

**D**epuis quelques années, la durabilité du béton fait l'objet de plusieurs projets de recherche menés conjointement par le CSTC et le CRIC <sup>(1)</sup>. Cause majeure de la dégradation du béton de par le monde, la corrosion des armatures réclame toute notre attention [16]. Le présent article analyse l'un des phénomènes à l'origine de ces désordres, à savoir la carbonatation du béton, et propose quelques dispositions pour s'en prémunir.

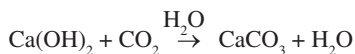
✍ *V. Pollet, ir., conseiller technologique <sup>(2)</sup>, chef de la division Béton et Chimie du bâtiment, CSTC*  
*B. Dooms, ir., chercheur au laboratoire Technologie du béton, CSTC*  
*G. Mosselmans, dr. ir., chef de projet, CRIC <sup>(1)</sup>*

## 1 CARBONATATION ET CORROSION

Un béton jeune possède un pH élevé qui s'établit autour de 12 à 13. Cette alcalinité conduit à la formation, à la périphérie des armatures, d'une couche quasiment impénétrable d'hydroxydes de fer isolant l'acier et enrayant le processus de corrosion. On parle de passivation de l'acier.

Un béton exposé à l'air libre est soumis à un processus de vieillissement qui résulte de la réaction du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) de l'air avec les constituants alcalins du matériau. Cette réaction est appelée carbonatation.

Le dioxyde de carbone se dilue dans l'eau contenue dans la structure poreuse du béton. Cette réaction permet à l'hydroxyde de calcium (portlandite) de se diluer à son tour dans l'eau interstitielle, de réagir avec le CO<sub>2</sub> et de précipiter sous forme de carbonate de calcium, ce qui fait baisser le pH de celle-ci à une valeur proche de 9. La réaction est représentée chimiquement comme suit :



Pour la plupart des bétons, la précipitation du carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) se traduit par une amélioration de la compacité de la structure et par une légère hausse de sa résistance en compression. Dans le béton armé, toutefois, cette réaction peut conduire à une dégradation due à la corrosion des armatures.

# Corrosion des armatures induite par la carbonatation du béton : comment s'en prémunir ?

Avec le temps, le front de carbonatation, qui constitue la démarcation entre la zone carbonatée du béton et la zone intacte, progresse de plus en plus profondément dans la structure. La vitesse de carbonatation diminue cependant avec le temps, étant donné que le CO<sub>2</sub> doit pénétrer toujours plus loin dans le béton et que les pores sont obstrués par le carbonate de calcium. On peut calculer approximativement la profondeur de carbonatation à l'aide de la formule suivante :

$$D = k_c \sqrt{t}$$

dans laquelle :

D = la profondeur de carbonatation (mm)

k<sub>c</sub> = le coefficient de carbonatation, fonction de la qualité du béton et de son exposition (mm/√ans)

t = l'âge du béton (années).

Le coefficient de carbonatation k<sub>c</sub> donne une indication de la résistance du béton à la carbonatation; il dépend de la composition de ce dernier, de la cure réalisée et de l'exposition de la structure. Dans un béton donné, exposé à un milieu déterminé, plus ce coefficient est élevé, plus rapide sera la carbonatation et donc plus faible sera la résistance au phénomène.

Dès que le front de carbonatation atteint les armatures, le pH diminue dans la zone du béton située à la périphérie de l'acier, la couche de passivation se déstabilise, se dissout et son action protectrice disparaît. Si la structure renferme en outre de l'eau et de l'oxygène, les armatures commenceront à rouiller. Les produits de corrosion formés vont occuper un volume plusieurs fois supérieur à celui de l'acier, ce qui conduira à une fissuration et à un effritement du béton.

En général, on constate que la corrosion des armatures induite par la carbonatation affecte les éléments plus ou moins uniformément sur de longues distances (corrosion généralisée).

## 2 MESURE DE LA PROFONDEUR DE CARBONATATION

La profondeur de carbonatation est déterminée suivant la méthode décrite dans les recommandations CPC-18 de la RILEM [20] ou selon



**Fig. 1** Profondeur de carbonatation sur une surface de rupture fraîche.

la norme NBN EN 14630 [11]. On casse une surface relativement importante ou une carotte de béton dans le sens de la longueur, puis on asperge immédiatement la cassure d'une solution de phénolphthaléine, un indicateur de pH. Le béton sain vire au rose, tandis que les zones carbonatées restent incolores (figure 1).

Cette procédure exige des échantillons d'assez grande taille. Pour limiter les dégâts dus aux prélèvements, on a recours à une autre méthode de mesure; celle-ci consiste à forer dans le béton de petits trous de 6 à 8 mm de diamètre et à récolter la poudre de forage sur une feuille imprégnée de phénolphthaléine. Dans le cas d'une dalle de béton, la poudre peut être aspergée régulièrement de phénolphthaléine. Dès que le forage atteint le béton sain, la poudre change de teinte. La profondeur du forage correspond alors approximativement à la profondeur de carbonatation. La mesure doit être effectuée au moins trois fois dans chaque zone examinée pour réduire l'influence de phénomènes locaux tels que la présence d'agrégats. Il faut en outre tenir compte du fait que la profondeur de carbonatation peut être plus élevée dans les fissures et les angles.

## 3 MESURES DE PRÉVENTION PRÉCONISÉES PAR LES NORMES

Plusieurs normes ont établi des prescriptions en vue de prévenir la corrosion induite par la carbonatation; ainsi :

- la norme NBN EN 206-1 [4] et son supplément belge, la NBN B 15-001 [1], proposent un dosage minimum en ciment et un rapport eau-ciment maximum

<sup>(1)</sup> Centre national de recherche scientifique et technique pour l'industrie cimentière.

