Zeitschrift: Bulletin du ciment

Herausgeber: Service de Recherches et Conseils Techniques de l'Industrie Suisse du Ciment (TFB AG)

Band: 54-55 (1986-1987)

Heft: 17

Artikel: Béton sous l'eau : autoprotection ou désagrégation de la structure?

Autor: Koelliker, Emil

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-146155

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

BULLETIN DU CIMENT

Mai 1987 55e année Numéro 17

Béton sous l'eau: Autoprotection ou désagrégation de la structure?

Hydratation/Hydrolyse. Formation d'une couche protectrice. Phénomènes de diffusion. Durabilité et vulnérabilité de l'autoprotection.

Le ciment – une chance de la technique

Le ciment Portland découvert au cours de la première moitié du 19e siècle est aujourd'hui, de loin, le plus utilisé des liants hydrauliques. Or cette découverte aurait été sans lendemain si elle n'avait été gratifiée d'une chance particulière. Chacun sait qu'en présence de l'eau les liants hydrauliques durcissent et restent durs dans l'eau. Mais peu nombreux sont ceux qui savent que cela ne va pas du tout de soi et que c'est vraiment un coup de chance si le ciment durci se conserve dans l'eau. On se propose d'expliquer ici pourquoi il en est ainsi et quelles sont les exceptions à cette règle.

Les réactions chimiques entre le ciment et l'eau

Le ciment réagit avec l'eau en formant un hydrate solide, la pierre de ciment ou pâte de ciment durcie. Cette étape est appelée «hydratation». Parfaitement valable techniquement, elle est la base de la technologie du béton. Ceci repose sur le fait qu'en cas normal, les réactions s'arrêtent ici. Mais dans certains cas spéciaux, il se produit encore des phénomènes désignés par «hydrolyse» qui peuvent entraîner la destruction du ciment durci. Cette dégradation par l'eau est connue sous le nom de «lessivage». La figure 1 représente les réactions chimiques en cause dans ces actions de l'eau.

Etape I: Prise et durcissement

$$\text{CP} + \text{Eau} \xrightarrow{\text{Hydratation}} \underset{\text{(solide)}}{\text{CP hydraté}} + \underset{\text{(dissous + solide)}}{\text{Hydroxide de chaux}}$$

Etape II: Lessivage de la pâte de ciment

$$\begin{matrix}\text{CP hydraté} \\ + \\ \text{Eau}\end{matrix} \xrightarrow{\text{Hydrolyse}} \left\{\begin{matrix}\text{Silice} \\ \text{Alumine} \\ \text{Oxide de fer}\end{matrix}\right\} + \text{Hydroxide de chaux}$$

(gélatineux) (dissous)

Fig. 1 Réactions du ciment Portland (étape I) et du ciment Portland hydraté (étape II) avec l'eau.

Les considérations qui suivent concernent la question de savoir pourquoi cette désagrégation fâcheuse du béton ne se produit que rarement, en fait si rarement même que le béton est considéré comme étant le matériau par excellence pour les travaux hydrauliques.

Le béton se protège lui-même contre l'eau

Nous savons beaucoup de choses sur les phénomènes de prise et de durcissement et sur les propriétés de la pâte de ciment durcie. Mais à ce jour, il existe très peu d'informations exactes permettant d'évaluer – selon le schéma de l'étape II de la figure 1 – les dégâts que peut causer l'eau normale (dite «non agressive») dans la pâte de ciment durcie, ni même de savoir si vraiment elle y cause des dégâts. Ce qui est sûr, c'est que s'il y a attaque, elle est extrêmement faible.

Comme exemple, on peut citer une usine de pompage d'eau potable en Suisse romande vieille de plus de 100 ans. La figure 2 montre la surface de la chambre des pompes qui a été pourvue d'un enduit de mortier en 1886. De récents examens ont montré qu'il ne s'y est produit aucune attaque qui aurait pu conduire à une dégradation de la pâte de ciment.

