

Effet de la cure sur la lixiviation de mortiers de ciments bas-carbone

Sonia Boudache¹, Louise Lemesre¹, Manon Michaut¹, Ahmed Loukili¹

¹Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44000 Nantes, France

RESUME Cette étude vise à évaluer l'influence de la méthode de cure sur la lixiviation d'échantillons de mortier à base de ciments bas-carbone, à partir d'essai de dégradation à pH contrôlé. Deux méthodes de cure sont étudiées, la moitié des échantillons est conservée dans de l'eau saturée en chaux pendant 28 jours, dans le même temps l'autre moitié est conservée à l'air libre à 20 °C. Pour mieux comprendre l'effet de la méthode de cure sur la dégradation par lixiviation, les échantillons curés ont été caractérisés avant et après. Les résultats montrent que la méthode de cure a effectivement une influence importante sur la porosité et la composition minérale des échantillons, impliquant ainsi des cinétiques de dégradation distinctes. Cependant, le niveau de dégradation tend à s'égaliser avec le temps et l'état final des échantillons est similaire. Après 210 jours de test, tous les échantillons présentaient la même porosité et la même composition minérale.

Mots-clefs Lixiviation, ciment bas-carbone, eau minérale, calcium, microstructure

I. INTRODUCTION

Les structures en béton, telles que les stations d'épuration, se dégradent souvent au contact de l'eau. Les hydrates de la pâte de ciment sont alors lixiviés. La portlandite et les C-(A-)S-H sont alors partiellement ou totalement détruites (Hou et al., 2022). La dissolution de ces composants de la matrice cimentaire entraîne une augmentation de la porosité du matériau, affectant à son tour fortement ses propriétés mécaniques (Mainguy et al., 2000). Les réactions et, par extension, les produits formés dépendent des conditions d'équilibre, c'est-à-dire de la composition ionique de la solution aqueuse et de son pH. Par exemple, si l'eau est riche en ions calcium, du carbonate de calcium peut se former et boucher la porosité, entraînant un ralentissement de la lixiviation (Pavlik, 1994). Cependant, certaines études ont suggéré que cette barrière de carbonate de calcium détourne le front de dissolution de la surface vers le cœur du matériau et augmenterait le gradient de concentrations de calcium stimulant alors la lixiviation des ions calcium de la matrice cimentaire (Adenot and Buil, 1992). La barrière de carbonates de calcium a été largement discutée, bien que des questions subsistent concernant ses paramètres de formation, sa stabilité et son effet à long terme sur la lixiviation (Schwotzer et al., 2010).

Si l'influence de l'eau sur la lixiviation du béton est certes cruciale, elle dépend aussi grandement de la matrice cimentaire. La cure du béton a une influence majeure sur la composition finale et la porosité du matériau cimentaire. Ainsi, un ciment donné peut donner lieu à de multiples matériaux cimentaires avec des porosités et des compositions minérales diverses selon les

conditions de cure. L'un des types de cure les plus répandus est l'immersion complète des échantillons dans de l'eau saturée en chaux ou en portlandite censée maximiser l'hydratation de la pâte de ciment (Kleib et al., 2021). Lorsqu'ils ne sont pas immergés, les échantillons sont conservés dans une pièce à une température de 20°C et à une humidité relative contrôlée. Selon ce protocole, les échantillons sont scellés avec un film de polyéthylène pour les protéger de la déshydratation et de la carbonatation (Hartwich and Vollpracht, 2017). Bien que ces types de conditions de cure soient pertinentes en termes d'essais en laboratoire, elles ne sont pas représentatives des conditions in situ car une structure en béton ne peut pas être scellée avec un film plastique pendant plusieurs mois ou maintenue immergée.

Cette étude examine l'effet de la cure sur la dégradation par lixiviation d'échantillons de micro-béton de ciment CEM V. Dans cette optique, deux cures ont été sélectionnées. Après les 28 jours de cure, une première caractérisation des échantillons dans leur état sain a été réalisée. Par la suite, les échantillons ont été placés dans des cellules remplies d'eau minérale. L'essai de lixiviation a été mené à un pH constant de 7. Tout au long de l'essai, la solution d'attaque a été renouvelée toutes les 2 semaines afin de maintenir des conditions aux limites constantes. La dégradation des échantillons a été évaluée à la fois par suivi de masse et par titrage des ions hydroxyde et calcium présents dans la solution, ainsi que par des essais de caractérisation (ATG et mesures de porosité).

