

Chapitre IV- La Carbonatation

1- Définition de la carbonatation

Toutes les considérations sur le comportement du béton sont généralement basées sur l'hypothèse que l'air constitue le milieu ambiant et qu'il ne réagit pas avec la pâte de ciment hydraté. Cependant dans la réalité, l'air contient du CO_2 qui en présence d'humidité réagit avec le ciment hydraté. Ce phénomène est appelé la carbonatation atmosphérique et qui constitue l'épiderme du béton tout au long de sa vie. C'est le vieillissement naturel des matériaux à base de liant minéral.

Le CO_2 de l'atmosphère pénètre dans le béton, se dissout dans l'eau interstitielle qui se trouve dans certains pores en formant l'acide carbonique puisque le CO_2 gazeux n'est pas réactif. Cette acide carbonique réagit avec l'hydroxyde de calcium $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ sous forme de Portlandite, ou les silicates de calcium hydratés $[\text{C-S-H}]$, pour former du carbonate de calcium $[\text{CaCO}_3]$ en libérant de l'eau. L'action du CO_2 se manifeste même à de faibles concentrations qu'on retrouve dans l'air en milieu rural, où la teneur en CO_2 est d'environ 0,03 % en volume. Le pourcentage moyen est de 0,3 % dans les grandes villes.

Compte tenu de l'absence d'échanges gazeux, les bétons immergés ne carbonatent pas. Il est à remarquer que des manifestations de carbonatation peuvent survenir sur des faces intérieures de béton lors de climatisation et d'humidification de l'air ambiant. Les photos de la figure suivante illustrent des cas de dégradation dus au phénomène de carbonatation.



Figure 1 : Photos présentant le cas d'une carbonatation atmosphérique

2- Description du phénomène

La carbonatation progressive s'accompagne d'une diminution du pH de la solution interstitielle dans la pâte de ciment durci qui passe d'une valeur de l'ordre de $\approx 12,6$ à 13 à une valeur inférieure à 9 comme le montre la figure 2 montrant l'action du CO_2 sur une paroi de béton. Lorsque le front de carbonatation atteint les armatures, celles-ci sont dépassivées "le film passif est détruit". La corrosion des armatures peut se développer. Il faut noter que la carbonatation n'altère pas forcément les propriétés mécaniques et de transfert du béton, il semble même qu'elle les améliore dans certains cas. En fait, elle met en danger uniquement les armatures si elles sont atteintes par le front de carbonatation. Lors de sa formation, la rouille foisonne et fait éclater l'épiderme du béton (rupture de l'enrobage) déplaçant du même coup le front de carbonatation et la figure 3 montre l'attaque de l'acier par la rouille à la suite du phénomène de carbonatation.

A partir d'une distance de 25 à 30 mm à l'intérieur du béton il n'y a plus d'échange gazeux grâce aux dépôts de calcaire de la pâte du ciment, le pH reste stable à une valeur d'environ 11, la corrosion ne se manifeste pas.

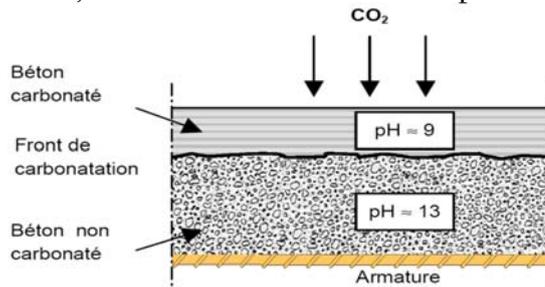


Figure 2 : Action de la carbonatation



Figure 3 : Phénomène de corrosion suite à la carbonatation en fonction du temps

3- Le processus chimique de la carbonatation

L'agent responsable de la carbonatation est l'acide carbonique (H_2CO_3) puisque le CO_2 gazeux n'est pas réactif.

Le processus chimique de la carbonatation dans le béton se compose en trois étapes.

