

Le comportement des bétons au contact de l'eau.

N. Tenoutasse

Professeur honoraire à l'U.L.B.

Résumé

Les ciments génèrent, lors de l'hydratation, des silicates de calcium hydratés responsables des performances mécaniques des bétons.

Les liants hydrauliques produisent également d'autres composés tels que l'hydroxyde de calcium, ce produit étant utile pour protéger les armatures contre la corrosion.

La solubilité de Ca(OH)_2 est environ 20 m mol/l à 20°C. L'eau dissout Ca(OH)_2 du béton, dans certains cas elle peut même décomposer les hydrosilicates de calcium (CSH) et provoquer ainsi des désordres importants.

On sait par ailleurs que l'eau transporte souvent des éléments agressifs (SO_4^{--} , Cl^- , H^+ , etc.) qui entravent la durabilité des bétons.

Dans notre exposé, nous essayons de présenter les mécanismes selon lesquels les eaux (surtout les eaux pures) attaquent le béton. Nous traiterons surtout des pathologies chimiques à l'exclusion des dégâts provoqués par gel/dégel. Les solubilités de sels de calcium : carbonate, sulfate, hydroxyde seront examinées en tenant compte des propriétés (la composition chimique) des eaux. Enfin nous présenterons les moyens de protéger les bétons par les désordres provoqués par l'eau en se référant aux réservoirs d'eau potable.

Abstract

During hydration, cements generate the hydrated calcium silicates which are responsible for the mechanical performance of concretes.

The hydraulic binders also produce other compounds such as calcium hydroxide, which product is useful in protecting reinforcement against corrosion.

The solubility of Ca(OH)_2 is around 20 m mol/L at 20°C. Water dissolves Ca(OH)_2 in concrete, and in some cases can even break down the calcium hydrosilicates (CSH), thus causing severe problems.

We also know that water often carries aggressive substances (SO_4^{--} , Cl^- , H^+ , etc.) which adversely affect the durability of concretes.

In our paper, we shall try to present the mechanisms by which water (in particular pure water) attacks concrete. We shall primarily address chemical pathologies, to the exclusion of damage caused

by frost/thaw. The solubility of calcium salts: carbonate, sulphate and hydroxide, will be examined in the light of the characteristics (chemical composition) of the water. Finally, we shall present the ways of protecting concretes from water-related damage with reference to drinking water tanks.

Zusammenfassung

Bei der Hydratation bilden Zemente hydratisierte Kalziumsilikate, die für die mechanischen Eigenschaften von Beton ausschlaggebend sind.

Hydraulische Bindemittel erzeugen auch andere Verbindungen wie Kalziumhydroxid, das nützlich ist, um Armierungen vor Korrosion zu schützen.

Die Löslichkeit von Ca(OH)_2 beträgt etwa 20 mmol/l bei 20 °C. Das Wasser löst das Ca(OH)_2 im Beton. In manchen Fällen kann es sogar die Kalziumhydroxysilikate (CSH) zersetzen und so beträchtliche Schäden verursachen.

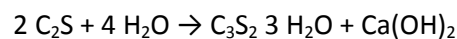
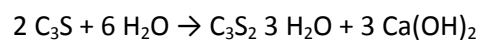
Wir wissen übrigens, dass Wasser oftmals aggressive Stoffe (SO_4^{2-} , Cl^- , H^+ usw.) mitführt, die die Haltbarkeit von Beton beeinträchtigen.

In unserem Referat versuchen wir, die Mechanismen vorzustellen, durch die Wasser (vor allem Trinkwasser) Beton angreift. Wir behandeln vor allem chemische Ursachen, nicht aber Frost- und Tauschäden. Die Löslichkeit von Kalziumsalzen (Karbonat, Sulfat, Hydroxid) werden unter Berücksichtigung der Eigenschaften des Wassers – seiner chemischen Zusammensetzung – untersucht. Schließlich stellen wir Schutzmaßnahmen für Beton vor Wasserschäden vor und gehen dabei insbesondere auf Trinkwasserspeicher ein.

Introduction

Les liants hydrauliques (ciments portland, ainsi que d'autres liants contenant du clinker portland) contiennent des teneurs plus ou moins importantes de CaO. En effet, les ciments portland (les CEMI) ont environ 65% de CaO et des teneurs en oxydes alcalins qui varient de 1 à 2%. Il est dès lors logique qu'en gâchant le ciment avec de l'eau, on obtient un pH fortement alcalin (12 à 13).

