

# Façades et carbonatation

## Faux problèmes, vraies solutions

Par Erik Langlo, ingénieur civil dipl. EPFZ/SIA-ASIC, Corinne van Cauwenbergh, ingénieur industriel en construction SIA, Perreten & Milleret SA, rue Jacques-Grosselin 21, 1227 Carouge

Les dégradations dans les bâtiments engendrent bien souvent des discussions animées quant aux moyens à mettre en œuvre afin de réaliser un assainissement satisfaisant.

Le présent article comporte deux parties; la première rappelle les causes et les conséquences du processus chimique de la carbonatation ainsi que les moyens pour s'en protéger.

La seconde aborde les diverses questions à résoudre avant d'entreprendre un assainissement, pour conclure sur les mesures de prévention et de maintenance propres à assurer aux bâtiments une longévité digne des efforts entrepris lors de leur construction ou de leur rénovation.

### Principe de base de la carbonatation

Le ciment Portland hydraté, l'un des constituants de base du béton, contient de l'hydroxyde de calcium plus connu sous le nom de chaux hydratée ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) soluble dans l'eau. Cette solution contenue dans les pores confère au béton son caractère fortement alcalin caractérisé par un pH égal à 12 (le pH désigne l'acidité ou la basicité d'un milieu; son échelle varie de 1 à 14, s'il est inférieur à 7, le milieu est acide et s'il est supérieur à 7, il est basique ou alcalin).

La carbonatation est la transformation de l'hydroxyde de calcium par le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Cette transformation, régie par la réaction chimique indiquée ci-dessous, produit d'une part un sel insoluble qui va se cristalliser dans la masse ou en surface du béton, et d'autre part de l'eau apte à dissoudre une nouvelle quantité de chaux.



La première conséquence de ces réactions qui se poursuivent à partir de la surface est la diminution de la porosité du béton due à la cristallisation des sels de calcium. Donc, un effet positif!

La seconde, non moins importante, est la diminution de l'alcalinité du béton due à la réduction de la concentration en hydroxyde de calcium.

La diminution de la porosité par cris-

tallisation de sels de calcium et la réduction de la concentration en hydroxyde de calcium sont les deux caractéristiques essentielles de la carbonatation du béton.

### Les effets de la carbonatation

Les deux causes distinctes à l'origine de la carbonatation n'entraînent pas nécessairement des dégradations.

La précipitation des sels de calcium forme des cristaux blanchâtres insolubles dans les pores du béton. Il en résulte une diminution de la porosité du béton, et par conséquent, une augmentation favorable de sa compacité et de sa résistance, ainsi qu'une réduction de sa perméabilité à l'eau et aux gaz. Cette même cristallisation peut parfois s'accomplir en surface. Elle provoque alors des efflorescences nuisant à l'aspect esthétique des éléments. Dans des cas plus rares et des conditions plus particulières, les mêmes réactions chimiques peuvent entraîner par les dépôts et l'agglomération de sels cristallisés, l'obturation de canalisations ou de drains.

La dissolution de la chaux provoque une baisse sensible du pH du béton. Dans le cas d'un béton non armé, cette baisse n'aura aucune incidence néfaste sur les caractéristiques des éléments. En revanche, l'alcalinité du béton est l'un des agents inhibiteurs de la corrosion des aciers.

Dans la pratique, la plupart des cas de dégradations du béton par la carbona-

tation ont trait à des faces verticales tels les parapets de balcons, les contre-cœurs, les linteaux, les saillies et bords de dalle. Tous ces éléments ont un point commun: un recouvrement insuffisant de l'armature, soit une distance trop faible entre l'armature et le coffrage, de telle sorte que cette dernière se trouve peu de temps après le bétonnage, dans une zone carbonatée dont le pH se situe vers 9, valeur à laquelle le fer peut se corroder.

En présence d'eau, la corrosion des aciers peut donc s'amorcer. Or, l'oxydation du fer provoque le gonflement de celui-ci qui, s'il n'est pas contre-carré par la résistance du béton d'enrobage, entraîne la fissuration et l'éclatement du recouvrement. Cette fissuration favorise la pénétration de l'eau et accroît le danger d'oxydation de l'acier, un processus irréversible est engagé (fig. 1).