- Diffusion du dioxyde de carbone [CO_2] dans le béton .
- Dissolution du CO_2 dans l'eau contenue dans les pores (solution interstitielle) en formant l'acide carbonique selon la réaction (1) :



- Réactions chimiques entre l'acide carbonique et les produits d'hydratations du ciment [$Ca(OH)_2$, CSH et CAH] et la formation de l'élément principal qui est le carbonate de calcium ou la calcite sous forme de poudre blanchâtre [$CaCO_3$] et la libération de l'eau, réactions (2) et (3) :



La figure 4 montre une illustration d'un cristal de Portlandite sain et la photo de la figure 5 montre l'infection de ce cristal par la carbonatation.

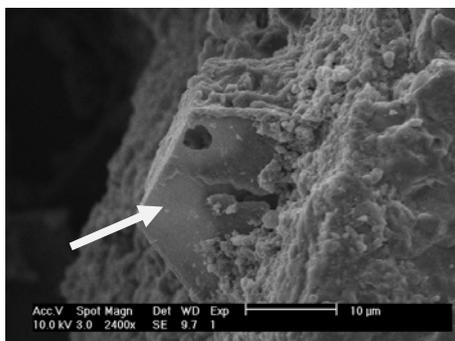


Figure 4 : Photo d'un cristal de Portlandite sain

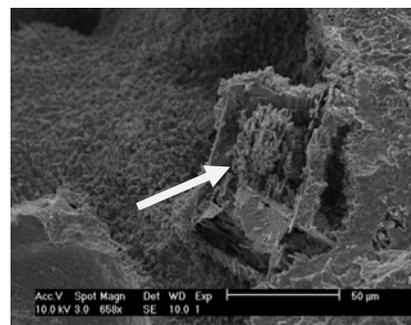


Figure 5: Photo d'un cristal de Portlandite en cours de carbonatation

4- Effets et Conséquences de la carbonatation

Sur la matrice béton, l'effet de la carbonatation est bénéfique. En effet, ses pores peuvent être colmatés par le carbonate formé. Ceci entraîne des fois un gain de poids et une amélioration sensible de la résistance mécanique. Un béton carbonaté résisterait beaucoup mieux à l'action des eaux agressives. Comme le montre la figure 6, la carbonatation est devenue un outil de cicatrisation des fissures de petites tailles. Toutefois, si les fissures évoluent, il est dangereux de surestimer l'effet positif du phénomène.

Cependant, la carbonatation est néfaste pour le retrait qui enregistre une augmentation. Comme connu, le retrait est toujours accompagné de perte de poids, or dans le cas de la carbonatation le retrait augmente mais le poids aussi du matériau augmente par fixation du CO₂. La principale conséquence de la carbonatation est l'amorce de la corrosion des armatures. Ceci est le résultat d'une neutralisation progressive de l'alcalinité du ciment d'autant plus rapidement que la porosité du matériau est plus grande. Le milieu très basique au départ (pH de 12,6 pour une saturation en chaux) perd peu à peu cette basicité et le pH passe de 12,6 à 10. Ainsi, lorsque la carbonatation est complète à un endroit donné, les armatures ne sont plus protégées de l'oxydation.

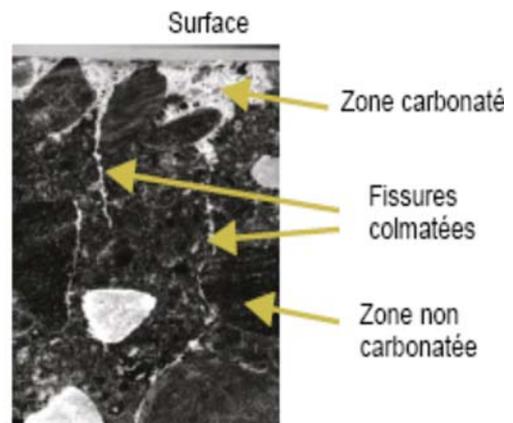


Figure 6 : Photo montrant le colmatage des fissures par la carbonatation

5- La profondeur de carbonatation

La carbonatation commence à la surface du béton (épiderme) en progressant de l'extérieur vers l'intérieur du matériau et concerne une certaine épaisseur de ce matériau (dite profondeur de carbonatation).

