

La lixiviation correspond à un "lessivage" des hydrates de la pâte de ciment au contact de milieux fluides, acides en comparaison du béton. Christophe Carde, directeur technique du LERM nous en explique les mécanismes.

Connaissances fondamentales

La lixiviation

1 > Qu'est ce que la lixiviation des bétons ?

Le phénomène de lixiviation des bétons correspond dans les grandes lignes à un lessivage des hydrates de la pâte de ciment au contact de milieux fluides. Les constituants hydratés de la pâte de ciment des bétons forment un milieu basique, le pH de leur solution interstitielle étant de l'ordre de 13. Dans ces conditions, la majorité des milieux fluides présente un caractère acide vis-à-vis du béton, entraînant ainsi des déséquilibres chimiques susceptibles d'aboutir notamment à une mise en solution des hydrates. Les milieux, naturels ou pas, pouvant conduire à des phénomènes de lixiviation correspondent aux eaux pures, aux eaux douces, aux pluies acides, et aux milieux plus franchement acides (acides minéraux et organiques, eaux résiduaires). Le pouvoir lixiviant d'un milieu est proportionnel à son acidité vis-à-vis du béton.

Les recherches conduites sur ce sujet au cours des deux dernières décennies concernaient essentiellement la durabilité des bétons constitutifs des conteneurs de déchets radioactifs pouvant, au cours de leur histoire, être soumis au ruissellement des eaux de pluie et d'infiltration.



2 > Quelles sont les mécanismes de la lixiviation ?

La dégradation des bétons par action d'un milieu fluide peut mettre en jeu :

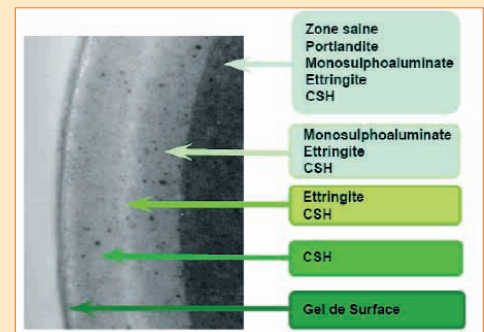
- des phénomènes mécaniques liés à l'action érosive de leur circulation sur le béton,
- des phénomènes physiques permettant le transport des espèces ioniques sous l'effet de gradients de concentration (diffusion) ou de pression (perméation),
- des phénomènes chimiques liés à des variations de concentration engendrant des sursaturations ou des sous saturations conduisant à des dissolutions ou à des précipitations.

Le phénomène de lixiviation ne constitue donc qu'une composante de la dégradation des bétons par les milieux fluides. Il apparaît néanmoins délicat de dissocier de la lixiviation, la précipitation éventuelle de composés potentiellement expansifs, ces derniers constituant souvent une conséquence de la lixiviation.

La lixiviation des bétons sous l'action de milieux fluides à caractère "acide," conduit à une dissolution progressive des constituants de la pâte de ciment. La portlandite $[Ca(OH)_2]$ est préférentiellement mise en solution car, parmi les différents constituants hydratés de la pâte de ciment, c'est elle qui présente la solubilité la plus importante pour des températures ordinaires. Après dissolution de la portlandite, les autres hydrates tels que les aluminates de calcium, le monosulfo-aluminate de calcium hydraté, l'ettringite et les silicates de calcium hydratés (C-S-H) font l'objet, à leur tour, d'une dissolution progressive. Ceci entraîne la formation de zones à minéralogie constante délimitées par des fronts de dissolution (fig. 2 et 3).