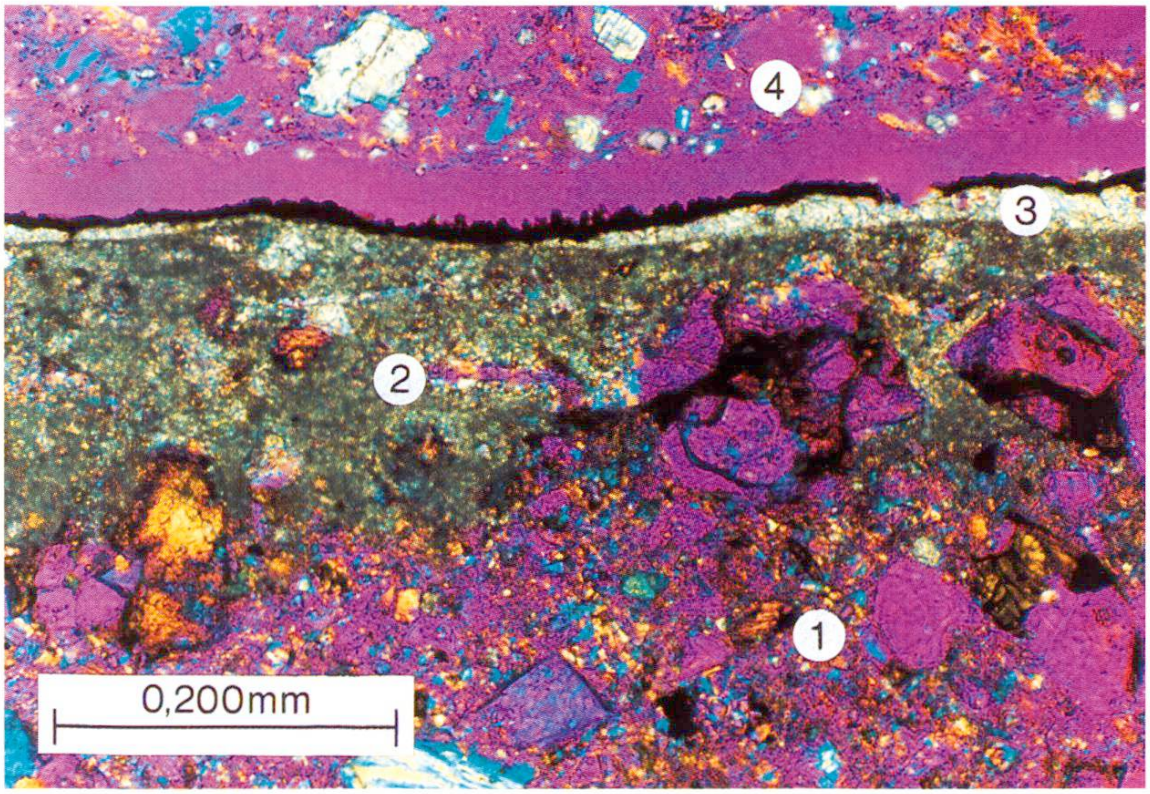

Fig. 2 Coupe mince dans une couche de mortier qui a été exposée à l'eau courante pendant 100 ans (vu au microscope). ① Texture d'origine du mortier. ② Dépôt de calcite dans la masse du mortier ($CaCO_3$ «secondaire»). ③ Couche protectrice en calcite ($CaCO_3$ «primaire»), avec dépôts. ④ Restes du plâtre d'enrobage appliqué pour la préparation de la coupe mince, à la place où circulait l'eau courante.