<sup>(2)</sup> Guidance technologique 'Réparation du béton' subsidiée par la Région wallonne.

- quant à l'Eurocode 2 [7], il exige un enrobage minimum des armatures
- enfin, le projet de norme européenne prEN 13670 [14] et la norme NBN EN 13369 [10] recommandent une durée de cure minimale.

On peut éventuellement appliquer un revêtement de protection conforme à la norme NBN EN 1504-2 [6]. Celui-ci n'est toutefois nécessaire que lorsque la composition du béton ou l'enrobage des armatures ne sont pas adéquats.

### 3.1 DOSAGE MINIMUM EN CIMENT ET RAPPORT EAU-CIMENT MAXIMUM

La norme NBN EN 206-1 considère qu'un ouvrage en béton est durable s'il résiste de manière satisfaisante, tout au long de sa durée d'utilisation, à l'environnement auquel il est exposé. Elle définit plusieurs classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement. Les actions liées à la corrosion induite par la carbonatation correspondent aux classes XC1 à XC4, qui s'appliquent aux ouvrages en béton renfermant des armatures ou des pièces métalliques, exposés à l'air et à l'humidité (tableau 1).

A chacune de ces classes, la norme NBN B 15-001 associe des types de béton caractérisés par un dosage minimum en ciment  $C_{min}$  et un rapport eau-ciment maximum  $E/C_{max}$  (tableau 2).

Selon la norme NBN EN 206-1, le concepteur de l'ouvrage doit considérer l'ensemble des mécanismes potentiels de dégradation. Pour simplifier le travail du prescripteur, la norme NBN B 15-001 a défini des classes d'environnement applicables aux conditions couramment rencontrées en Belgique. Cette classification tient compte à la fois de la carbonatation et des autres mécanismes de dégradation tels que le gel, la pénétration de chlorures, etc. <sup>(3)</sup>.

### 3.2 ENROBAGE DES ARMATURES

La norme NBN EN 1992-1-1 prescrit des

**Tableau 1 Classes d'exposition associées à la corrosion par carbonatation [4].**

Classe	Environnement	Exemples informatifs
XC1	Sec ou humide en permanence	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible. Béton submergé en permanence dans de l'eau.
XC2	Humide, rarement sec	Surfaces de béton soumises au contact prolongé de l'eau. Un grand nombre de fondations.
XC3	Moyennement humide	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé. Béton extérieur abrité de la pluie.
XC4	Alternativement humide et sec	Surfaces soumises au contact de l'eau, mais n'entrant pas dans la classe d'exposition XC2.

**Tableau 2 Exigences de durabilité vis-à-vis de la carbonatation associées aux classes d'exposition [1].**

Paramètre	Classe XC1	Classe XC2	Classe XC3	Classe XC4
	Béton T(0,65)	Béton T(0,60)	Béton T(0,55)	Béton T(0,50)
$C_{min}$ (kg/m <sup>3</sup> )	260	280	300	320
$E/C_{max}$	0,65	0,60	0,55	0,50

valeurs minimales d'enrobage ( $c_{min,dur}$ ) pour les ouvrages en béton armé en fonction de la classe structurale, des classes d'exposition et des classes d'environnement (tableau 3). En Belgique, la classe S4 est la classe structurale recommandée pour les ouvrages d'une durée d'utilisation de 50 ans.

### 3.3 CURE DU BÉTON FRAIS

La cure consiste à prendre des mesures de protection en vue de réduire l'évaporation d'eau à la surface du béton ou de préserver son taux d'humidité. Des recommandations ont été formulées à ce sujet dans le projet de norme européenne prEN 13670 ainsi que dans la norme NBN EN 13369.

En ce qui concerne le béton coulé *in situ*, le projet de norme prEN 13670 a défini plusieurs classes de cure. Celles-ci correspondent à une durée de cure de 12 heures ou au temps nécessaire pour atteindre une résistance donnée en

compression (voir tableau 4, p. 3). La classe de cure doit être spécifiée dans les prescriptions relatives à l'exécution.

Les prescriptions applicables aux produits préfabriqués sont énoncées dans la norme NBN EN 13369.

## 4 FACTEURS D'INFLUENCE ÉTUDIÉS AU CSTC

### 4.1 INTRODUCTION

L'élément fondamental qui contrôle la carbonatation du béton est la diffusion du CO<sub>2</sub> à travers la pâte de ciment durcie. C'est la raison pour laquelle les prescriptions imposent des valeurs limites au rapport eau-ciment (maximum) et au dosage (minimum) en ci-

<sup>(3)</sup> Les nouvelles normes relatives au béton ont été évoquées dans plusieurs Dossiers du CSTC [18, 19].

**Tableau 3 Valeurs d'enrobage minimales  $c_{min,dur}$  (en mm) requises pour assurer la durabilité du béton armé [7].**

Classe structurale	Classes d'exposition et classes d'environnement (*)					
	XC1	XC2, XC3	XC4	XD1, XS1	XD2, XS2	XD3, XS3
	E1	EE1, EE2	EE3	ES2	ES1, ES3	EE4, ES4
S1	10	10	15	20	25	30
S2	10	15	20	25	30	35
S3	10	20	25	30	35	40
S4	15	25	30	35	40	45
S5	20	30	35	40	45	50
S6	25	35	40	45	50	55

(\*) Pour un béton armé situé dans un environnement chimiquement agressif (XA et EA), il y a lieu de considérer la valeur la plus élevée de  $c_{min,dur}$  indiquée dans les autres classes d'exposition et d'environnement.

**Tableau 4 Classes de cure [14].**

Classes de cure	Pourcentage de la valeur spécifiée pour la résistance caractéristique à la compression à 28 jours
Classe 1 – 12 heures min. (*)	–
Classe 2	35 %
Classe 3	50 %
Classe 4	70 %

(\*) A condition que la prise n'exécède pas 5 heures et que la température à la surface du béton soit égale ou supérieure à 5 °C.

ment. L'exposition du béton (taux d'humidité) a, quant à elle, une influence sur la vitesse de carbonatation.