En règle générale, les bétons et mortiers conservent leur caractère alcalin très longtemps. La carbonatation diminue, en tout cas à la surface du béton, mais le pH reste malgré tout supérieur à 7. Les silicates de calcium C_3S et C_2S génèrent des quantités importantes d'hydroxyde de calcium. Le ciment portland complètement hydraté libère $\pm 20\%$ de $Ca(OH)_2$.



Les silicates de calcium hydratés (CSH) sont responsables des performances mécaniques des matériaux à base de ciments. L'hydroxyde de calcium ne joue pas de rôle important dans les résistances mécaniques ; dans les bétons armés ils protègent les armatures contre la corrosion (phénomène de passivation).

D'après ce qui précède, on peut conclure que les matériaux à base de liants hydrauliques ont une durabilité excellente en milieu alcalin, contrairement à ce qui se passe en présence d'acides. En principe, les acides attaquent les composants hydratés des ciments particulièrement l'hydroxyde de calcium.

L'eau et les bétons

L'eau peut attaquer les matériaux à base de ciments selon différents mécanismes :

- Dissolution de certains composés en particulier $Ca(OH)_2$
- En transportant des ions agressifs ; H^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{++} , etc.
- En participant dans la formation des sels expansifs
- En provoquant le phénomène gel/dégel

Lixiviation des bétons

À 20°C, l'eau dissout 22 mmol de CaO (1,23 g/l) ; cette solubilité augmente légèrement avec l'abaissement de la température et diminue avec l'élévation de la température. On sait que la composition chimique de l'eau joue un rôle majeur dans la lixiviation de bétons. Les eaux pures (eaux dessalées, eaux de pluies, etc.) sont beaucoup plus dangereuses que les eaux dures. En dissolvant certains composants des ciments hydratés, l'eau entrave la durabilité du béton. Cette attaque conduit également à modifier la composition chimique des éléments dissouts dans l'eau.

Les organismes responsables de la sécurité alimentaire ont élaborés des Directives afin de contrôler le largage trop important des éléments du béton dans l'eau potable. C. Ployaert, ingénieur au FEBELCEM, a résumé dans un document en 2006 le comportement de certains bétons belges soumis à la lixiviation. La procédure choisie était conforme à la norme hollandaise (NEN7345). Cette méthode consiste à lixivier des échantillons de béton dans une « eau modifiée » ; aux échéances allant de 6

heures à 64 jours, on procède à l'analyse des éléments lixiviés. Il s'agit en fait d'un test accéléré pour vérifier la conformité avec la Directive européenne (98/83/CE – Qualité des eaux destinées à la consommation humaine). Selon les stipulations de la Directive CE dans le liquide simulateur des dernières 24 heures de lixiviation, les concentrations des éléments ne doivent pas dépasser les valeurs suivantes :

aluminium	100,0 µg/l	mercure	0,5 µg/l
antimoine	2,5 µg/l	nickel	10,0 µg/l
arsenic	5,0 µg/l	plomb	5,0 µg/l
cadmium	2,5 µg/l	sélénium	5,0 µg/l
calcium	270,0 mg/l	sulfate	250,0 mg/l
chrome	25 µg/l	TOC	1,0 mg/l
cuivre	100,0 µg/l	zinc	100,0 µg/l
magnésium	50,0 mg/l		

On voit dans le tableau ci-dessus que les teneurs acceptables pour les ions calcium et sulfate sont relativement élevées tout en étant inférieures à la solubilité de ces ions. On peut se demander quel serait l'état d'un béton après plusieurs années de lixiviation. En effet, les tests de lixiviation selon la norme hollandaise durent seulement 64 jours et on s'intéresse surtout aux changements subis par le liquide simulateur.

La durabilité du béton vis-à-vis de l'eau dépend également de la qualité du béton :

- Teneur en ciment
- Rapport E/C
- Porosité
- Perméabilité
- Squelette granulaire
- Etc.

Décomposition des hydrates

L'hydratation des ciments produit des hydrates : les CSH, les aluminates de calcium hydratés, les sulfoaluminates de calcium hydratés, les aluminoferrites de calcium hydratés, etc. (sans oublier l'hydroxyde de calcium).

Comme nous l'avons vu plus haut, l'eau commence à dissoudre l'hydroxyde de calcium en premier lieu mais elle décompose également les CSH en libérant de la silice amorphe et Ca(OH)_2 qui sera dissoute à son tour.

La désintégration des hydrates, surtout celles des CSH, provoquent des désordres profonds dans le béton. C'est désordres conduisent parfois à la destruction totale des ouvrages.