Mais une telle désagrégation prévue par la théorie (étape II fig. 1) peut toutefois se produire parfois, au grand dam de tous les intéressés. Il peut arriver qu'un béton soit complètement détruit et qu'il n'en reste qu'une boue de chaux, de silice ainsi que d'hydroxides de fer et d'aluminium. Il en résulte que les eaux deviennent troubles, qu'elles sont polluées en raison de la réaction alcaline (pH > 9) et peuvent boucher les canalisations. Ces phénomènes représentés à la figure 1 peuvent s'expliquer quantitativement par des équilibres chimiques. Mais si on est ainsi renseigné sur ce qui peut se produire, on ne sait encore rien sur la vitesse à laquelle les phénomènes se déroulent. Il y a en effet encore la possibilité que les réactions soient freinées ou même totalement arrêtées.

On dispose de tableaux permettant d'évaluer les effets de l'eau sur le béton [1]. Les eaux ayant un pH supérieur à 6,5 y sont considérées comme «non agressives». Cependant, il y a encore des cas où de telles eaux attaquent le béton. Les études poursuivies par le TFB au cours des dernières années permettent d'expliquer ce comportement du béton qui paraît incompréhensible au premier abord [2, 3]. On a ainsi trouvé que, contrairement aux indications des tableaux, la vitesse de l'hydrolyse (étape II, fig. 1) ne dépend que peu du pH et peut même être encore élevée pour un pH de 11.

