

Pathologie

La carbonatation

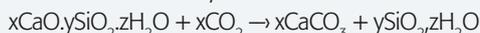
La carbonatation est un phénomène naturel de vieillissement du béton. Cependant, son apparition, puis son évolution peuvent avoir des conséquences sur la pérennité des ouvrages.

Le Lerm* dresse le portrait de ce phénomène.

1 - Qu'est-ce que la carbonatation ?

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel des matériaux à base de liant hydraulique minéral. Ce phénomène conduit à la formation de carbonates de calcium par réaction entre les hydrates de la pâte de ciment (la portlandite et les silicates de calcium hydratés communément appelés C-S-H [Fig.1 et 2]) et le dioxyde de carbone (CO_2), présent dans l'atmosphère à un taux moyen de 0,035 % en volume. Ce taux est plus important en milieu urbain qu'en milieu rural. Cette réaction entraîne la consommation de bases alcalines présentes dans la solution interstitielle des bétons aboutissant à une diminution du pH, qui passe d'une valeur de 13 à une valeur inférieure à 9. D'un point de vue chimique, les principales réactions se présentent ainsi :

- Portlandite : $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
- Silicates de calcium hydratés :



La cinétique de carbonatation de la pâte de ciment des bétons, qui évolue suivant une fonction en racine carrée du temps, est dépendante de l'humidité relative environnante. Elle est maximale pour une humidité relative comprise entre 60 et 80 %. Au-delà de 80 %, la cinétique diminue rapidement pour atteindre des valeurs très faibles, lorsque les pores sont saturés d'eau, sachant que la diffusion du CO_2 dans l'eau est 10 000 fois plus faible que dans l'air. À l'opposé, si un béton est placé dans un environnement très sec, la quantité d'eau présente dans les pores est insuffisante pour dissoudre le dioxyde de carbone. La cinétique de carbonatation est donc faible à très faible, lorsqu'un béton est immergé ou lorsqu'il est placé dans un environnement très sec.

La vitesse de carbonatation obéit à un processus de diffusion du CO_2 atmosphérique à travers la couche de carbonates formée. Elle suit donc une loi linéaire en fonction de la racine carrée du temps :

- Profondeur de carbonatation = $a\sqrt{t}$

Le coefficient dépend des paramètres de formulation du béton et de ses conditions d'exposition (humidité, température...). De nombreuses lois empiriques ont été proposées pour fixer une valeur de ce coefficient en fonction des conditions d'exposition. Ces lois simples permettent d'établir une prévision approximative d'évolution du phénomène dans le temps.

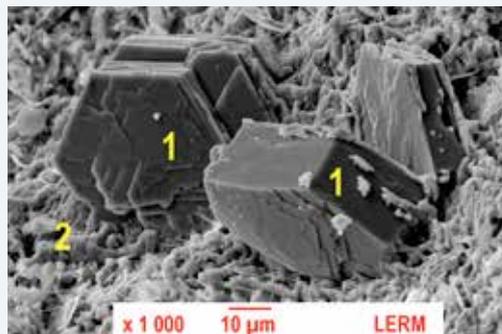


Fig. 1 - Cristal de portlandite non carbonaté (microscopie électronique à balayage, MEB). 1 = portlandite non carbonatée, 2 = C-S-H.

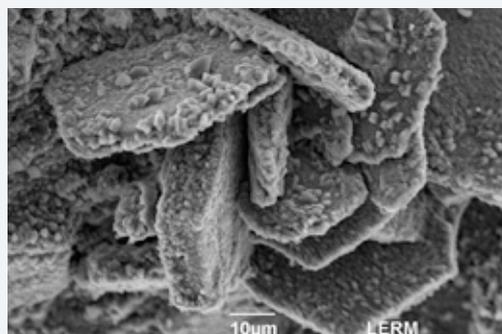


Fig. 2 - Cristal de portlandite en cours de carbonatation recouvert de microcristaux de carbonate de calcium.

2 - Quelles peuvent en être les conséquences ?

La principale conséquence de la carbonatation est l'amorce d'un phénomène de corrosion des armatures du béton armé ou précontraint, lorsque le front de carbonatation atteint l'armature. Les désordres associés correspondent alors, pour l'essentiel, à des fissures et à des épaufrures (expulsion du béton d'enrobage) consécutives aux gonflements provoqués par la formation d'oxydes et hydroxydes de fer sur les armatures [Fig. 3 et 4]. Ces dernières peuvent alors montrer des diminutions de section importantes ou, au stade ultime, des ruptures ayant des conséquences graves sur la capacité portante des éléments de structure.

Une conséquence secondaire du phénomène de carbonatation correspond à une densification

Retrouvez la version enrichie de cet article sur acpresse.fr/ ou



ENVIE D'ELARGIR VOS CONNAISSANCES ?

Tout notre fonds scientifique sur acpresse.fr/Béton rubrique **Savoirs**

NOTRE SÉLECTION

Pathologies : L'alcali-réaction
par Abdelkrim Ammouche
Direction technique et scientifique
Lerm Setec



Connaissances fondamentales : Les modèles numériques au service de l'éco-construction
par Pierre Rossi
Mast-EMGCU,
Université Gustave Eiffel, à Marne-la-Vallée (77)





Fig. 3 - Fissuration consécutive à la corrosion des armatures (maison individuelle).