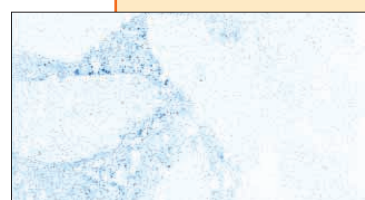
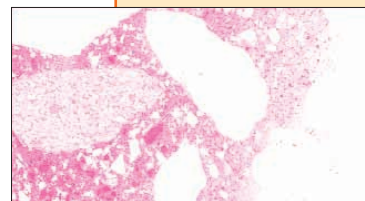
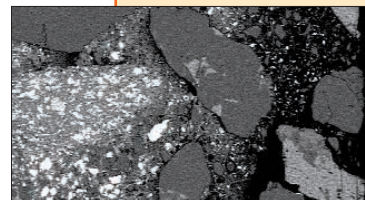
Comme déjà précisé, il apparaît délicat de dissocier de la lixiviation, la précipitation de composés potentiellement expansifs. Par exemple, dans le cas d'une lixiviation de la pâte de ciment par une eau faiblement minéralisée, la dissolution du monosulfo-aluminate de calcium hydraté et de l'ettringite permet de remobiliser des sulfates susceptibles de précipiter sous forme expansive, plus à cœur du matériau. De la même façon, l'attaque d'un béton par de l'acide sulfurique conduit à une lixiviation des constituants de la pâte de ciment et à la formation de composés sulfatiques expansifs. Pour un même béton et un même ciment, la cinétique de dégradation par les phénomènes de lixiviation peut être extrêmement variable en fonction de la nature du milieu fluide considéré, et en particulier du pH (la cinétique étant d'autant plus rapide que le pH est faible). Cette cinétique, gouvernée par des lois de diffusion, évolue en racine carrée du temps. Par ailleurs, dans le cas des eaux naturelles, l'agressivité est dépendante de la dureté et de la teneur en dioxyde de carbone agressif.

Bien que les cinétiques de dégradation puissent être rapides dans le cas d'attaques acides ou par des solutions salines souvent associées à l'usage intensif d'engrais (nitrate d'ammonium par exemple), la cinétique d'attaque des bétons par les eaux naturelles (eaux pures ou eaux douces) reste en comparaison très faible. A titre indicatif, des essais réalisés en laboratoire avec un maintien constant du pH montrent que la cinétique de dégradation avec une eau à pH 4,5 est 100 fois plus lente que celle obtenue avec une solution d'ammonium fortement concentrée.



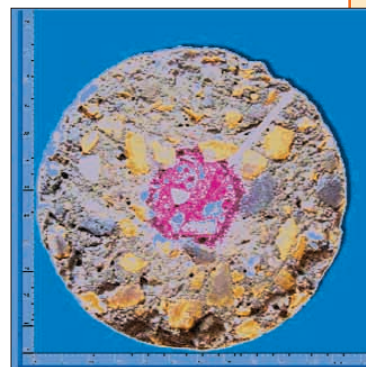
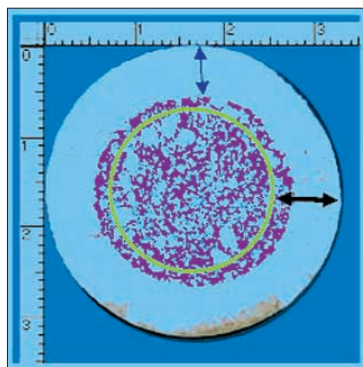
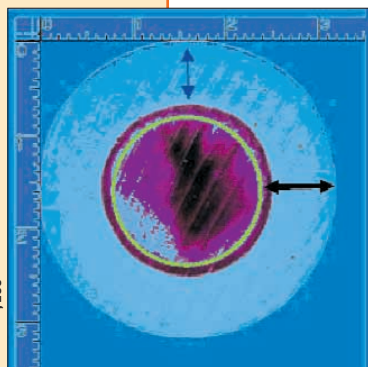
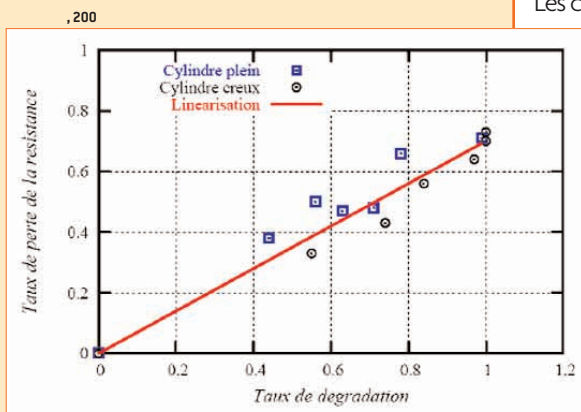
2

3



3 > Quelles sont les conséquences de la lixiviation ?