Transport des ions agressifs

Le rôle de l'eau dans le transport des ions agressifs pour les bétons est essentiel ; les gaz comme CO_2 , SO_2 et NO_x n'attaquent pas le béton à sec. L'action de CO_2 dans l'eau nous est bien connue, on a souvent la formation de CaCO_3 insoluble et ensuite celle du $\text{Ca(HCO}_3)_2$ soluble. C'est également le cas de H_2S véhiculé par les eaux résiduelles et sa biotransformation en H_2SO_4 . Cet acide est assez

dangereux pour le béton en formant d'abord le sulfate de calcium qui peut générer à son tour un sel expansif « l'étringite » provoquant dans certains cas la destruction sulfatique des ouvrages.

Formation de sels expansifs

La réaction alcali granula est bien connue des spécialistes en chimie des ciments ; la formation des silicates alcalins et surtout leurs expansions est conditionnée par la disponibilité de l'eau. Il en va de même pour l'étringite, étant donné que ce produit contient 32 molécules d'eau de cristallisation. On peut dire que le phénomène expansif est presque toujours dû à la formation des produits ayant des volumes moléculaires élevés causés par un nombre important de molécules d'eaux de cristallisation.

Étude d'un cas de réparation de béton dégradé par l'eau

Nous avons exposés l'an dernier à Brugge les difficultés que l'on a rencontrées pour réparer le béton dégradé d'un réservoir d'eau potable en Belgique. Le béton du réservoir en question représente un cas typique de désordre provoqué par l'eau potable.

Après avoir envisagé différentes solutions, sur base d'essais préliminaires, on a choisi l'application d'une couche de polymère ciment afin de stopper les dégâts du béton. Malheureusement, après quelques mois, on a observé la formation abondante de cloques à la surface du béton. Nous avons entrepris une étude systématique pour comprendre les causes d'apparition de ces cloques. Les diapositives dont certaines ont été présentées à Brugge résument nos observations.

L'ensemble de nos résultats permet de conclure que les cloques sont dues à une pression osmotique aggravée par la formation de l'étringite après l'application de la couche polymère ciment.

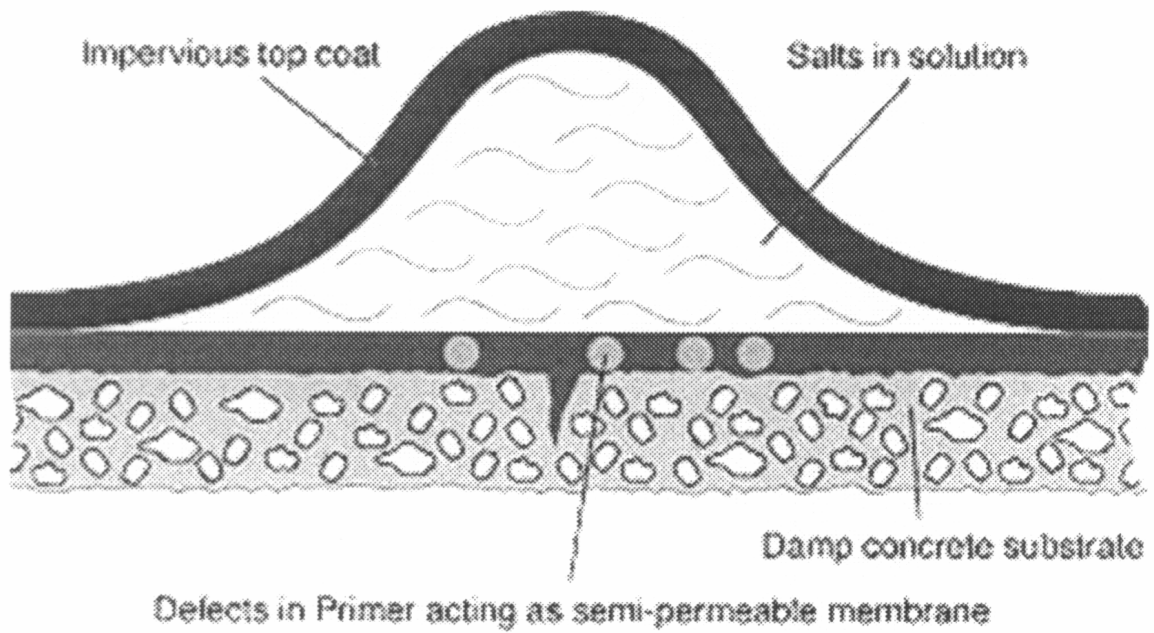
Il nous semble que la pression osmotique est créée par la concentration des sels solubles du ciment utilisé pour préparer la surface du béton. Par ailleurs, cette couche présentait des fragilités dues à la granulosité du sable utilisé. De plus, le fournisseur du polymère ciment a utilisé un ciment riche en C_3A vulnérable aux attaques sulfatiques.