Il ressort de la description de la carbonatation faite au § 1 (p. 1) que cette réaction ne peut se produire qu'en milieu aqueux. Or, la diffusion du CO<sub>2</sub> est dix mille fois plus rapide dans un béton sec (dont les pores sont remplis d'air) que dans un béton humide (aux pores gorgés d'eau). Il en résulte qu'un béton se carbonatera d'autant plus rapidement que sa surface est soumise à des périodes humides auxquelles succèdent de longues périodes de sécheresse (classe d'exposition XC4, voir tableau 1, p. 2).

Le CSTC a entrepris, conjointement avec le CRIC, une recherche visant notamment à déterminer l'influence de divers paramètres sur la résistance du béton à la carbonatation. Les paramètres étudiés étaient :

- le type de ciment
- la cure du béton
- le rapport eau-ciment (E/C)
- le dosage en ciment.

En l'absence de procédure d'essai normalisée, le CSTC a mis au point une méthode permettant de caractériser la résistance du béton à la carbonatation et d'examiner l'influence des paramètres précités. Cette méthode d'essai présente un caractère délibérément simple, de façon à pouvoir l'appliquer aussi bien pour tester des échantillons de chantier que pour effectuer des contrôles dans le cadre d'une certification.

**4.2 MÉTHODE D'ESSAI**

Les bétons utilisés lors de la recherche étaient composés, d'une part, de granulats calcaires, dont les dimensions étaient réparties conformément à la norme NBN EN 480-1 [5], et, d'autre part, des ciments suivants :

- CEM I 42,5 R
- CEM I 52,5 R
- CEM I 52,5 N HSR LA
- CEM II/A-M 32,5 R
- CEM II/B-M 32,5 R
- CEM III/A 32,5 N LA
- CEM III/A 42,5 N LA
- CEM III/B 42,5 N HSR LA

- CEM III/C 32,5 N HSR LA
- CEM V/A 32,5 N HSR LA.

Les mélanges présentaient un rapport E/C de 0,525 et un dosage en ciment de 300 kg/m<sup>3</sup>. Pour les ciments CEM I 42,5 R et CEM III/A 42,5 N LA, des mélanges ont également été formulés avec un rapport E/C de 0,55 et de 0,60 (dosage en ciment de 300 kg/m<sup>3</sup>) et des dosages en ciment de 280 kg/m<sup>3</sup> et de 350 kg/m<sup>3</sup> (rapport E/C de 0,525).

Des prismes de 15 x 15 x 60 cm<sup>3</sup> et des cubes de 15 x 15 x 15 cm<sup>3</sup> ont été confectionnés pour chaque mélange. Les prismes ont fait l'objet d'un essai de carbonatation, tandis que les cubes ont été utilisés pour déterminer la résistance en compression (à 28 jours), la masse volumique correspondante et l'absorption d'eau par immersion.

Après un durcissement de 24 heures, les échantillons ont été démoulés et ont subi deux cures différentes :

- une cure idéale : conservation pendant 56 jours dans une ambiance à (20 ± 2) °C et à plus de 90 % d'humidité relative (HR)
- une cure insatisfaisante : conservation pendant 56 jours dans une ambiance à (20 ± 2) °C et (60 ± 2) % HR.

La longue durée de cure (56 jours) a pour but de permettre une hydratation primaire et secondaire suffisante. Après ce délai, les éprou-

vettes sont séchées pendant 14 jours, puis conservées à (20 ± 2) °C et (60 ± 2) % HR jusqu'à masse constante.

Les prismes sont ensuite entreposés pendant 56 jours dans la chambre de carbonatation, à l'intérieur de laquelle la teneur en CO<sub>2</sub> est régulée à 1 %, la température à (20 ± 2) °C et l'humidité relative à (55 ± 5) %. Un certain nombre de prismes sont fendus après 3, 7, 14, 28, 35, 42 et 56 jours afin de mesurer la profondeur de carbonatation moyenne suivant la norme NBN EN 14630 [11].

La profondeur de carbonatation moyenne est portée en graphique en fonction de la racine carrée de la durée d'exposition ( $\sqrt{t}$ jours). Partant de la formule présentée au § 1, on obtient une droite de régression linéaire dont la pente fournit le coefficient de carbonatation du béton étudié (en mm/ $\sqrt{t}$ jours) en conditions accélérées (figure 2).

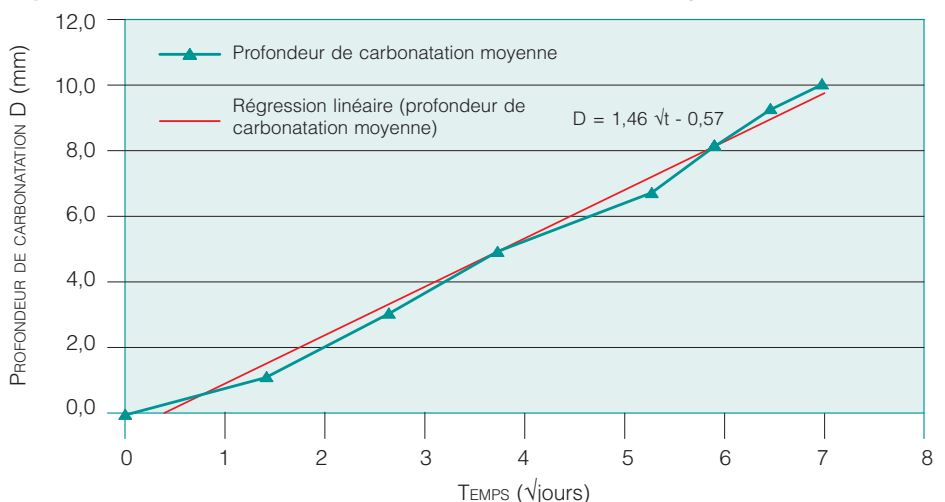
Les différents échantillons ont en outre été soumis à plusieurs essais : résistance en compression, détermination de la masse volumique correspondante et de l'absorption d'eau par immersion. On a ensuite tenté d'établir des corrélations entre ces caractéristiques couramment utilisées pour le béton et la résistance à la carbonatation.