Les conséquences de l'attaque des bétons par des eaux pures, des eaux douces ou des solutions acides, peut conduire à une augmentation de la porosité due à la lixiviation des hydrates de la pâte de ciment, éventuellement associée au développement d'une microfissuration en relation, le cas échéant, avec la formation de composés expansifs tels que l'ettringite secondaire par exemple. Cette modification de la microstructure des bétons entraîne donc une modification des performances mécaniques dans la zone d'interaction entre le milieu agressif et le béton, par rapport aux caractéristiques d'origine du matériau : diminution des résistances à la compression et à la traction, diminution du module de Young, augmentation du fluage. A titre d'exemple, des essais réalisés en laboratoire sur des pâtes de ciment, des mortiers ou des bétons, au cours de différents travaux de doctorat, montrent, pour des mélanges à base de ciment de type CEM I, des pertes de résistances à la compression de l'ordre de 70 à 80 % (fig. 4 et 5), associées à une diminution du module de Young de l'ordre de 60 à 70 % et à une augmentation de la porosité d'environ 50 % en relatif. Dans le cas de mélanges à base de ciments renfermant des additions minérales, la diminution des performances mécaniques et l'augmentation de la porosité, bien que significatives, sont plus limitées. Cette différence met en évidence l'importance de la quantité de portlandite dans le matériau, cette dernière correspondant à l'hydrate le plus soluble dont la lixiviation crée une porosité de dimension plus importante que celle liée à la décalcification des C-S-H.

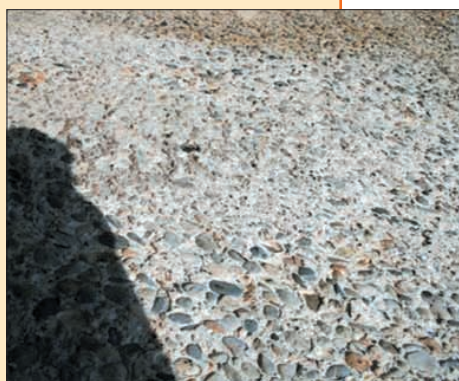


4 > Comment limiter les phénomènes de lixiviation dans les bétons ?

La résistance des bétons vis-à-vis des attaques par les eaux pures, les eaux douces ou les solutions acides peut être optimisée en suivant les règles de formulation définies par la norme NF EN 206-1, en considérant les classes d'exposition XA1, XA2 et XA3 définissant les environnements chimiquement agressifs sur la base de critères tels que le pH, les teneurs en sulfates, en dioxyde de carbone agressif, en ammonium et en magnésium. Par ailleurs, l'utilisation de ciments renfermant des teneurs significatives en additions minérales, tels que les CEM III ou CEM V, permet d'accroître la résistance chimique des bétons, car leur hydratation forme peu de portlandite. Enfin, dans le cas des environnements chimiques les plus sévères, la mise en œuvre d'un revêtement de surface étanche permet également de préserver l'intégrité du béton.

5 > Que faire lorsque les phénomènes de lixiviation sont avérés ?

En premier lieu, les bétons suspectés d'être affectés par une attaque chimique conduisant à des phénomènes de lixiviation éventuellement associés à la précipitation de composés expansifs, doivent faire l'objet d'un diagnostic par un laboratoire spécialisé. Ce diagnostic doit entre autres permettre de préciser les réactions chimiques mises en jeu et les profondeurs d'altération des bétons. A partir de ce diagnostic, et dans la mesure où ces altérations progressent de la surface des parements vers le cœur des pièces en béton, les ouvrages peuvent être réparés de façon traditionnelle par purge du béton altéré, mise en œuvre d'un produit de réparation adapté, éventuellement complété par une protection de surface.



Christophe Carde
Directeur technique du LERM¹
Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux

¹En tant que laboratoire conseil indépendant spécialisé dans la caractérisation des matériaux de construction et de leurs pathologies, le LERM (Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux) est chaque jour confronté à l'étude des problématiques liées aux bétons. Les phénomènes de lixiviation font partie des pathologies étudiées et maîtrisées par le laboratoire.