A long terme, on assiste à la dégradation du béton armé et à la perte de résistance de l'acier qui conduisent à un affaiblissement du système statique, qui peut être dangereusement compromis.

La qualité du béton et l'épaisseur du recouvrement jouent un rôle important dans la lutte contre les effets néfastes de la carbonatation. Si l'une ou l'autre s'avère insuffisante, il faudra recourir à des systèmes de protection limitant fortement la diffusion des gaz  $\text{CO}_2/\text{SO}_2$  dans le béton.

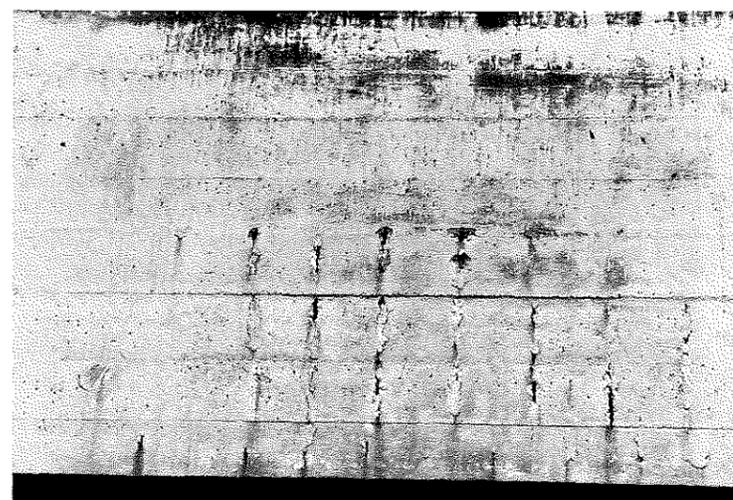


Fig. 1. - Effet de la carbonatation lorsque l'enrobage des armatures est insuffisant.

Dosage en ciment (kg/m³)	Rapport eau/ciment (E/C)	Profondeur de carbonatation (mm) après une durée de			
		24 h	48 h	72 h	96 h
250	0,4	2-7	3-8	4-10	4-12
	0,5	8-10	4-12	7-12	6-13
	0,6	8-20	9-15	12-25	10-20
	0,7	10-25	-	> 25	> 25
300	0,4	2-3	3-8	4-7	3-12
	0,5	2-8	7-13	5-12	3-12
	0,6	7-14	8-20	8-20	8-20
	0,7	15-20	-	20-30	> 25
400	0,4	2-3	2-7	2-7	3-8
	0,5	6-7	5-10	6-18	6-10
	0,6	8-10	10-12	10-12	10-15
	0,7	5-12	20-30	12-25	8-25

Fig. 2. - Influence du dosage en ciment et du rapport E/C sur la progression de la carbonatation

- Quelles sont les qualités requises pour le béton?
  - Quelle est l'épaisseur minimale de recouvrement des armatures?
  - Quels sont les systèmes de protection à préconiser?
  - Quelle est l'influence de ces systèmes sur l'entretien des façades?
- Pour donner quelques éléments de réponse à ces questions, une méthode d'essais de carbonatation accélérée a été mise au point et des tests en laboratoire ont été entrepris depuis 1985. Les résultats, parfois inattendus et surprenants, d'essais comparatifs font l'objet du prochain chapitre.

### Essais de carbonatation accélérée

Une première campagne d'essais a permis de montrer l'influence du dosage en ciment et du rapport eau/ciment (E/C) sur la progression de la carbonatation (fig. 2).

La première observation fut que l'augmentation du dosage en ciment a une influence favorable alors que l'augmentation du rapport E/C a tendance à accentuer la progression de la carbonatation. Ces résultats étaient attendus, car ces deux facteurs interviennent de façon similaire sur la porosité du béton et plus le béton est poreux, plus la diffusion des gaz est importante.