La profondeur attendue de la carbonatation se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$C^d = K \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

où C^d : Profondeur de la carbonatation en mm ;

K : Coefficient de carbonatation ; en mm/an^{0,5} (selon A. Neville)

t : temps d'exposition du matériau, en années

Toutefois, la progression de la carbonatation ne peut être déterminée avec précision par cette formule simplifiée. En effet, le coefficient dépend des paramètres de formulation du béton et de ses conditions d'exposition (humidité, température,...). Pour avoir une prévision approximative d'évolution de la carbonatation, des lois empiriques ont été testées afin d'arriver à une valeur constante de ce coefficient en tenant compte des conditions d'exposition.

6- La vitesse de carbonatation

Après un temps assez court de 1÷3 mois, la vitesse de carbonatation devient à peu près inversement proportionnelle à la profondeur déjà carbonatée car la couche superficielle de carbonate formée freine la diffusion du gaz carbonique.

D'après certaines études, sur des constructions et à partir des résultats des mesures effectués depuis de nombreuses années sur des structures à l'air libre [8], il apparaît que la carbonatation progresse suivant la relation suivante :

$$d = [3,3 - 0,15 c] t^{0,6} \quad (2)$$

où, **d** : est la profondeur de carbonatation en mm

c : l'épaisseur de l'enrobage de béton en mm
t : le temps en années (Figure 7)

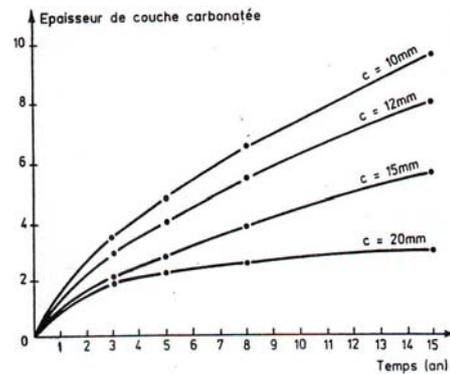


Figure 7 : Evolution de la carbonatation

Cette relation est valable pour l'enrobage faible avec c inférieur à 15 mm, la progression de la carbonatation est décrite par la relation suivante :

$$d = 1,5 t^{0,25}$$

Lorsque l'épaisseur de la rouille sur l'armature atteint 0,15 à 0,2 mm, la corrosion due à la carbonatation est accélérée du fait que la rouille peut fissurer l'enrobage du béton. Ainsi l'oxygène de l'air et l'humidité pénètre et atteignent plus facilement les armatures.

7- Principaux facteurs influant la carbonatation

A/ Paramètres Intrinsèques :

➤ La Nature et le dosage en Ciment :

Plus le ciment renferme de chaux et plus la carbonatation est lente. Inversement, des ciments à forte teneur en constituants secondaires se carbonatent plus rapidement, surtout si le béton n'a pas été maintenu humide dès les premiers jours (figure 8).

La solubilité dans l'eau du CaCO_3 est presque 100 fois moindre que celle du Ca(OH)_2 . Cependant une amélioration de la stabilité du ciment durci dans les eaux douces est obtenue grâce à l'introduction dans le ciment d'additions minérales. Ils fixent Ca(OH)_2 en une combinaison peu soluble, le silicate de calcium hydraté selon la réaction 4, mais cette réaction est très lente.