**4.3 RÉSULTATS D'ESSAI**

**4.3.1 Incidence du rapport eau-ciment**

L'incidence du rapport E/C a été étudiée sur des bétons contenant deux types de ciments (CEM I 42,5 R et CEM III/A 42,5 N LA) dosés à raison de 300 kg/m<sup>3</sup>. Les figures 3 et 4 (p. 4) donnent les résultats obtenus sur trois éprouvettes pour chaque rapport E/C utilisé. Comme on pouvait s'y attendre, la résistance à la carbonatation augmente à mesure que le rapport eau-ciment diminue.

**Fig. 2 Détermination du coefficient de carbonatation par régression linéaire.**



### 4.3.2 Incidence du dosage en ciment

L'incidence de ce paramètre a également été examinée sur les bétons à base de ciment CEM I 42,5 R et CEM III/A 42,5 N LA présentant un rapport E/C de 0,525. Les résultats obtenus sur trois éprouvettes pour chaque dosage de ciment sont représentés dans les diagrammes des figures 5 et 6 (p. 5). Nous n'avons pas constaté d'effet sensible du dosage de ciment sur la résistance à la carbonatation. Il faut cependant souligner que les quantités de ciment utilisées lors de l'étude étaient relativement élevées et peu différenciées.

### 4.3.3 Incidence du type de ciment

Les coefficients de carbonatation  $k_c$  obtenus avec des bétons formulés avec différents types de ciments dosés à 300 kg/m<sup>3</sup> et présentant un rapport E/C de 0,525 sont indiqués au tableau 5 (p. 5) et sont présentés graphiquement à la figure 7 (p. 5).

L'influence du type de ciment a été mise en évidence en comparant le coefficient de carbonatation de chaque ciment avec celui du ciment de référence CEM I 42,5 R. Ainsi, on constate qu'à rapport E/C et dosages identiques, les ciments composés de cendres volantes (CEM II et CEM V) et de laitiers de haut fourneau (CEM III) ont un coefficient de carbonatation plus élevé que le ciment Portland. Cet effet défavorable s'accroît, dans le cas du laitier de haut fourneau, à mesure que la teneur en laitier augmente et que la finesse du ciment diminue (passage de la classe 42,5 à 32,5 pour un même type de ciment).

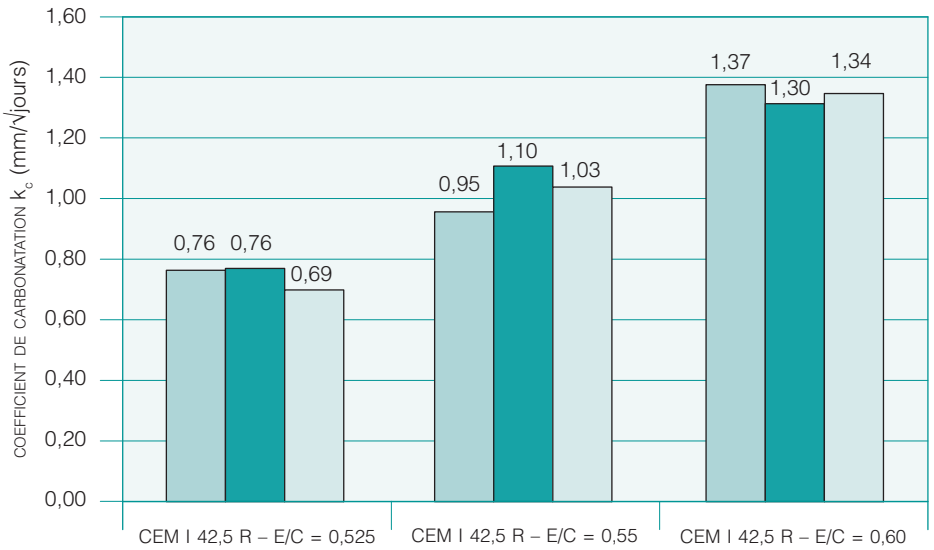
Le CRIC s'est employé, pour sa part, à déterminer la résistance à la carbonatation de mortiers confectionnés avec certains des ciments évoqués ci-avant et formulés conformément aux exigences de la norme NBN EN 196-1 [3]. La synthèse de ces résultats est illustrée à la figure 8 (p. 6) aussi bien pour les mortiers ayant fait l'objet d'une cure optimale que pour ceux conservés dans de mauvaises conditions [12].

Les remarques se rapportant à ces résultats sont identiques à celles qui ont été formulées pour le béton.