La carbonatation n'est de loin pas le seul critère quant au choix du dosage en ciment. Il faut tenir compte de la résistance nécessaire, de la maniabilité du béton frais et du phénomène de retrait. La quantité d'eau, conditionnée par le dosage en ciment, est majorée afin d'augmenter l'ouvrabilité du béton. Cette majoration peut être limitée par l'emploi d'adjuvants propices à une meilleure fluidité du mélange. Toutefois, même avec un béton d'ex-

cellente qualité, une armature placée à 1 cm de la surface se trouvera en zone carbonatée après une vingtaine d'années. Cela veut dire que si des efforts sont faits pour obtenir un bon béton, peu poreux et compact, des efforts tout aussi importants doivent être entrepris afin d'assurer le recouvrement d'armature minimal qui, selon la norme SIA, est fixé à 30 mm, voire plus selon les cas.

Si les entrepreneurs doivent garantir la distance prescrite entre l'armature et le coffrage, les architectes et les ingénieurs se doivent de concevoir des détails où cette exigence est concrètement réalisable.

Une deuxième campagne d'essais visait à tester différents systèmes de protection qui pourraient pallier une qualité de béton insuffisante (fig. 3). De nombreux produits vendus sur le marché sont dits «anticarbonatation». Parmi eux, certains sont caractérisés par un coefficient de perméabilité au  $\text{CO}_2$  ( $\mu\text{CO}_2$ ) supérieur à 1 000 000, dé-

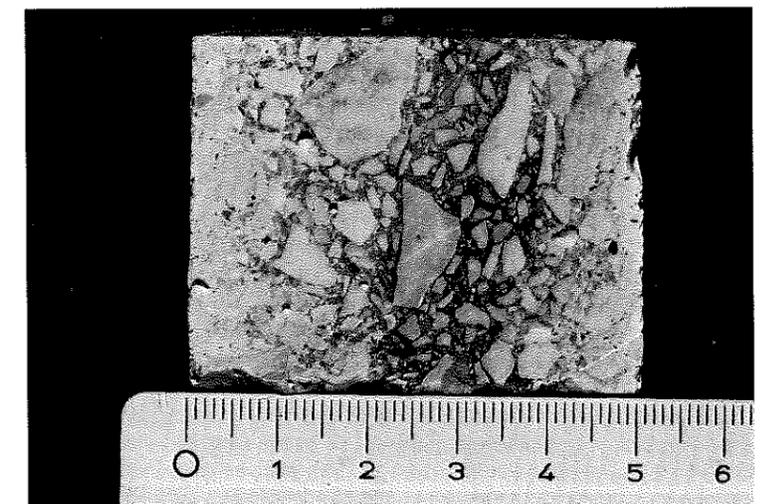


Fig. 3. - Résultat de la carbonatation sur un échantillon de béton préfabriqué. Profondeur de carbonatation de 6,5 mm maximum après vingt-cinq jours d'essai accéléré

terminé par les essais développés par Klopfer à l'Université de Dortmund en Allemagne.

Dans la pratique, ces produits sont appliqués en plusieurs couches de préférence sur un mortier d'adhérence. Quelle est alors l'efficacité de cette barrière anticarbonatation?

Une campagne d'essais avec 13 systèmes différents a été menée et a fait apparaître des différences frappantes entre des produits à priori semblables. Les carottes étaient prélevées dans des plaques en béton à faible dosage en ciment et haut rapport E/C sur lesquelles les fournisseurs avaient appliqué leur propre système anticarbonatation. Lors des essais de carbonatation accélérée, trois échantillons se sont nettement détachés du lot. Ils se différencient des autres par :

- une épaisseur du film protecteur 2,5 à 3 fois plus élevée que la moyenne;
  - une première couche d'accrochage en mortier additionné de résines, qui a la propriété de fermer partiellement les pores du béton;
  - des couches de surface à base de dispersion éthylique polymérisée.
- En revanche, d'autres échantillons ont montré une protection très réduite déjà après vingt-quatre heures d'essais, correspondant à une carbonatation entre 15 et 30 mm après treize ans.