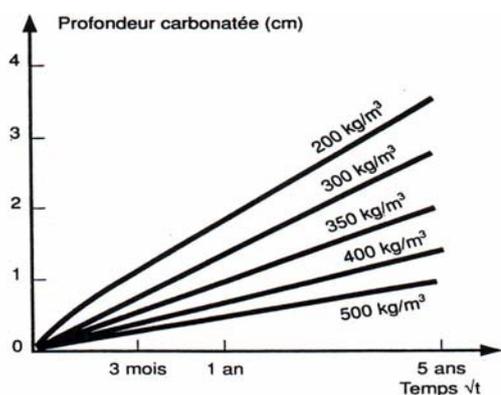


Figure 8 : Evolution de la carbonatation en fonction du dosage en ciment.



La finesse du ciment joue un certain rôle : la carbonatation se fait un peu plus lente lorsque la finesse de mouture et le dosage en ciment sont plus élevés.

➤ **Le rapport Eau/Ciment :**

Le rapport Eau/Ciment exerce une grande influence sur le réseau poreux de la pâte de ciment hydraté. Lorsque ce rapport est faible, les espaces entre les grains de ciment sont étroits, ce qui favorise davantage la formation d'hydrates d'où une densification de la structure du matériau. Moins de pores, la diffusivité devient lente donc la carbonatation se trouve freinée. Cela est illustré par la figure 9. Ainsi l'excès d'eau favorise : la ségrégation, la baisse des résistances mécaniques et l'augmentation de la porosité interne.

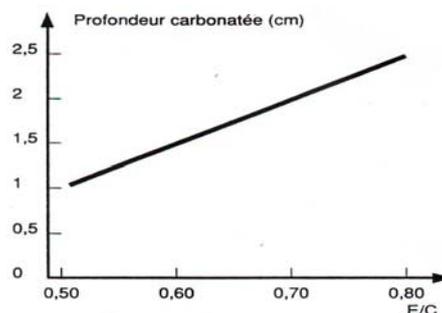


Figure 9 : Influence du rapport E/C sur l'épaisseur carbonatée au bout de 3 ans

B/ Paramètres extrinsèques :

➤ **L'humidité relative :**

L'humidité relative de l'air est un facteur catalyseur de la carbonatation. La vitesse de la carbonatation est maximale lorsque l'humidité relative est :

- Assez faible pour permettre la diffusion du CO₂.
- Assez importante pour permettre la réaction de carbonatation.

Dans les environnements secs, la quantité d'eau est insuffisante pour dissoudre le CO₂, alors que dans les environnements très humides, le béton étant saturé, la diffusion de CO₂ est considérablement ralentie.

Ces deux phénomènes sont illustrés par la figure 10, où on observe une carbonatation maximale pour une humidité relative voisine de 65 %.

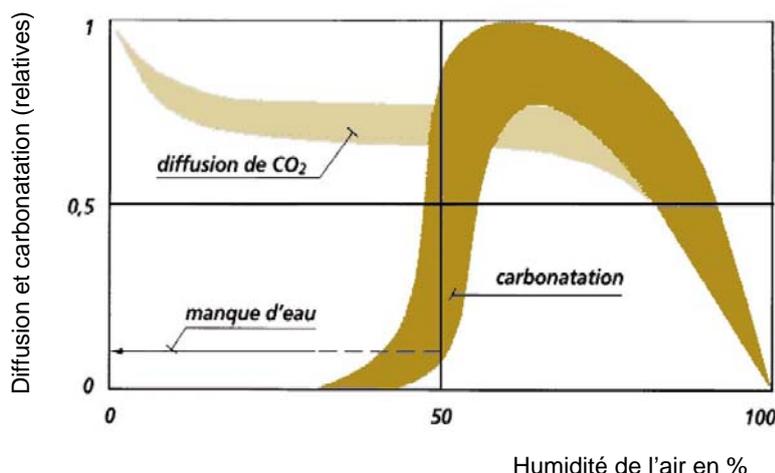


Figure 10 : Vitesse de diffusion du CO₂ et vitesse de carbonatation en fonction de l'humidité de l'air

➤ **La Température et la concentration de CO₂ :**

De faibles variations de température ont peu d'effets sur la carbonatation. Cependant, une hausse importante de température accélère la carbonatation si bien sur celle-ci ne devient pas un outil de séchage et la dissolution du CO₂ devient impossible par absence d'eau.