II. MATERIEL ET METHODE

A. Matériaux et formulation des échantillons de micro-mortiers et de pâtes de ciment

Conformément aux recommandations émises dans le fascicule P18-011 ("P18-011 - Définition et classification des environnements chimiquement agressifs- Recommandations pour la formulation des bétons," 2016) pour les eaux pures ou les milieux acides, un ciment CEM V/A 42,5N PMES contenant 58 % de clinker, 22 % de laitier et 20 % de cendres volantes a été sélectionné pour l'essai. La composition du ciment est répertoriée dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Composition du ciment

Composition chimique		
SiO ₂	%	31,13
Al ₂ O ₃	%	9,89
Fe ₂ O ₃	%	3,91
CaO	%	45,96
MgO	%	2,59
SO ₃	%	2,92
K ₂ O	%	1,96
Na ₂ O	%	0,4

La formulation du micro-béton est complétée par du sable de silice 0/4 mm et des granulats 2/4. Le rapport eau/ciment est de 0,5 et un superplastifiant a été ajouté pour augmenter la maniabilité.

Les échantillons de micro-béton ont été gâchés sous forme d'échantillons cylindriques de 16 cm de long et 2 cm de diamètre. Les échantillons de pâte de ciment ont été préparés avec le même

ciment que celui utilisé pour préparer les échantillons de microbéton (tableau 1). Le micro-béton a été privilégié afin de travailler avec des échantillons de petite taille tout en gardant une certaine représentativité que n'offre pas le mortier.

B. Eau pour essai de lixiviation

L'eau utilisée pour l'essai de dégradation est une eau commerciale ; sa composition est rapportée dans le tableau 2. L'utilisation d'une eau commerciale à un pH de 7 permet de simuler l'environnement d'une station d'épuration.

TABLEAU 2. Composition de l'eau minérale

Eau minérale	
Calcium (mg/L)	13
Carbonates (mg/L)	< 3
Potassium (mg/L)	6,3
Magnesium (mg/L)	8,1
Sodium (mg/L)	4,6
Sulfates (mg/L)	8,95
Chlorures (mg/L)	16,3
Aluminium (mg/L)	< 2
Nitrates (mg/L)	7,9
pH	7

Selon l'indice de saturation de Langelier (LSI), ce type d'eau est considéré comme agressif (Langelier, 1936). Cet indice est utilisé pour déterminer la capacité d'une eau à solubiliser ou à former du carbonate de calcium. Cet indice dépend à la fois de la composition et du pH de l'eau. Sa valeur est déterminée par l'équation (1) :

$$LSI = pH - pH_s \quad (1)$$

où le pH_s correspond au pH de saturation associé à l'équation d'équilibre de précipitation du carbonate de calcium. L'eau minérale utilisée pour l'essai de lixiviation favorise la dissolution du carbonate de calcium avec un pH_s de 8,7.

C. Types de cure

Deux types de cure ont été appliqués à deux lots d'échantillons. Deux jours après le gâchage, les échantillons ont été démoulés. Une moitié des échantillons a été plongée dans une cuve d'eau saturée en chaux placée dans une pièce à une température contrôlée de 20°C (échantillons CH pour cure humide). L'autre moitié des échantillons a été placée dans une pièce à 50 % d'humidité relative et à une température de 20°C (échantillons CS pour cure sèche).

D. Protocole de l'essai de lixiviation à pH constant

Après 28 jours de cure, chacun des deux lots d'échantillons a été placé dans une cellule double paroi remplie de 2 L d'eau minérale. La température a été maintenue constante à 20 °C par la circulation d'eau dans la double paroi des cellules. Le pH a également été maintenu constant à 7,000 au moyen d'ajouts dosés d'acide nitrique 0,5 M. Le nitrate de calcium ayant une solubilité

très importante (120 g pour 100 mL), il ne se formera pas préférentiellement au carbonate de calcium (Cho et al., 2024). Toutes les deux semaines, la solution lixivante (eau minérale) a été renouvelée (Pouyanne et al., 2024).