Alors que le coefficient de perméabili-

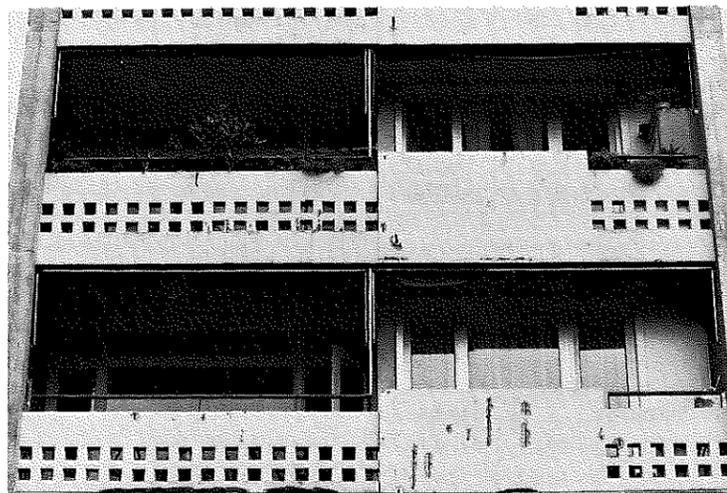


Fig. 4. — Parapets de balcon dégradés par la corrosion des armatures situées en zone carbonatée

té au CO<sub>2</sub> de chacun de ces produits était élevé et semblait être un critère suffisant pour le choix d'un système à appliquer afin d'éviter la carbonatation du béton, on se rend compte que les conditions et les règles d'application différencient ces produits. A partir du moment où le système de protection proposé permet de lutter contre la carbonatation, il faudra encore s'assurer qu'il laisse respirer l'élément de béton, c'est-à-dire qu'il reste perméable à la vapeur d'eau et qu'il ait un comportement correct au vieillissement. Ce dernier point soulève le problème de l'entretien qui sera étudié ultérieurement.

#### Autres causes, mêmes effets

Plusieurs phénomènes peuvent entraîner des dégradations similaires à la carbonatation et dans bien des cas, ils ont des effets cumulatifs. Parmi ces phénomènes, citons les principaux.

##### 1. Gel

L'effet du gel est aussi connu dans le béton que dans la pierre ou la brique et est à mettre en relation avec la porosité du matériau.

Le gel provoque l'augmentation du volume de l'eau qui se trouve dans les pores. Si ces derniers sont saturés, cette augmentation de volume va créer des tensions qui risquent de devenir trop importantes pour le béton.

Il en résultera une fissuration, voire même des éclats en surface.

##### 2. Présence de chlore

Le chlore est un produit hautement corrosif qui attaque l'acier par piqûres. Même l'acier inoxydable, s'il est soumis à des contraintes ou à de la fatigue, est sujet à la corrosion par le chlore.

Ainsi, on a vu des dalles de balcon fortement dégradées par le chlore provenant de l'eau de javel utilisée pour le nettoyage.

##### 3. Joints défectueux et fissuration

Les joints de façades sont soumis aux nombreux mouvements de dilatation et aux conditions climatiques. Leur durée de vie est d'une dizaine d'années environ, après quoi, ils se durcissent et se craquent.

##### 4. Mauvais recouvrement du béton ou recouvrement inadéquat

Dans certains cas, les bétons apparents sont recouverts de crépi ou de carreaux de céramique. Contrairement à une croyance largement répandue, ni les crépis, ni la céramique n'offrent une protection suffisante contre la carbonatation. Par des microfissures dans le crépi ou par les joints des céramiques, des poches d'eau se forment entre le béton et le revêtement de surface. Cette eau risque de corroder les armatures ou, par l'effet du

gel, de provoquer de nouvelles dégradations.

#### Que faire et comment?

##### Une méthodologie à suivre

Trois étapes peuvent être définies afin d'aboutir à la réalisation de l'assainissement d'un bâtiment.

1. Constat visuel et diagnostic conduisant à la définition de la nécessité d'un assainissement
2. Développement d'un concept d'assainissement avec l'établissement d'un devis
3. Etablissement d'une soumission et mise au concours

Après la réalisation, un plan de mesures et de contrôles sera fourni afin de donner au maître de l'ouvrage un document permettant d'établir un dossier de maintenance et d'entretien.