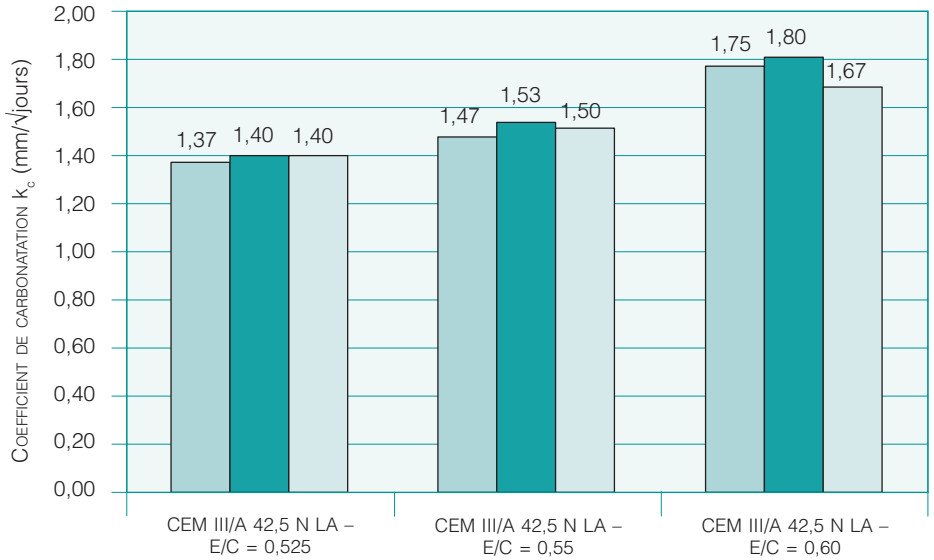
### 4.3.4 Incidence de la cure

Les résultats de recherche ont révélé que le type de cure a une influence majeure sur la résistance des bétons et des mortiers à la carbonatation (figures 7 et 8). De mauvaises conditions de cure conduisent en effet à des coefficients de carbonatation deux (béton) à quatre (mortier) fois supérieurs à ceux obtenus sur la série d'échantillons composés du même

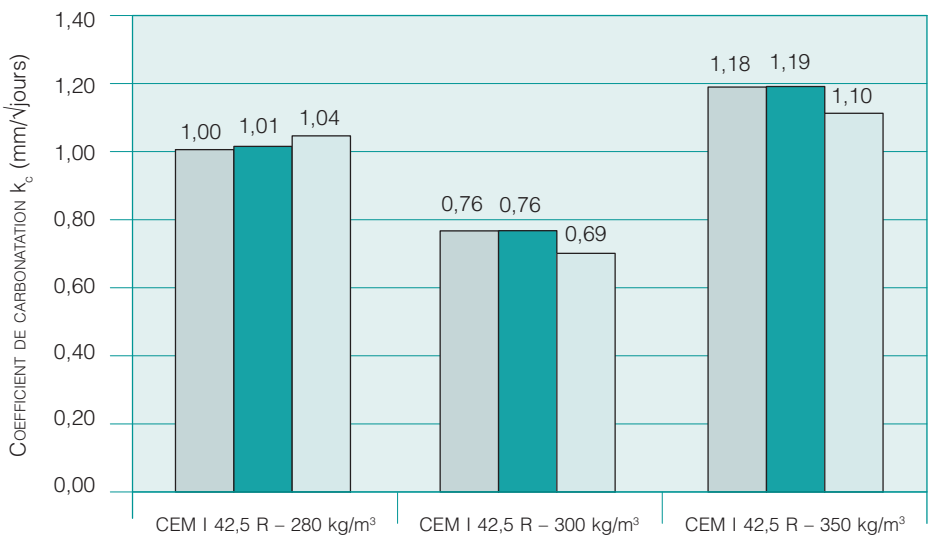
**Fig. 3 Influence du rapport eau-ciment sur le coefficient de carbonatation des bétons à base de ciment CEM I 42,5 R dosé à 300 kg/m<sup>3</sup>.**



**Fig. 4 Influence du rapport eau-ciment sur le coefficient de carbonatation des bétons à base de ciment CEM III/A 42,5 N LA dosé à 300 kg/m<sup>3</sup>.**



**Fig. 5 Influence du dosage en ciment CEM I 42,5 R sur le coefficient de carbonatation des bétons présentant un rapport E/C de 0,525.**



**Tableau 5 Coefficients de carbonatation  $k_c$  obtenus avec différents ciments et différents procédés de cure.**

Ciments	$k_c$ (mm/√jours)		$k_c$ (cure insatisfaisante)/ $k_c$ (cure idéale)	$k_c/k_c$ (CEM I 42,5 R)	
	Cure idéale	Cure insatisfaisante		Cure idéale	Cure insatisfaisante
CEM I 42,5 R	0,74	1,59	2,16	1	1
CEM I 52,5 R	0,72	1,28	1,78	0,97	0,80
CEM I 52,5 N HSR LA	0,62	1,02	1,65	0,84	0,64
CEM II/A-M 32,5 R	1,17	2,31	1,98	1,58	1,45
CEM II/B-M 32,5 R	1,08	1,88	1,74	1,46	1,18
CEM III/A 32,5 N LA	1,45	2,60	1,80	1,96	1,63
CEM III/A 42,5 N LA	1,38	1,85	1,34	1,86	1,16
CEM III/B 42,5 N HSR LA	1,59	2,12	1,33	2,15	1,33
CEM III/C 32,5 N HSR LA	2,24	2,81	1,25	3,03	1,76
CEM V/A 32,5 N HSR LA	1,22	2,19	1,79	1,65	1,38

ciment mais soumis à un conditionnement optimal.