Parallèlement, des mesures de suivi de la dégradation ont été réalisées sur les échantillons. Lors du renouvellement de la solution d'eau minérale, la masse dans l'air et dans l'eau de chaque éprouvette, dégradée et témoin, a été mesurée. La masse dans l'air a été obtenue après séchage de la surface avec du papier absorbant uniquement (soit la masse humide surface sèche).

E. Caractérisation des échantillons sains et dégradés

Mesures de porosité par saturation d'eau : Pour chaque type de cure, 3 morceaux d'échantillon (2 cm x Ø 2 cm) ont été saturés sous vide, selon un protocole dérivé de la norme NF-P18-459 et de la norme NF-EN 13057. Les échantillons ont été placés dans un dessiccateur sous vide pendant 4 heures, puis sous eau et sous vide pendant 44 heures. Après sortie du dessiccateur, les échantillons ont été pesés dans l'eau puis à l'air après avoir été brièvement séchés en surface. Ensuite, les échantillons ont été séchés dans une étuve à 105 °C et pesés tous les jours, jusqu'à ce que la différence de masse entre deux pesées successives à 24 heures soit inférieure à 0,05 %.

Analyse thermogravimétrique (ATG) : Les mesures ATG ont été réalisées à l'aide d'un appareil Netzsch STA 409 PC Luxx. Une petite portion de l'échantillon de mortier ou de pâte de ciment (e = 1 cm) est broyée et tamisée à 160 µm afin d'obtenir environ 50 mg de poudre. Cette poudre est ensuite placée dans un creuset en alumine. Une vitesse de 10 K/min est appliquée pour une montée en température allant de 20 °C à 900°C, sous atmosphère d'azote.

III. RESULTATS

A. Caractérisation des échantillons avant et après dégradation

Afin de mieux comprendre l'effet de la cure sur la dégradation par lixiviation, les microstructures des échantillons ont été caractérisées à l'état sain et dégradé. Les résultats relatifs à la porosité des micro-bétons, déterminée par saturation en eau, sont présentés figure 2. L'échantillon CS présente une porosité accessible à l'eau plus élevée (18,7 %) que l'échantillon CH (16,1 %) après 28 jours de cure. L'échantillon CS n'est pas complètement hydraté et a séché pendant la cure. Les mesures de porosité accessible à l'eau des échantillons prélevés à 210 jours de dégradation (Figure 1) montrent que les porosités totales sont très similaires. Cependant, alors que la porosité de l'échantillon CH n'a pas changé (15,7 %), c'est avant tout l'échantillon CS qui a vu sa porosité diminuer (14,6 %).

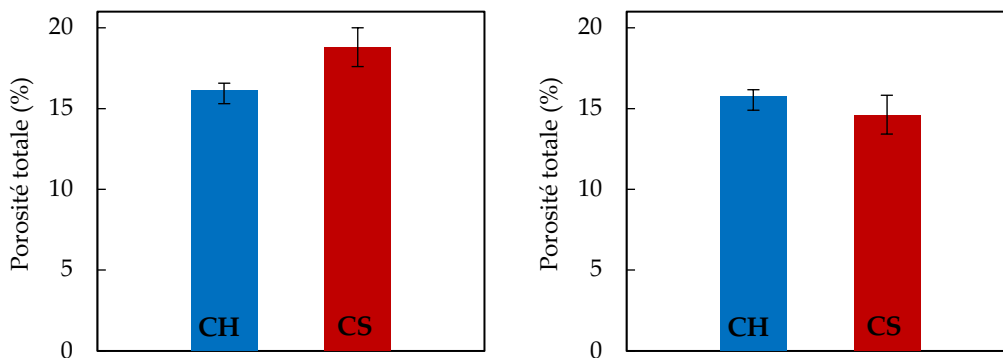


FIGURE 1. Porosité totale des échantillons après 28 jours de cure (gauche) et 210 jours de lixiviation (droite) Des mesures ATG ont été réalisées sur les échantillons de micro-béton après 28 jours de cure et 210 jours de dégradation (Figure 2).