La protection superficielle du béton par un enduit polymère ciment est un procédé intéressant à condition que l'on prenne de précautions adéquates dans le choix de matériaux, la préparation de la surface du béton et surtout l'application du polymère ciment.

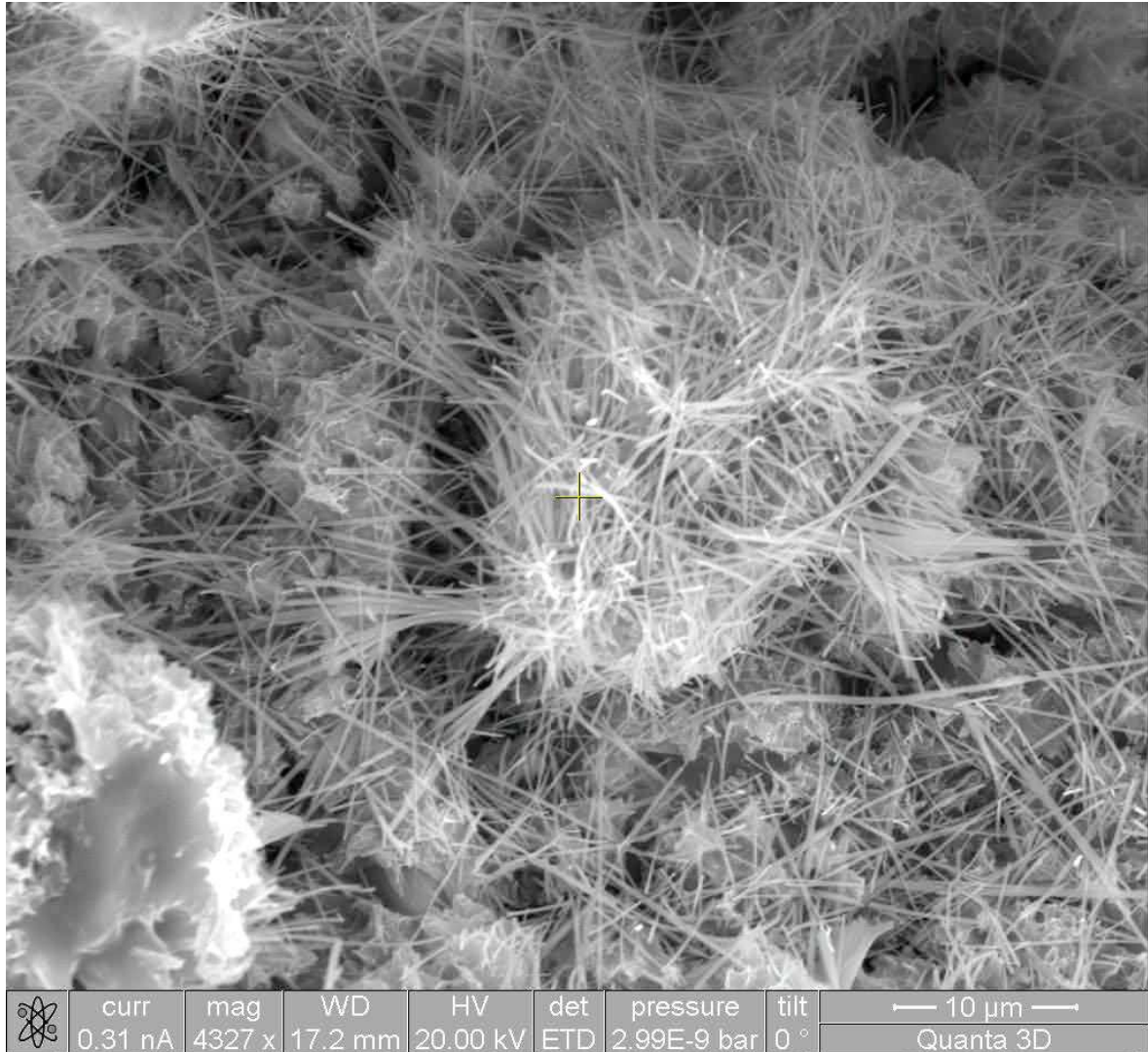
Surface de béton traité présentant des cloques



Formation des cloques par la pression osmotique



Les aiguilles d'étringite dans la partie interne des cloques



Contrôle par EDAX de la composition des hydrates