#### 4.3.5 Corrélations avec d'autres caractéristiques courantes

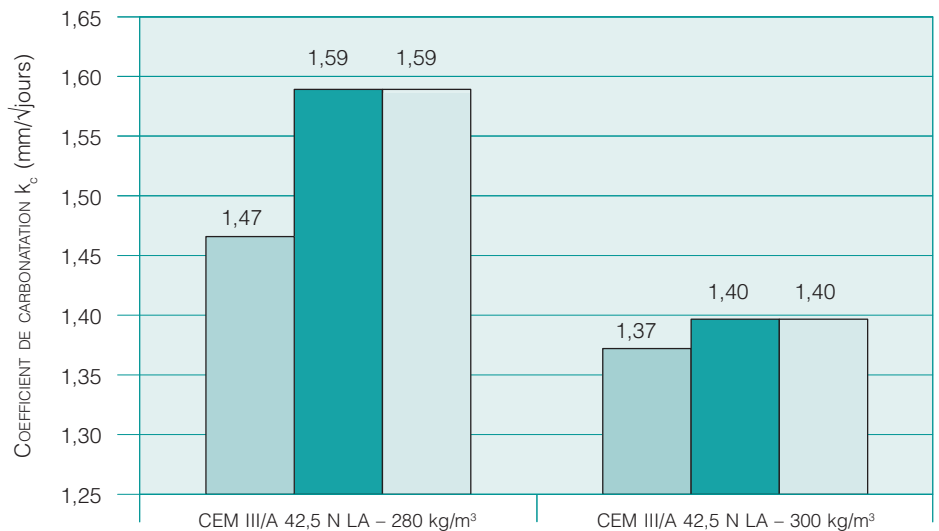
Le coefficient de carbonatation n'est pas un critère d'évaluation courant, ni un moyen de mesure rapide pour contrôler la qualité d'un béton. C'est la raison pour laquelle nous avons examiné la possibilité d'établir des corrélations avec des caractéristiques plus classiques, telle l'absorption d'eau ou la résistance en compression.

Ainsi, l'absorption d'eau par immersion déterminée selon la norme NBN B 15-215 [2] s'établit entre 4,4 et 6,5 % pour les bétons étudiés dans le cadre de la recherche (figure 9, p. 6). On remarquera que les coefficients de carbonatation les plus faibles ont été obtenus avec les bétons présentant les valeurs d'absorption les plus basses. Toutefois, les coefficients de carbonatation n'ont pu être directement corrélés avec l'absorption d'eau par immersion.

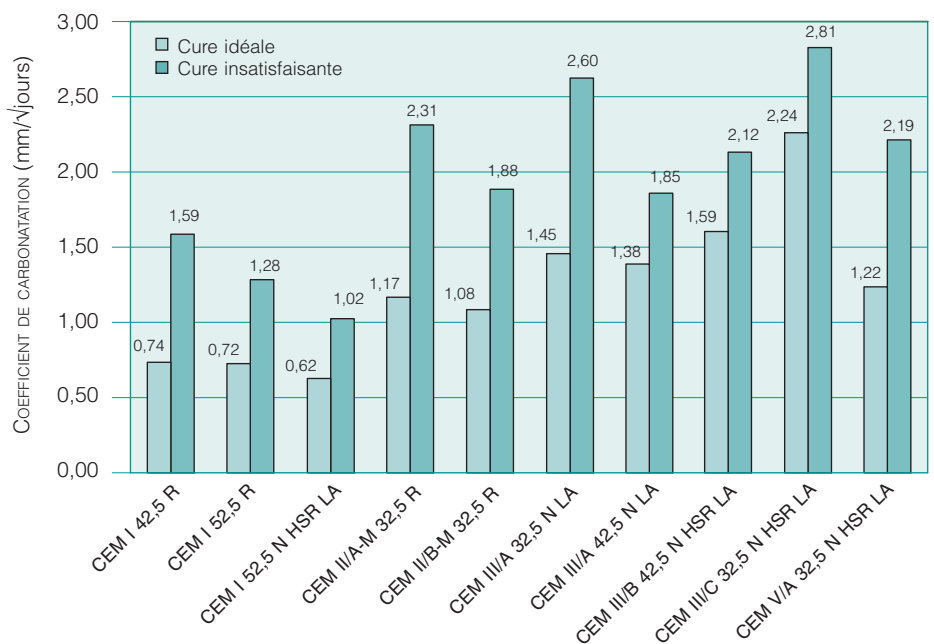
Le type de ciment, le rapport E/C, le dosage en ciment et le degré d'hydratation étant aussi des facteurs influençant la résistance du béton en compression, il était courant autrefois de considérer que la résistance à la carbonatation était fonction de la résistance en compression.

Toutefois, comme le montre la figure 10, on n'observe pas de lien direct entre le coefficient de carbonatation et la résistance en compression déterminée selon la norme NBN EN 12390-3 [8]. Tout au plus relève-t-on que les coefficients de carbonatation sont les plus élevés dans les bétons de moindre résistance en compression et, inversement, que les bétons qui résistent le mieux à la compression présentent aussi les coefficients de carbonatation les plus bas.

**Fig. 6 Influence du dosage en ciment CEM III/A 42,5 N LA sur le coefficient de carbonatation des bétons présentant un rapport E/C de 0,525.**



**Fig. 7 Coefficient de carbonatation moyen des bétons étudiés (E/C = 0,525; dosage en ciment = 300 kg/m³).**





### 5 CONCLUSIONS

Si les prescriptions normatives belges et européennes prennent en compte l'enrobage des armatures, le rapport eau-ciment, le dosage en ciment et le type de cure pour prévenir la carbonatation et la corrosion qu'elle induit, d'autres facteurs ont cependant un rôle à jouer dans la résistance du béton à ce phénomène, à savoir :

- la mise en place du béton :

l'ouvrabilité doit permettre un coulage aisé du béton. Trop sec, celui-ci peut donner lieu à la formation de nids de gravier et d'inclusions d'air; trop humide, il pourrait subir un phénomène de ségrégation sous l'effet des vibrations du compactage

- le type de ciment utilisé :