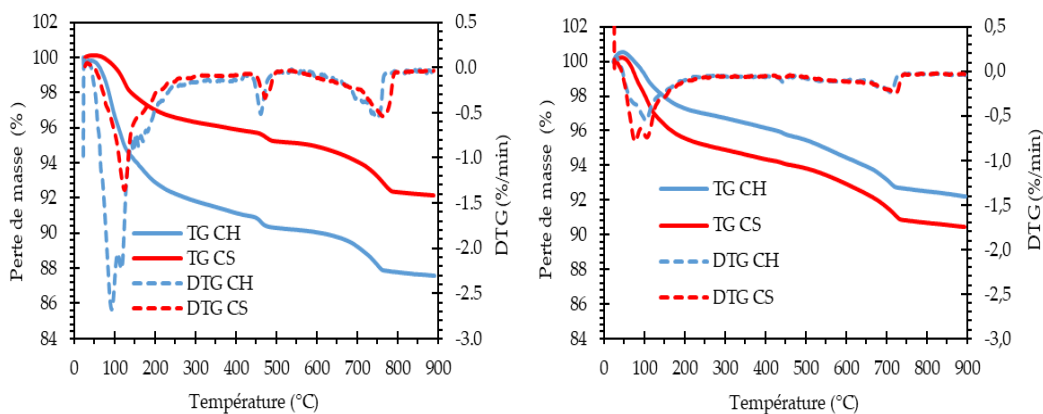


FIGURE 2. Analyse ATG des échantillons de micro-béton après 28 jours de cure (gauche) et 210 jours de lixiviation (droite)

La première perte de masse (avant 200°C), correspondant à la déshydratation des hydrates, est plus importante pour l'échantillon CH que pour l'échantillon CS après cure ; ce résultat peut être facilement expliqué par le processus d'hydratation incomplet de l'échantillon CS. La teneur en eau liée, définie par la perte de masse entre 105 °C et 550 °C, est de 11,3 % pour CS contre 23,3 % pour CH.

La teneur en portlandite dans les échantillons CH et CS est respectivement de 6,2 % et 5,4 %; ces valeurs sont relativement proches l'une de l'autre. La portlandite formée lors de l'hydratation du C₃S est consommée par réaction pouzzolanique avec le laitier et les cendres volantes (Dueramae et al., 2018), conduisant à la formation de C-A-S-H. Ainsi, même si la portlandite se forme dans l'échantillon CH lors de la cure, elle est ensuite consommée, ce qui peut expliquer pourquoi CH ne contient pas significativement plus de portlandite que CS malgré un temps d'hydratation plus long.

Après 210 jours de lixiviation dans l'eau minérale, la perte de masse associée au départ d'eau libre des hydrates pour l'échantillon CS est supérieure à celle de l'échantillon CH, confirmant ainsi que l'échantillon CS s'est bien hydraté au contact de l'eau minérale. Les deux échantillons ont une teneur plus faible en portlandite, cette dernière a été lixiviée. Dans le même temps, la

perte de masse correspondant aux hydrates dans l'échantillon CH a nettement diminué indiquant que pour cet échantillon la lixiviation ne s'est pas limitée à la portlandite.

B. Dégradation macroscopique

Les variations de volume en fonction de la perte de masse (Figure 3) montrent clairement les différences de comportement ainsi que l'influence de la cure. L'échantillon CS présente les plus grandes variations de volume et de masse. La lixiviation provoque une perte de matière au contact de l'eau agressive et, de plus, modifie la surface de l'échantillon. La perte de masse plus importante observée pour l'échantillon CS peut s'expliquer par la plus grande porosité de ces échantillons par rapport à l'échantillon CH (Figure 1). La matrice cimentaire de l'échantillon CS est plus accessible à la solution d'eau minérale agressive et les échanges ioniques avec l'environnement sont facilités (Baldermann et al., 2019; Furat et al., 2021; Rong et al., 2023).

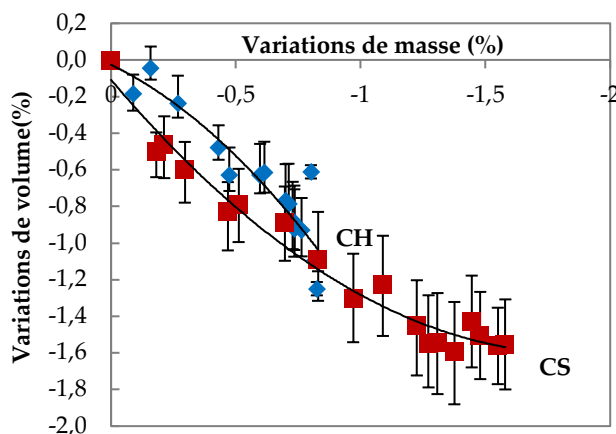


FIGURE 3. Variation de volume des échantillons en fonction de leur variation de masse

