

# Restauration des bâtiments en béton armé

par **Marc MAMILLAN**

Ingénieur de l'École du Bâtiment et des Travaux Publics  
Conseiller Technique au CEBTP (Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics)

<b>1. Corrosion des armatures .....</b>	<b>C 2 350 - 2</b>
1.1 Hétérogénéité du béton .....	— 2
1.2 Processus de protection des armatures .....	— 2
1.3 Déroulement du processus de corrosion .....	— 3
1.4 Conséquences de la corrosion .....	— 4
1.5 Carbonatation .....	— 4
1.6 Dispositions préventives contre la corrosion .....	— 5
<b>2. Mesure de l'épaisseur d'enrobage des armatures .....</b>	<b>— 6</b>
2.1 DéTECTEURS CLASSIQUES .....	— 6
2.2 EXEMPLES D'APPLICATIONS .....	— 7
2.3 MéTHODES DE DÉTECTION DE LA CORROSION DES ARMATURES .....	— 7
<b>3. Fissuration .....</b>	<b>— 8</b>
3.1 Causes les plus fréquentes .....	— 8
3.2 DéFINITION ET CLASSIFICATION DES FISSURES .....	— 8
3.3 TECHNIQUES DE RÉPARATION .....	— 9
3.4 PRODUITS DE RÉPARATION .....	— 9
<b>4. Altération des surfaces en béton sous l'action du vent .....</b>	<b>— 11</b>
<b>5. Réparation externe du béton : éclatements, destructions accidentelles .....</b>	<b>— 11</b>
5.1 Réparation externe .....	— 11
5.2 État de surface du béton .....	— 12
5.3 Adhérence du produit rapporté au béton .....	— 12
<b>6. Nettoyage du béton .....</b>	<b>— 12</b>
6.1 Projection d'eau chaude ou surchauffée sous pression .....	— 12
6.2 Sablage à sec .....	— 13
6.3 Sablage hydropneumatique .....	— 13
6.4 Projection basse pression de microfibres de verrerie .....	— 13
6.5 Procédés chimiques .....	— 13
6.6 Traitement pour l'enlèvement des salissures diverses .....	— 13
6.7 Taches sur le béton .....	— 13
<b>7. Traitement de la surface du béton .....</b>	<b>— 14</b>
7.1 Traitements durcisseurs .....	— 14
7.2 Hydrofuges de surface .....	— 14
<b>8. Traitement anti-graffitis .....</b>	<b>— 14</b>
<b>9. Protection des surfaces en béton (peinture, revêtement) .....</b>	<b>— 15</b>
9.1 Préparation des supports .....	— 15
9.2 Produits de protection des parements en béton .....	— 15
<b>Pour en savoir plus .....</b>	<b>Doc. C 2 350</b>

**L**es matériaux de construction ont, sans exception, une durée de vie limitée. Au fil des temps, tout ouvrage connaît plus ou moins rapidement des altérations. Le béton et le béton armé, dont nous avons une expérience de durabilité de l'ordre d'un siècle, n'échappent pas à cette règle. En fin de compte, tout ouvrage exposé aux intempéries doit être entretenu, réparé, ou même refait ou remplacé.

Le point faible du béton armé, qui met le plus en péril sa pérennité, est son armature. En effet la corrosion des parties métalliques constitue un danger potentiel pour la conservation et la stabilité des bâtiments. Ce phénomène se traduit par l'apparition, en surface exposée à l'extérieur, de différentes altérations (taches de rouille, fissures, épaufrures...).

Si certaines mesures préventives ou confortatives ne sont pas appliquées, ces phénomènes physico-chimiques peuvent s'amplifier et entraîner une détérioration du béton armé qui n'assurera plus sa fonction porteuse. La détection aussi rapide que possible du début de la corrosion des aciers, avant que le processus atteigne un degré critique, est fondamentale.

La rapidité d'intervention permet, en agissant sur un matériau encore sain, de ralentir ou même d'arrêter totalement le mécanisme de corrosion.