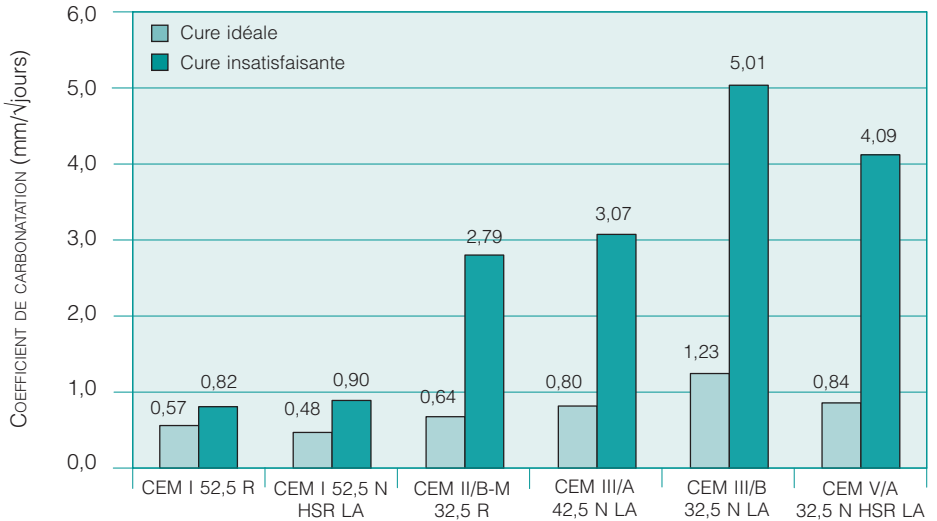
des pays comme le Luxembourg (DNA EN 206) [13] ou l'Allemagne (DIN 1045-2) [15] prescrivent les ciments dont l'usage est autorisé dans chaque classe d'environnement. Notre étude a révélé que le ciment Portland CEM I résiste mieux à la carbonatation que les ciments contenant du laitier de haut fourneau ou des cendres volantes et ce, en dépit de la plus grande perméabilité des bétons confectionnés avec les ciments Portland. Cette meilleure résistance à la carbonatation est liée au fait que les ciments Portland donnent lieu à une teneur en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  plus élevée dans la pâte de ciment durci. Une plus grande quantité de  $\text{CO}_2$  est dès lors nécessaire à la consommation de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et à la production de  $\text{CaCO}_3$ . Les résultats concernent aussi bien les bétons que les mortiers, ce qui tend à démontrer que cette constatation n'est pas liée à la composition du béton. Toutefois, il faut bien être conscient du fait que, pour un béton, le choix du ciment ne peut être fondé uniquement sur la résistance souhaitée à la carbonatation. D'autres facteurs, tels que la température ambiante au moment du bétonnage, la mise en place d'un béton de masse ou non, la présence dans l'environnement de chlorures ou d'autres agents agressifs comme les sulfates, ont également leur importance

- la granulométrie :

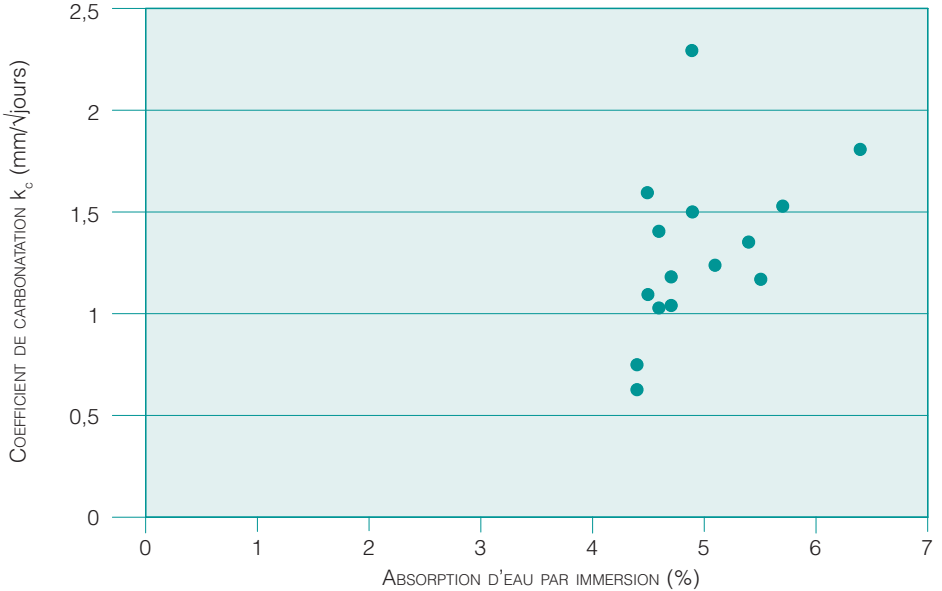
aux Pays-Bas et au Luxembourg, les normes [17, 21] imposent des limites aux fuseaux granulométriques des bétons afin d'assurer la durabilité des ouvrages. La granulométrie a en effet une grande influence sur l'absorption d'eau du béton. Grâce aux classes WAI, la norme belge NBN B 15-001 a prévu la possibilité de réduire l'absorption d'eau par immersion du béton. Il y a toutefois lieu de noter que ces classes figurent non parmi les exigences de base de la norme, mais parmi les exigences complémentaires.