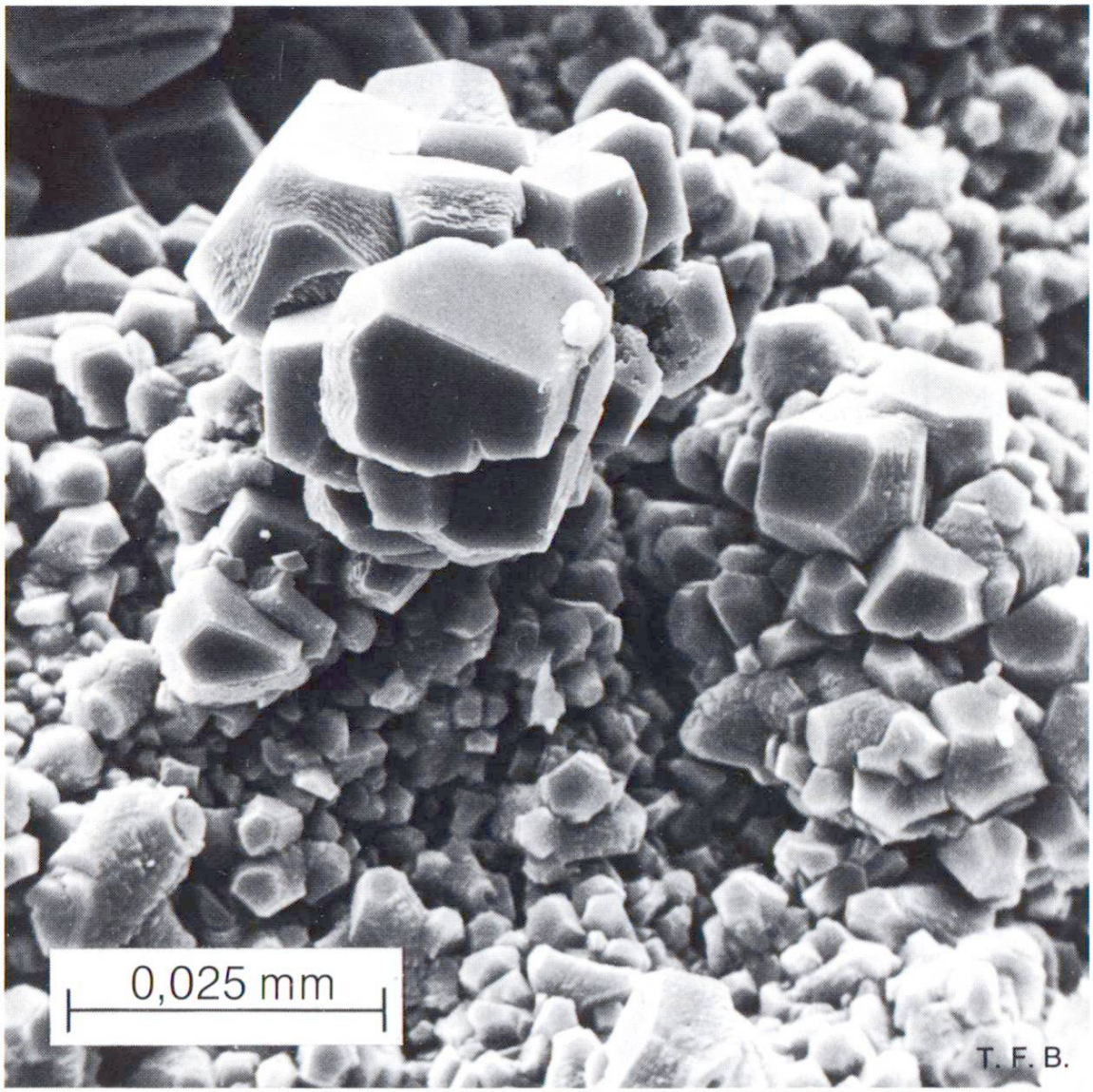

Fig. 3 Couche protectrice en calcite sur un échantillon de mortier exposé à l'eau (photo MEB).

Mais on a constaté aussi que les réactions liées à l'hydrolyse peuvent être efficacement enrayées par une «couche protectrice» qui se forme naturellement à la surface du béton plongé dans l'eau. Il s'agit notamment de calcite (voir équation 1 et fig. 3) formant une couche dont l'épaisseur est d'env. 10 μm.

$$Ca(OH)_2 + Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 2\,CaCO_3 + 2\,H_2O \quad (1)$$

Hydroxide de calcium	bicarbonate de calcium		Calcite (carbonate de calcium)	eau

Ces phénomènes ne doivent pas être confondus avec la carbonatation du béton qui se produit sur les surfaces exposées à l'air par la