##### 1. Constat visuel et diagnostic

La différence entre l'état actuel, l'état d'origine et l'état voulu, détermine les mesures à prendre.

Avec le temps, les dégradations vont s'accroître et impliquer des travaux plus importants. L'ampleur des dégâts est bien souvent difficile à cerner, car les mesures *in situ* ne sont que ponctuelles et certaines parties de l'ouvrage ne sont pas aisément accessibles. Toutefois, l'expérience a montré que, sur un même bâtiment, la qualité et la mise en œuvre du béton sont assez constantes et les mesures peuvent être extrapolées sur toutes les surfaces extérieures de même conception. Pour les ouvrages d'art, la présence de chlorures est bien souvent la cause prépondérante des dégâts constatés et l'on observe des zones beaucoup plus dégradées sous les effets cumulatifs de la carbonatation et de la corrosion par le chlore.

Il est important de rechercher toutes les causes des dégradations constatées pour pouvoir ensuite étudier les moyens d'y remédier. On distinguera les fissures statiques de celles dues à la corrosion d'une armature sous-jacente.

Dans certains cas, c'est bien la corrosion d'un profilé métallique qui a provoqué l'éclat du béton mais cette corrosion est due à la présence d'eau

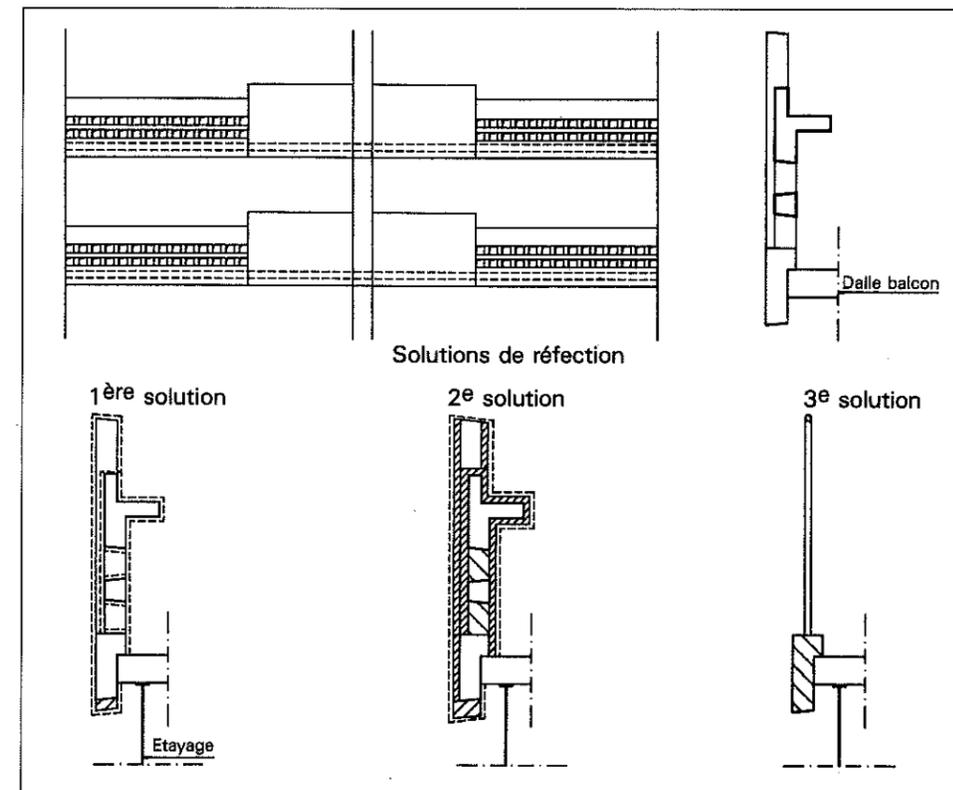


Fig. 5. — Illustration des différentes solutions de réfection des parapets

s'infiltrant dans des fissures de retrait.

En résumé, la nécessité d'un assainissement est déterminée par les réponses à plusieurs questions.