L'emploi de ciment Portland CEM I est appelé à céder de plus en plus le pas aux ciments à base de cendres volantes et de laitier de haut fourneau. Toutefois, pour assurer une protection suffisante des armatures

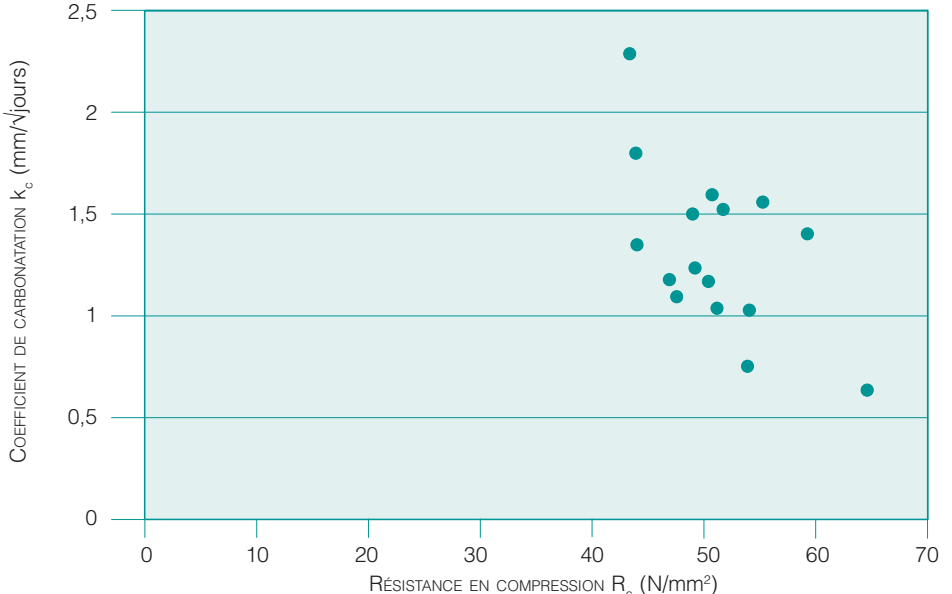
**Fig. 8 Coefficient de carbonatation moyen des mortiers étudiés formulés selon la NBN EN 196-1 [12].**



**Fig. 9 Relation entre le coefficient de carbonatation  $k_c$  et l'absorption d'eau par immersion (déterminée selon la norme NBN B 15-215).**



**Fig. 10 Relation entre le coefficient de carbonatation  $k_c$  et la résistance en compression (mesurée selon la norme NBN EN 12390-3).**



contre la corrosion due à la carbonatation, l'utilisation de ces deux derniers types de ciments doit être compensée par une composition adaptée du béton, une cure suffisamment longue et un enrobage satisfaisant des armatures. ■

## BIBLIOGRAPHIE



1. Bureau de normalisation  
NBN B 15-001 Supplément à la NBN EN 206-1. Bruxelles, NBN, 2004.
2. Bureau de normalisation  
NBN B 15-215 Essais des bétons. Absorption d'eau par immersion. Bruxelles, NBN, 1989.
3. Bureau de normalisation  
NBN EN 196-1 Méthodes d'essais des ciments. Partie 1 : détermination des résistances mécaniques. Bruxelles, NBN, 2005.
4. Bureau de normalisation  
NBN EN 206-1 Béton. Partie 1 : spécifications, performances, production et conformité. Bruxelles, NBN, 2001.
5. Bureau de normalisation  
NBN EN 480-1 Adjuvants pour béton, mortier et coulis. Méthodes d'essai. Partie 1 : béton et mortier de référence pour essais. Bruxelles, NBN, 2007.
6. Bureau de normalisation  
NBN EN 1504-2 Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton. Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité. Partie 2 : systèmes de protection de surface pour béton. Bruxelles, NBN, 2005.
7. Bureau de normalisation  
NBN EN 1992-1-1 Eurocode 2 : calcul des structures en béton. Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments. Bruxelles, NBN, 2005.
8. Bureau de normalisation  
NBN EN 12390-3 Essais pour béton durci. Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes. Bruxelles, NBN, 2002.
9. Bureau de normalisation  
NBN EN 13295 Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton. Méthodes d'essai. Détermination de la résistance à la carbonatation. Bruxelles, NBN, 2004.
10. Bureau de normalisation  
NBN EN 13369 Règles communes pour les produits préfabriqués en béton. Bruxelles, NBN, 2004.
11. Bureau de normalisation  
NBN EN 14630 Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton. Méthodes d'essais. Mesurage de la profondeur de carbonatation d'un béton armé par la méthode phénolphthaléine. Bruxelles, NBN, 2007.
12. Centre national de recherche scientifique et technique pour l'industrie cimentière  
Rapport CRIC 2003-2004. Bruxelles, CRIC, 2005.
13. Centre de ressources des technologies de l'information pour le bâtiment  
Document national d'application luxembourgeois de l'EN 206-1:2000. Luxembourg, CRTI-B, 2<sup>e</sup> édition, 2006.
14. Comité européen de normalisation  
prEN 13670 Execution of concrete structures. Bruxelles, CEN, 2007.
15. Deutsches Institut für Normung  
DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 2 : Beton. Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Berlin, DIN, 2001.
16. Divet L.  
Comment se prémunir des réactions sulfatiques dans les bétons ? Point sur les normes actuelles et quelques recommandations. Paris, Laboratoire central des ponts et chaussées, BLPC, n° 240, septembre-octobre 2002.
17. Nederlands Normalisatie Instituut  
NEN 8005 Nederlandse aanvulling op NEN EN 206-1. Delft, NEN, 2002.
18. Pollet V., Apers J. et Desmyter J.  
De nouvelles normes 'béton'. Partie 1 : nouvelle version de la norme NBN B 15-001. Bruxelles, Les Dossiers du CSTC, n° 3, Cahier n° 4, 2004.
19. Pollet V., Apers J. et Desmyter J.  
De nouvelles normes 'béton' (partie 2). Bruxelles, Les Dossiers du CSTC, n° 3, Cahier n° 6, 2005.
20. Réunion internationale des laboratoires et experts des matériaux, systèmes de construction et ouvrages  
Recommandation CPC-18 : Measurement of hardened concrete carbonation depth. Londres, Materials and Structures, vol. 21, n° 126, 1988.
21. Centre de ressources des technologies de l'information pour le bâtiment  
Document combiné 'Béton' constitué de la norme EN 206-1 'Béton. Partie 1 : spécifications, performances, production et conformité' et du document d'application national luxembourgeois de l'EN 206-1:2000. Luxembourg, CRTI-B, 2006.