Dans tous les échantillons, la réaction pouzzolanique est incomplète après 28 jours de cure (Figure 2), car la portlandite reste présente dans chaque échantillon. Cette portlandite est ensuite détruite à la fois par la lixiviation et par la réaction pouzzolanique, qui se poursuit après 28 jours de cure dans l'eau saturée en chaux (Boudache et al., 2023). Dans le cas de l'échantillon CS, l'hydratation du clinker peut être considérée comme insuffisante pour produire une réaction pouzzolanique. En effet, dans l'essai R3 conçu pour évaluer le caractère pouzzolanique du ciment, les mesures sont effectuées après 7 jours de réaction (Avet et al., 2016) ; de même, dans l'essai EN 196-5, la réaction peut durer jusqu'à 14 jours ("NF EN 196-5 Méthodes d'essai des ciments - Partie 5: Essai de pouzzolanicité des ciments pouzzolaniques," 2015). De ce fait, une fois dans le dispositif de dégradation, la réaction d'hydratation du clinker reprend. La portlandite peut alors être lixiviée avant d'être consommée par la réaction pouzzolanique. Cependant, la porosité de l'échantillon CS a fortement diminué après dégradation (Figure 1). Ce résultat signifie que, bien que plus fort, le mécanisme de lixiviation a affecté l'échantillon CS de la même manière que l'échantillon CH.

La lixiviation est également mise en évidence par les ajouts dosés continus d'acide nitrique. La quantité d'acide ajoutée à chaque échantillon permet d'atteindre le flux d'ions hydroxydes OH⁻ lixiviés (figure 4).

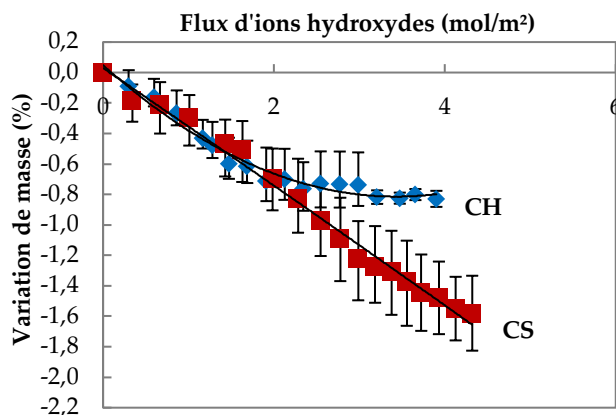


FIGURE 4. Variation de masse des échantillons en fonction du flux d'ions hydroxydes lixiviés

On remarque une relation linéaire entre le flux d'ions hydroxydes et la perte de masse de l'échantillon CS, qui est corrélée à la lixiviation de la portlandite. Dans le cas de l'échantillon CH, la lixiviation se poursuit, mais la perte de masse devient rapidement limitée. On peut donc supposer qu'un phénomène compense la perte de masse associée à la lixiviation de la portlandite. La présence d'ions calcium et carbonate dans l'eau minérale favorise la précipitation du carbonate de calcium (Matteo et al., 2018). À son tour, le carbonate de calcium précipité obstrue la porosité et crée une « barrière de sécurité » protégeant les matériaux cimentaires du contact avec l'eau agressive. Cependant, l'eau minérale utilisée pour cette étude n'est pas considérée comme adaptée à la précipitation du carbonate de calcium en raison de sa faible concentration en ions calcium et de son pH. La lixiviation quasi-complète de la portlandite, comme le soulignent les mesures ATG réalisées sur des échantillons dégradés (Figure 2), pourrait avoir contribué à la concentration en calcium nécessaire à la précipitation du carbonate de calcium. Comme cette précipitation nécessite plus de calcium, elle peut en effet accentuer la lixiviation du calcium non seulement de la portlandite mais aussi d'autres phases calciques telles que les C-(A-)S-H. Dans ce cas, il est difficile de déterminer si la précipitation du carbonate de calcium est suffisante pour colmater la porosité et créer la couche protectrice. Néanmoins, la porosité totale des échantillons a légèrement diminué après dégradation (Figure 1). La précipitation de carbonate de calcium conjointement à la lixiviation de la portlandite et des C-(A-)S-H ont un impact sur la porosité de la zone dégradée, celle-ci n'est pas homogène.