La carbonatation peut se dérouler même à de faibles concentrations de CO₂, taux généralement relevé dans l'air en milieu rural. Le degré de carbonatation du béton augmente avec la teneur de CO₂. C'est les raisons pour lesquelles les structures en milieux urbains et industriels se trouvent plus affectées par la carbonatation.

➤ **Mise en œuvre et conservation :**

Une mise en œuvre énergique et un serrage puissant augmentent la compacité du béton et améliorent son étanchéité à l'eau et à l'air. Inversement, plus le béton est poreux et plus la vitesse de carbonatation est rapide.

Une conservation humide dès les premiers jours améliore l'imperméabilité du béton, fait croître ses résistances mécaniques et freine la vitesse de carbonatation. La cinétique de carbonatation est faible lorsque le béton est immergé dans l'eau ou lorsqu'il est placé dans un environnement très sec.

8- Techniques d'investigation

Les techniques d'investigations et les méthodes de quantification de la carbonatation dépendent des potentiels employés.

A/ Mesure de la carbonatation de façon simple.

La technique la plus simple pour la mesure de la profondeur de carbonatation des bétons consiste à utiliser sur surface de béton fraîchement rompue une solution de **phénolphthaléine**. Celle-ci est un indicateur de pH coloré dont le virage se situe à la valeur 9. Si la zone est carbonatée (pH < 9) reste incolore, tandis que celle non carbonatée comportant du Ca(OH)₂ (pH > 9 et allant jusqu'à 13) prend une teinte rosée. Ce test permet une mesure fiable et rapide de la profondeur de carbonatation dans le cadre de diagnostic d'ouvrages.

Le mode opératoire consiste à :

- Pulvériser sur une coupe de l'échantillon une solution de phénolphthaléine.
- Observer le virage de cet indicateur pour un pH de l'ordre de 9, la partie carbonatée reste incolore, tandis que la zone saine prend une coloration rose comme illustrer par la photo de la figure 11.

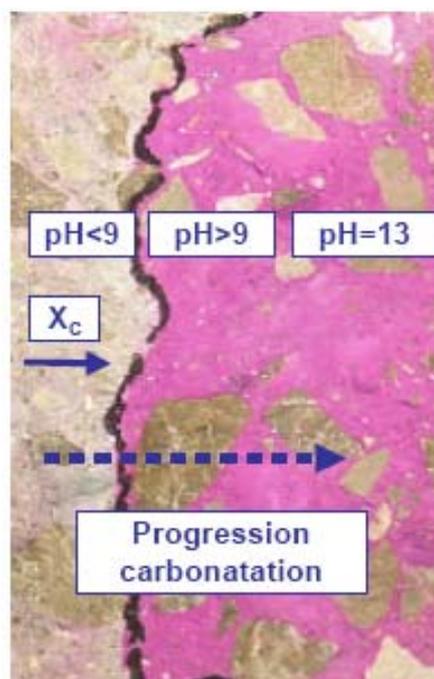


Figure 11 : Visualisation du front de carbonatation par pulvérisation de phénolphthaléine

Il est à noter que l'essai à la phénolphthaléine n'est pas utilisable pour les ciments aluminieux puisque, contrairement au ciment Portland ne contiennent pas de chaux libre.

