al., 2017). L'eau interstitielle contient de l'ordre de 140 mg/l de calcium (Vollpracht et al., 2016). Ainsi, le rapport des concentrations en ions calcium entre l'eau E1.5 et la solution porale est de 0,5. Ce gradient de concentration a entraîné une dissolution des minéraux contenant du calcium, notamment la portlandite.

En revanche, le ratio de concentration en ions calcium entre l'eau E17.5 et la solution porale est égal à 5, ce qui a empêché la dissolution des minéraux calcique. La présence d'ions carbonates (1,13mmol/l en moyenne) a pu entraîner la précipitation de calcite, colmatant la porosité et amenant à une zone densifiée au bord de l'éprouvette (Badouix, 2000).

IV. Conclusion et perspectives

Dans cette étude, l'impact de la concentration en ion calcium dans la solution agressive a été étudié, au travers d'un essai de lixiviation à flux continu. L'essai, en gardant des conditions aux limites constantes, permet d'obtenir une lixiviation continue d'éprouvettes de mortier par de l'eau minérale. Lorsque la concentration en calcium est élevée, la précipitation de calcite est favorisée au bord, amenant un gain de densité. En revanche, si la concentration en calcium est faible, par rapport à la solution porale, le mortier subit une dissolution de certains de ses minéraux. Ainsi, la concentration en ions calcium de la solution agressive a un impact sur les évolutions chimiques du matériau, donc sa microstructure et ses propriétés physiques et mécaniques.

REFERENCES

- AFNOR, 2012. NF EN 206-1 CN Spécification, performance, production et conformité — Complément national à la norme.
- Badouix, F., 2000. Modélisation de l'altération à long terme des bétons : prise en compte de la carbonatation, thèse de doctorat. ENS Cachan.
- Guillon, E., 2004. Durabilité des matériaux cimentaires: modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles, thèse de doctorat. ENS Cachan.
- Massaad, G., Rozière, E., Loukili, A., Izoret, L., 2017. Do the geometry and aggregates size influence external sulfate attack mechanism? *Constr. Build. Mater.* 157, 778–789. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.117>
- Vollpracht, A., Lothenbach, B., Snellings, R., Haufe, J., 2016. The pore solution of blended cements: a review. *Mater. Struct.* 49, 3341–3367. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0724-1>