L'évolution de la porosité au cours de la dégradation est visible dans l'évolution de la cinétique de lixiviation des ions hydroxydes (Figure 5).

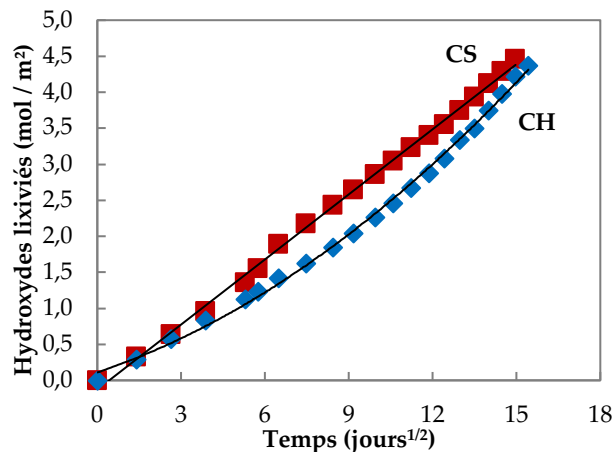


FIGURE 5. Evolution du flux d'ions hydroxydes lixiviés au cours du temps

L'échantillon CS montre une cinétique de lixiviation qui suit une relation linéaire, indiquant ainsi un phénomène contrôlé par la diffusion. L'échantillon CH présente des régimes différents : la cinétique de lixiviation des ions hydroxyde est initialement conforme à un phénomène linéaire avant de changer de régime. Ce changement de régime correspond au moment où la perte de masse de CH se stabilise (90 jours d'essai).

L'hydratation incomplète et, par conséquent, les différents teneurs en hydrates marquent une forte distinction entre l'échantillon CS et l'échantillon CH. La dégradation de CS est principalement causée par la lixiviation de la portlandite. La formation de carbonate de calcium compense la perte de masse due à la lixiviation de la portlandite, étant donné une masse molaire de carbonate de calcium de 100 g/mol tandis que la masse molaire de la portlandite est de 74 g/mol. L'augmentation de la lixiviation des ions hydroxyde (Figures 4 et 5) pour CH peut impliquer que la porosité de l'échantillon n'est pas obstruée par la précipitation de carbonate de calcium.

IV. CONCLUSION

La présente étude a examiné l'effet de deux types de cure sur la dégradation par lixiviation d'échantillons de micro-béton. Pour la première méthode, tous les échantillons ont été immergés dans de l'eau saturée en chaux pendant 28 jours. Pour la deuxième méthode de cure, les échantillons ont été conservés pendant 28 jours dans une pièce à 20°C et 50 % HR. Tous les échantillons ont ensuite été placés dans une cellule contenant de l'eau minérale à un pH contrôlé à 7.

- L'étude de la porosité des échantillons sains a montré que le type de cure amenait des différences significatives. Les échantillons conservés dans l'eau saturée en chaux présentaient plus d'hydrates et une porosité moins importante. Les échantillons séchés à l'air présentaient une porosité plus élevée.
- La méthode de cure a également eu un impact sur la composition minérale des échantillons. Les échantillons séchés à l'air libre contenaient moins d'hydrates. Cependant, tous les échantillons contenaient la même quantité de portlandite.

- Bien que les échantillons présentaient des différences de porosité et de composition minéralogique avant l'essai de lixiviation, toutes ces différences ont été, dans une certaine mesure, supprimées par l'effet de la lixiviation. Après 210 jours passés dans l'eau minérale avec contrôle du pH, tous les échantillons avaient une porosité et une composition minéralogique similaires.
- Le suivi du processus de lixiviation sur les échantillons de micro-béton a montré que la dégradation différait selon le type de cure. Ces différences se limitaient toutefois aux premiers jours de l'essai. Les échantillons conservés dans l'eau pendant 28 jours ont perdu de la masse mais ont rapidement atteint un point de stagnation. Ce processus a pris plus de temps pour les échantillons séchés à l'air.