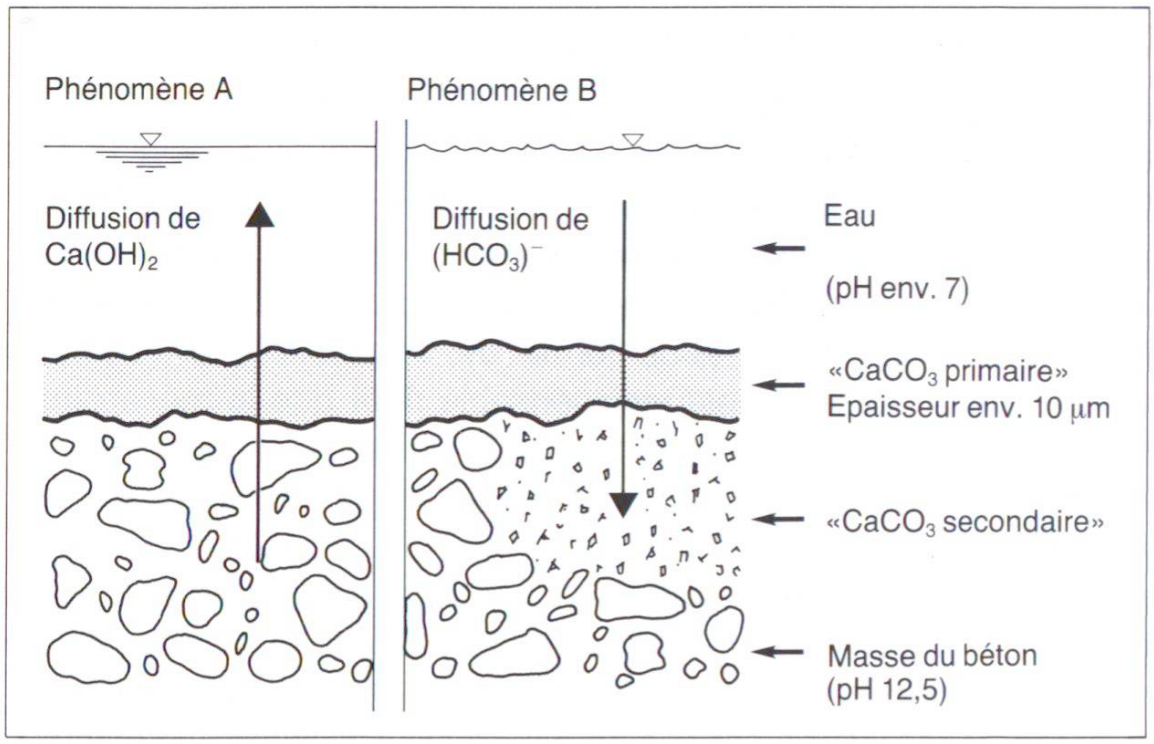

Fig. 4 Phénomènes de diffusion entre l'eau et le béton. Phénomène A: dans l'eau stagnante et pure. Phénomène B: dans l'eau courante.

réaction de l'hydroxide de calcium avec l'acide carbonique de l'air. Cette couche protectrice sous l'eau n'est vraiment pas épaisse et elle comporte des pores, ce qui permet de comprendre le comportement du béton dans l'eau. On peut distinguer deux phénomènes de diffusion qui sont représentés àla figure 4.

Différences entre eau immobile et eau courante

Dans l'eau pure et immobile, l'hydroxide de calcium du béton se dissout, exactement comme il le serait dans un acide. En raison de la diffusion du Ca $(OH)_2$, l'eau immobile devient alcaline (voir phénomène A de la figure 4). Son pH atteint progressivement 12,5 (équilibre) et elle cesse d'attaquer le béton. Cette eau peut fixer de l'acide carbonique de l'air (CO_2), ce qui produit, p. ex., un dépôt de boue calcaire au fond des réservoirs d'eau en béton, ou les colorations très nettes des surfaces de béton sous forme de trainées blanches.
Dans l'eau courante, c'est la calcification du béton qui est prépondérante (voir phénomène B de la figure 4). Quand l'acide carbonique CO_2 de l'air est dissous par l'eau, ou s'il s'agit d'eau dure, il se forme des ions de bicarbonate $(HCO_3)^-$ qui, par les pores de la pellicule de calcite, pénètrent dans la masse de béton où ils déposent de la «calcite secondaire». Ce phénomène produit aussi une augmentation de l'étanchéité de la couche de calcite et il se poursuit jusqu'à ce que le béton soit complètement «fermé».

6 Durabilité de l'autoprotection

Le béton protégé par une couche de calcite est-il absolument résistant à l'eau? Pour répondre, il faut tenir compte de la solubilité de la chaux ou de la calcite dans l'eau. Bien qu'elle soit très faible (env. 5,6 mg/l) cette solubilité ne peut être négligée. Il est vrai que l'eau potable normale est souvent de l'eau dure qui contient sensiblement plus de chaux sous forme de bicarbonate de calcium soluble. Cette présence est indispensable pour que le mécanisme d'étanchement puisse fonctionner. La solubilité de cette combinaison de chaux dépend de la teneur en CO_2, raison pour laquelle on parle d'équilibre chaux – acide carbonique de l'eau. Dans les eaux naturelles, en grande majorité, on constate cet équilibre, c.-à-d. qu'elles ne peuvent pas dissoudre davantage de chaux. Ainsi, malgré la possibilité théorique de réaction de l'étape II de la figure 1, un béton pourvu d'une couche de calcite est absolument inattaquable par une telle eau, d'après tout ce que l'on sait aujourd'hui et comme le prouve l'état de l'échantillon vieux de 100 ans de la figure 2.