B/ Prélèvement par carottage pour examen au laboratoire :

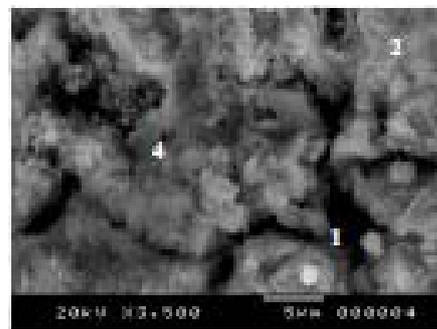
Pour les besoins d'examens au laboratoire des échantillons cylindriques sont prélevés des parties dégradées. Les carottes sont généralement de dimensions : 50 mm de diamètre et de 75 à 100 mm de longueur et ceci pour ne pas trop défigurer les façades. Les tests pratiqués sur ces carottes sont :

- L'analyse chimique pour retrouver le dosage d'origine de béton ; sa granulométrie ; sa densité et sa porosité ; déceler d'éventuelles anomalies de composition.
- L'observation des dépôts en diffraction des rayons X apporte une identification des principales espèces cristallines présentes.
- L'examen en microscopie électronique à balayage (MEB) permet de décrire la microstructure du béton, les phases altérées (alcali-réactions, produits de dégradation,...). Les illustrations de la figure 14 prises au MEB, montrent des exemples d'échantillons sain et carbonaté

Echantillon carbonaté



Echantillon non carbonaté



- 1 : Pore
- 2 : Ca(OH)₂
- 3 : CaCO₃
- 4 : Ettringite

Figure 14 : Photos d'échantillons observés au MEB

- Les cristaux de CaCO₃ apparaissent avec une coloration claire due à leur forte densité.
- Les parties noires correspondent à la porosité.
- L'étringite se présente sous forme d'aiguilles.

C/ Analyse Thermogravimétrique :

Cette technique consiste à suivre la perte du poids en fonction de la température d'un matériau donné (figure 15). Le phénomène de décarbonatation est généralement relevé à partir d'une température de 600 °C, selon la réaction suivante :

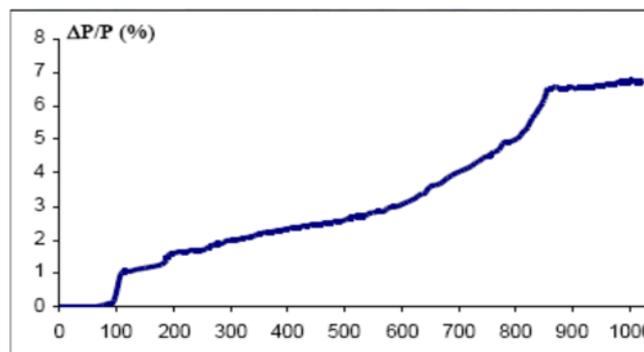


Figure 15 : Exemple de thermogramme d'un mortier

9- Les méthodes de réparation

Le degré atteint par la carbonatation conditionne les étapes de restauration qui doivent être appliquées.

➤ Cas de carbonatation avec éclat et armatures apparentes :

L'illustration de la figure 17 montre un cas de dégradation du béton où la corrosion des armatures est bien présente.

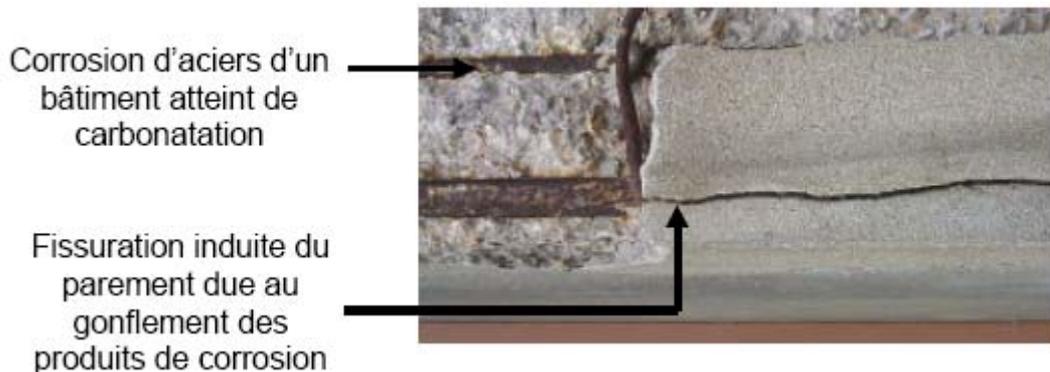


Figure 17 : Eclatement du béton sous l'effet de la corrosion des armatures

Pour la restauration, diverses opérations doivent être entreprises :