REFERENCES

Adenot, F., Buil, M., 1992. Modelling of the corrosion of the cement paste by deionized water. *Cement and Concrete Research* 22, 489–496. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(92\)90092-A](https://doi.org/10.1016/0008-8846(92)90092-A)

Avet, F., Snellings, R., Alujas Diaz, A., Ben Haha, M., Scrivener, K., 2016. Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cement and Concrete Research* 85, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.015>

Baldermann, C., Baldermann, A., Furat, O., Krüger, M., Nachtnebel, M., Schroettner, H., Juhart, J., Schmidt, V., Tritthart, J., 2019. Mineralogical and microstructural response of hydrated cement blends to leaching. *Construction and Building Materials* 229, 116902. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116902>

Boudache, S., Loukili, A., Izoret, L., Rozière, E., 2023. Investigating the role played by portlandite and C-A-S-H in the degradation response of pozzolanic and slag cements to external sulphate attack. *Journal of Building Engineering* 67, 106053. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106053>

Cho, S., Jeong, S., Park, J., Bae, S., 2024. Enhanced reactivity and CO₂ mineralization of low-lime calcium silicate cement by incorporating nitric acid as an initial calcium leaching agent. *Journal of CO₂ Utilization* 86, 102913. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102913>

Dueramae, S., Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., 2018. Strength and heat generation of concrete using carbide lime and fly ash as a new cementitious material without Portland cement. *Advanced Powder Technology* 29, 672–681. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.12.007>

Furat, O., Baldermann, A., Baldermann, C., Dietzel, M., Schmidt, V., 2021. Quantitative assessment of microstructural changes of hydrated cement blends due to leaching and carbonation, based on statistical analysis of image data. *Construction and Building Materials* 302, 124370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124370>

Hartwich, P., Vollpracht, A., 2017. Influence of leachate composition on the leaching behaviour of concrete. *Cement and Concrete Research* 100, 423–434. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.07.002>

Hou, W., Liu, J., Liu, Z., He, F., Zhu, J., Cui, Y., Jinyang, W., 2022. Calcium transfer process of cement paste for ettringite formation under different sulfate concentrations. *Construction and Building Materials* 348, 128706. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128706>

Kleib, J., Aouad, G., Benzerzour, M., Zakhour, M., Abriak, N.-E., 2021. Effect of calcium sulfoaluminate cements composition on their durability. *Construction and Building Materials* 307, 124952. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124952>

Langelier, W., 1936. The Analytical Control of Anti-Corrosion Water Treatment. *Journal of American Water Works Association*.

Mainguy, M., Tognazzi, C., Torrenti, J.-M., Adenot, F., 2000. Modelling of leaching in pure cement paste and mortar. *Cement and Concrete Research* 30, 83–90. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00208-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00208-2)

Matteo, E.N., Huet, B., Jové-Colón, C.F., Scherer, G.W., 2018. Experimental and modeling study of calcium carbonate precipitation and its effects on the degradation of oil well cement during carbonated brine exposure. *Cement and Concrete Research* 113, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.016>

NF EN 196-5 Méthodes d'essai des ciments - Partie 5 : Essai de pouzzolanité des ciments pouzzolaniques, 2015.

P18-011 - Définition et classification des environnements chimiquement agressifs- Recommandations pour la formulation des bétons, 2016.

Pavlík, V., 1994. Corrosion of hardened cement paste by acetic and nitric acids part I: Calculation of corrosion depth. *Cement and Concrete Research* 24, 551–562. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90144-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90144-9)

Pouyanne, A., Boudache, S., Hilloulin, B., Loukili, A., Roziere, E., 2024. Experimental Investigation on the Effects of Mineral Water Composition on the Leaching of Cement-Based Materials. *Materials* 17, 1548. <https://doi.org/10.3390/ma17071548>

Rong, H., Zhou, Z., Peng, S., Huang, Y., Liang, J., Yang, X., Shi, J., Feng, Y., 2023. Effect of ultra-fine limestone powder on leaching resistance of cement mortar. *Construction and Building Materials* 368, 130422. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130422>

Schwotzer, M., Scherer, T., Gerdes, A., 2010. Protective or damage promoting effect of calcium carbonate layers on the surface of cement based materials in aqueous environments. *Cement and Concrete Research* 40, 1410–1418. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.05.001>