Suppression de l'autoprotection par l'action d'eau agressive

Si l'eau contient un excédent d'acide carbonique, elle peut dissoudre davantage de chaux: la calcite de la couche protectrice est alors dissoute et le béton peut être attaqué comme il le serait par un acide. Le pouvoir de l'eau de dissoudre la chaux est caractérisé par l'«indice de saturation en chaux» [4]. L'eau capable de dissoudre de la chaux est agressive à l'égard du béton.

Suppression de l'autoprotection par lessivage

Si nous pouvons expliquer la stabilité du béton en présence d'eau, il reste toutefois à étudier le mécanisme du lessivage qui peut entraîner une destruction complète comme on l'a vu plus haut. Et cela peut se produire même si l'eau n'est pas considérée comme agressive à l'égard du béton.
Pour que le mécanisme d'autoétanchement décrit ci-dessus puisse fonctionner, il faut que la couche protectrice de calcite soit perméable. Mais si le béton lui-même est perméable et si l'eau peut y pénétrer, l'étanchement ne peut plus se produire. Il est probable que le dépôt de cristaux de calcite est alors retardé et qu'au lieu de se former directement sous la couche protectrice il ne se produit que plus profondément dans le béton. De la chaux est précipitée de nouveau sous forme de calcite par l'hydroxide de calcium fortement alcalin selon équation (1) et le pH de l'eau augmente (fig. 5).