- Quelle est l'ampleur des dégradations?
- Les aciers d'armatures sont-ils en zone carbonatée?
- Y a-t-il des fissures, des boursouffures ou des éclats?
- Les zones saines en apparence sont-elles tout de même atteintes?
- Les éléments porteurs sont-ils atteints?
- Quelles sont les causes des dégradations?

L'établissement d'un tel diagnostic est réalisé par un ingénieur ayant une bonne connaissance des matériaux et de la statique et qui fera éventuellement appel à un laboratoire spécialisé pour des mesures ou essais complémentaires.

##### 2. Procédure d'assainissement

Afin de remédier aux dégradations, différentes procédures d'assainissement peuvent être élaborées. Chaque ouvrage est un cas particulier et, sur un même bâtiment, les interventions peuvent être différenciées suivant les éléments de façade. Mais, quel que soit le concept d'assainissement, l'aspect de l'ouvrage sera modifié. Il importe d'en tenir compte pour l'obten-

tion des autorisations de transformation.

Afin de faire un choix, les mandataires d'un ouvrage doivent répondre à un certain nombre de questions fondamentales.

- Dans quelle mesure est-il possible de modifier l'aspect du bâtiment?
- Veut-on un assainissement à court ou à long terme?
- Peut-on lier l'assainissement des bétons à une réfection plus générale des façades (isolation extérieure, pose de doubles vitrages, etc.)?
- La mise en œuvre nécessite-t-elle des travaux préalables (dépense d'étanchéité, ferblanterie, etc.)?
- Le procédé le moins cher offre-t-il des garanties suffisantes?
- Quelle est l'incidence sur l'entretien futur de l'ouvrage?

Un dialogue entre le maître de l'ouvrage et le mandataire doit donc s'établir afin de définir le contexte global des travaux et leur incidence future.

Les différentes méthodes d'assainissement peuvent être illustrées par l'exemple des parapets de balcons des tours de Carouge (fig. 4). Ces parapets, ajourés de trous de 14 x 14 cm, sont porteurs de la dalle de balcon. Des fers d'armature sont visibles en surface, dans certains trous et dans la partie inférieure proche de la

goutte pendante. Les dégradations visibles sont dues à la carbonatation et à la trop faible épaisseur de recouvrement des armatures.

Les méthodes d'assainissement envisagées selon la figure 5 sont de trois types.

- 1<sup>re</sup> solution: dégagement et traitement des armatures corrodées, puis application d'une protection contre la carbonatation, sous forme d'enduit-peinture après le ragréage et la surface au mortier.
- 2<sup>e</sup> solution: dégagement et traitement des armatures, projection de microbéton et application d'une peinture anticarbonatation.
- 3<sup>e</sup> solution: démolition des parapets, construction d'un sommier pour reprendre la dalle et mise en place de nouveaux parapets métalliques ou en verre.

La première solution est une méthode couramment utilisée pour l'assainissement de béton carbonaté. Elle s'applique parfaitement dans le cas de bandeaux ou contre-cœurs et a pour avantage de ne pas modifier l'esthétique de la façade si ce n'est dans le choix des couleurs. Elle est souvent la moins onéreuse et si elle est effectuée dans de bonnes conditions, la durée de vie peut être estimée à une quinzaine d'années. Dans le cas qui nous préoccupe, elle est réalisable mais la présence des trous la rend plutôt hasardeuse.

La deuxième solution offre une durabilité plus grande. Du point de vue esthétique par contre, elle alourdit sensiblement les éléments; elle est, de ce fait, mieux adaptée à de grandes surfaces telles qu'en présentent les piles de ponts ou les murs aveugles. Dans le bâtiment, elle nécessite bien souvent la dépose et la modification de la ferblanterie ou de l'étanchéité.

La troisième solution apporte des modifications importantes à l'architecture du bâtiment mais offre une bonne garantie de durabilité. En outre, tandis que les deux premières solutions ne peuvent être réalisées qu'en période sans risque de gel, soit d'avril à octobre, à moins de prendre des précautions spécifiques, celle-ci ne nécessite pas l'interruption des travaux en hiver. (A suivre)