Fig. 4 - Epaufrement laissant apparaître les armatures corrodées (sous-face d'un balcon).

relative de la zone carbonatée par rapport au béton sain. Cette densification, qui ne revêt aucun caractère pathologique, peut, dans certaines conditions, conduire à une diminution relative de 10 à 15 % de la porosité de la zone carbonatée, formant ainsi une barrière diffusionnelle limitant les phénomènes de transfert.

3 - Comment mesurer la carbonatation de façon simple ?

La technique la plus simple à mettre en œuvre pour mesurer la profondeur de carbonatation des bétons correspond au test à la phénolphthaléine réalisé sur des fractures fraîches de béton. La phénolphthaléine est un indicateur de pH coloré, dont le virage se situe aux alentours de 9. Cela permet de différencier la zone carbonatée ($\text{pH} < 9$) qui reste incolore, de la zone non carbonatée ($\text{pH} > 9$ et allant jusqu'à 13) colorée en violet [Fig. 5]. Cet essai doit être effectué, à l'échelle d'un ouvrage, sur un nombre de points de mesure représentatifs, en tenant compte des conditions locales d'exposition et de l'hétérogénéité possible du matériau. Ce test permet une mesure fiable et rapide de la profondeur de carbonatation dans le cadre de diagnostic d'ouvrages.

Il existe d'autres techniques de mesure de la profondeur de carbonatation, plus précises, mais plus lourdes à mettre en œuvre. À l'exemple de la microscopie optique sur lames minces, de la microscopie électronique à balayage. Ou encore de la thermogravimétrie ou la méthode isotopique $\text{C}13/\text{C}12$ des carbonates, qui permet en plus de quantifier la proportion de CO_2 fixé par les hydrates après carbonatation.

4 - Comment s'en prémunir et comment la prévoir ?

Pour des conditions d'exposition données, la cinétique de carbonatation d'un béton est en relation avec sa microstructure, en particulier sa porosité. Et par conséquent avec ses caractéristiques mécaniques, puisque ces deux paramètres sont étroitement liés. Ainsi, pour des bétons présentant des résistances à la compression supérieures ou égales à 50 MPa à 28 j,

comme les BHP, la cinétique de carbonatation est très faible. Dans cette optique, la norme béton européenne EN 206 fixe des paramètres de formulations (dosages en liant équivalent et en additions minérales, rapport Eau efficace/Liant équivalent) et une classe de résistance minimale. Ceci, pour qu'un béton se comporte de façon durable vis-à-vis de la corrosion des armatures initiée par la carbonatation du béton d'enrobage. Cette norme définit quatre classes d'exposition notées XC1 à XC4, dont l'agressivité est fonction de l'humidité et de l'existence de cycles d'humidification/séchage.

Il existe aussi des normes qui permettent de caractériser le comportement d'une formulation de béton ou d'un béton prélevé sur ouvrage vis-à-vis de ce phénomène naturel inéluctable :

- NF EN 12390-10 - Détermination de la résistance à la carbonatation du béton à des niveaux atmosphériques de dioxyde de carbone ;
- NF EN 12390-12 - Détermination de la résistance à la carbonatation du béton - Méthode accélérée ;
- XP P 18-458 - Essai de carbonatation accélérée (sur éprouvettes confectionnées ou carottes prélevées sur ouvrage).

Par ailleurs, dans le cadre du bilan carbone, la norme P18-515 - Carbonatation et absorption du CO_2 dans le béton, et le projet de norme P19-839PR - Contribution des ouvrages de construction au développement durable - spécifient des valeurs typiques d'absorption du CO_2 . Ces dernières peuvent être prises en compte dans les DEP pour l'ensemble du cycle de vie pour diverses structures soumises à différentes conditions environnementales.

Noureddine Rafai
Direction technique et scientifique
du Lem

*En tant que laboratoire-conseil indépendant spécialisé dans la caractérisation des matériaux de construction et de leurs pathologies, le Lem (Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux) est chaque jour confronté à l'étude des problématiques liées aux bétons.

Bibliographie

- NF EN 12390-10, P18-430-10 (Décembre 2018) – Essai pour béton durci – Partie 10 : Détermination de la résistance à la carbonatation du béton à des niveaux atmosphériques de dioxyde de carbone.
- NF EN 12390-12, P18-430-12 (Décembre 2020) – Essai pour béton durci – Partie 12 : Détermination de la résistance à la carbonatation du béton – Méthode de la carbonatation accélérée.
- XP P 18-458 (novembre 2008) - Essai pour béton durci – Essai de carbonatation accélérée – Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté.
- P18-515, FD CEN/TR 17310 (octobre 2019) – Carbonatation et absorption du CO_2 dans le béton.
- P19-839PR, PR NF EN 16757 (décembre 2021) – Contribution des ouvrages de construction au développement – Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant la catégorie de produits pour le béton et les éléments en béton.