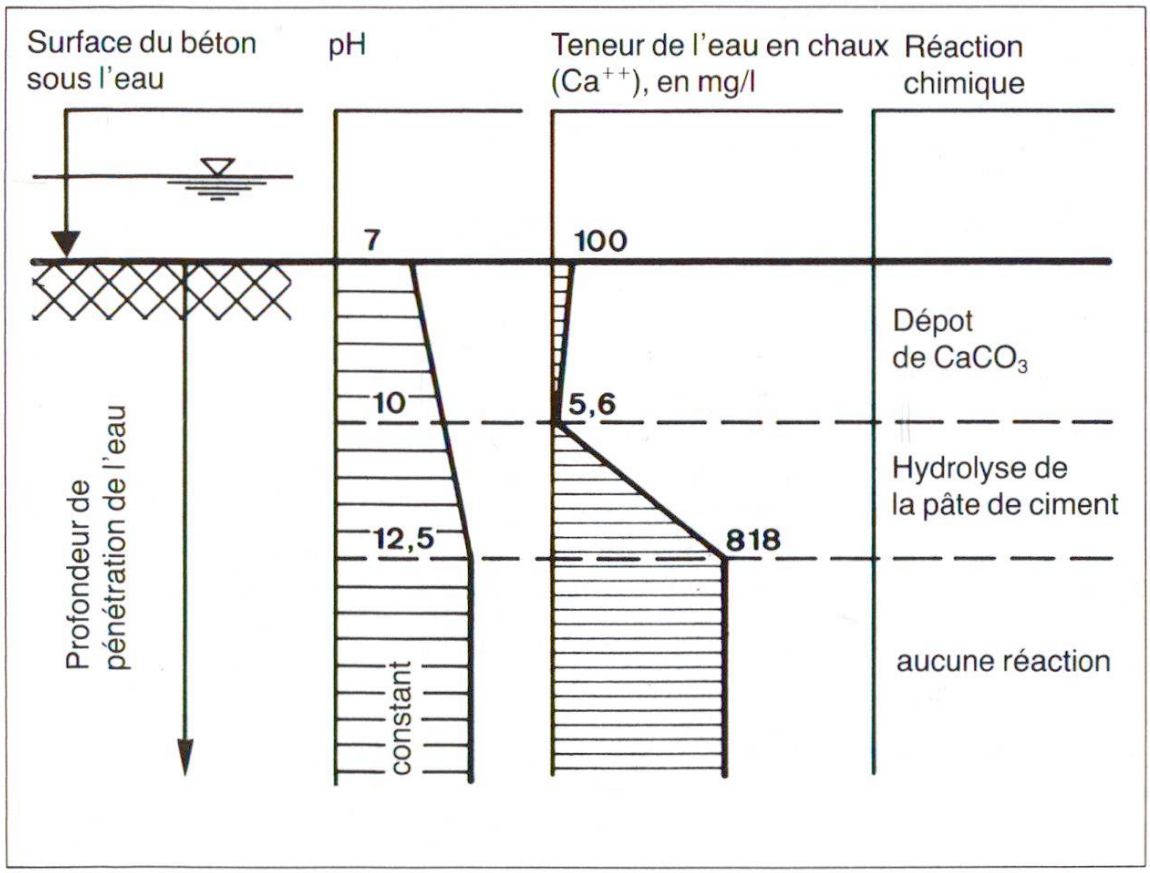

Fig. 5 Suppression de l'autoprotection du béton par lessivage (représentation schématique). Sa teneur en chaux se modifie quand l'eau pénètre dans le béton. C'est ce qui détermine les deux zones «Dépôt de chaux» et «Hydrolyse».

Pour un pH de 10 tel qu'il s'établit quand le carbonate de calcium se dissout dans de l'eau pure, tout le bicarbonate est fixé. Si l'eau se charge de davantage d'hydroxide de calcium, son pH augmente mais il ne se produit plus de dépôt de chaux. La figure 5 montre que la capacité de l'eau de dissoudre du calcium est beaucoup plus grande dans la zone alcaline que dans la zone neutre. Cela signifie tout simplement qu'une telle eau est vraiment agressive à l'égard du béton, d'autant plus que, dès lors, il ne peut plus se former de couche protectrice en carbonate. La dissolution se poursuit jusqu'à ce que le pH atteigne environ 12,5, c.-à-d. la valeur qu'il a dans le lait de ciment ou la pâte de ciment. Si l'eau continue à pénétrer dans le béton, il ne se produit plus de dépôt ni de dissolution. Mais il faut être bien conscient du fait que la zone de dépôt de chaux et celle de dissolution d'hydroxide de calcium et du ciment hydraté avancent à l'intérieur du béton. Ainsi la destruction se poursuit jusqu'à ce qu'il ne reste qu'une boue de chaux et de silice (voir figure 1, étape II). Insistons sur le fait qu'une telle destruction n'est possible que si le béton (plus exactement la pâte de ciment durcie) est perméable, donc de mauvaise qualité.

8 Conséquences

Les considérations qui précèdent paraissement compliquées. Elles expliquent pourtant les cas de dégâts causés par l'eau douce ou l'eau chlorée, les dépôts de chaux provenant des dalles de toiture, l'obturation des bétons drainants, etc. On peut en déduire que pour avoir une bonne durabilité le béton, et surtout sa pâte de ciment en contact avec l'eau, doit toujours être de très haute qualité (c.-à-d. étanche à l'eau). Il est alors capable de se constituer une autoprotection, voilà le coup de chance évoqué au début!

Dr Emil Koelliker

Bibliographie

[1] *Cembureau:* «Emploi du béton en milieux agressifs». Recommandation 1978, Paris

[2] *Koelliker, E.:* «Zur hydrolytischen Zersetzung von Zementstein und zum Verhalten von Kalkzuschlag bei der Korrosion von Beton durch Wasser». Betonwerk + Fertigteil-Technik, S. 234, 1986

[3] *Koelliker, E.:* «Skins of Calciumcarbonate and their Significance for the Corrosion of Concrete». 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. V, p. 159–164, Rio de Janeiro, 1986

[4] Schweiz. Lebensmittelbuch, Kap. 27 A, «Trinkwasser». Bern 1985

TFB

Pour tous autres renseignements s'adresser au
SERVICE DE RECHERCHES ET CONSEILS TECHNIQUES
DE L'INDUSTRIE SUISSE DU CIMENT WILDEGG/SUISSE
5103 Wildegg Case postale Téléphone 064 53 17 71