- Elimination des zones dégradées par une réfection de qualité : Avant d'appliquer le traitement général au niveau de toutes les zones dégradées (Armature apparentes, éclatement de béton, trace de rouille..), il est impératif d'éliminer l'intégralité de cette altération qu'elle soit foisonnante ou de surface par décapage et brossage soignés ou par des moyens mécaniques (sablage, hydrosablage...).
- Décapage par sablage des armatures : Une application de protection, sur toute la surface des armatures (périphérie complète) d'un produit assurant leur protection vis-à-vis la corrosion, et couper celles très corrodées.
- Protection des fers par un revêtement alcalin.
- Réalisation de l'adhérence à la structure : Par l'emploi de mortier à base de résine, qui doit être conforme à la norme ou possède des propriétés équivalentes.
- Application d'un enduit de finition : Il doit être micro-perméable et éventuellement d'une peinture microporeuse.

La photo de la figure 18 montre une technique de restauration d'une surface altérée par la carbonatation. Ce moyen consiste en l'application d'une solution aqueuse en plusieurs passes par pulvérisation basse pression, solution la plus simple et adaptée aux traitements de faible profondeur.



Figure 18 : Technique de restauration d'une surface atteinte par la carbonatation

➤ **Cas de carbonatation sans ou avec très peu de dégâts :**

Il est possible de réalcaniser le béton et donc de recréer un environnement fortement basique autour des armatures, par infiltration de substances alcalines. Cette solution respecte les caractéristiques, esthétique et géométriques initiales de l'ouvrage.

Cette technique consiste en l'application contre la surface à traiter d'un "manteau" composé d'une pâte cellulosité, imbibé d'une solution alcaline installée contre un treillis métallique.

Une circulation électrique est mise en place entre l'armature du béton et le "manteau". En deux à trois semaines la solution alcaline est passée dans le béton. Le milieu est à nouveau non corrosif.

Il convient ensuite de laver la surface et d'y appliquer une peinture microporeuse.

Conclusions :

La bonne connaissance du phénomène de carbonatation permet de mettre à profit cette propriété soit en protégeant le béton, soit la limitant, soit au contraire en la favorisant si la compacité est recherchée (grâce à une carbonatation accélérée).

Pour avoir un béton durable et résistant aux agressions. Quelques précautions simples sont suffisantes, dans la plupart des cas, pour assurer la pérennité des ouvrages :

- Le béton doit être un matériau compact, c'est-à-dire avoir une porosité minimale. Cette qualité est obtenue à partir de la notion de composition optimale où intervient le dosage en ciment, la taille des granulats et la teneur en eau.
- Prévoir une cure importante après coulage (maintenir la surface humide pendant plusieurs jours).
- Certains impératifs doivent également être respectés lors de la mise en œuvre du béton : serrage, délai de mise en place,.....
- Assurer la protection des armatures par un enrobage d'acier plus épais et plus compact.
- Protections des surfaces du béton en appliquant des enduits protecteurs sur la surface du béton ou en utilisant les peintures anti-carbonatation ou les traitements hydrofuges.
- Pour des ouvrages particuliers en milieux très exposés, il est possible d'utiliser des armatures zinguées, revêtues de composés époxydiques ou en acier inoxydable.
- Pour le cas des ouvrages d'art, un contrôle permanent est conseillé. En cas d'apparition sur l'ouvrage d'efflorescences (blanchâtres, couleur de rouille...) leur localisation, leur relation avec les fissures, et surtout l'évolution de ces efflorescences en fonction du temps.