## 1. Corrosion des armatures

Le béton est une matière dont la constitution n'est pas stable et évolue dans le temps. Cette transformation entraîne, au point de vue global, à l'échelle des éléments, des modifications dimensionnelles. En ce qui concerne la structure du composite interne, aux échelles macro et microscopique, les composés d'hydratation du liant sont l'objet de différentes combinaisons. Comme nous le verrons au paragraphe suivant, le béton est hétérogène et les phénomènes de diffusion sont complexes. Les espaces vides (pores et capillaires) contenant de l'air ou différentes solutions jouent un grand rôle dans le processus de solidification des cristaux constituant la phase liante, qui englobent et assurent les liaisons avec les granulats inertes.

### 1.1 Hétérogénéité du béton

À partir d'une composition initiale de mélange, parfaite à la fin du malaxage, la mise en œuvre du béton à l'état frais, dans des pièces de formes variées, constitue l'action technologique la plus délicate à réaliser en pratique pour que le mélange mis en place reste homogène.

Un ensemble de recherches réalisées sur des pièces en béton en vraie grandeur et des mesures et prélèvements effectués sur plusieurs bâtiments et ouvrages d'art conduisent à classer ces différences de structures en deux catégories :

— hétérogénéité à l'échelle de plusieurs dizaines de centimètres dans la hauteur des pièces de grande hauteur, poteaux, voiles verticaux ;

— hétérogénéité à l'échelle de quelques dizaines de millimètres entre la qualité du béton au cœur et le béton de parement.

Ces hétérogénéités provoquent des variations de qualité du béton, très importantes, modifiant les principales caractéristiques.

La résistance mécanique d'un poteau peut être 30 à 50 % plus faible en haut qu'en bas. La porosité d'un béton constituant la peau d'une poutre (35 mm du parement) peut être de 20 % supérieure à celle du cœur.

Plusieurs facteurs sont responsables de ces différences. Le problème résulte de la difficulté de compacter d'une façon identique le béton frais qui, par gravité, se met en place d'une façon différente suivant l'emplacement dans les coffrages. Sur les parois latérales, la mise en place des granulats les plus gros (de diamètre  $D$ ) est gênée si la distance  $e$  de passage entre les armatures ne respecte pas la règle suivante :  $e > 1,8 D$ .

Par ailleurs, la répartition de l'eau de gâchage, après séchage du béton, montre que la perte d'eau s'effectue surtout dans les 30 à 50 mm à partir du parement.

Les conséquences de cette diminution de la teneur en eau sont très importantes sur les propriétés du béton. La couche périphérique a une qualité mécanique (résistances en compression et en traction) beaucoup plus faible que la partie interne. L'hydratation du ciment, qui est totale au cœur, n'est que partielle pour le béton de revêtement (l'analyse complète de ce phénomène a été développée dans plusieurs publications [1] [2]). L'inconvénient principal de ce phénomène est qu'il réduit la durabilité du béton de revêtement. La protection des armatures contre les risques de corrosion est plus faible (porosité du béton plus élevée de 20 % que celle du cœur), l'eau évaporée a laissé la place à des vides d'air.

### 1.2 Processus de protection des armatures

La protection des armatures est liée à deux processus :

- chimique, par l'alcalinité produite lors de l'hydratation du ciment ;
- physique, par l'enrobage agissant comme une barrière vis-à-vis de l'environnement.

Immédiatement après sa mise en place, le béton jeune entourant les armatures constitue une barrière protectrice, car l'hydratation du liant hydraulique libère de la chaux et des sels alcalins. Il se produit à la surface de l'acier une fine couche dite de passivation qui protège l'armature. Ce film protecteur est constitué d'oxydes ou d'hydroxydes. D'après les diagrammes tension-pH fondamentaux, la composition de cette pellicule protectrice comprend soit du  $\text{Fe(OH)}_2$ , du  $\text{Fe(OH)}_3$ , du  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ou  $\text{FeOOH}$  selon les oxydes pris en compte. En fait, la nature exacte du film passif dépend du pH, du potentiel de l'acier et de la teneur en oxygène du milieu. Son épaisseur est très faible (quelques nanomètres).

La seconde barrière qui sert de couverture aux agents de l'environnement extérieur est constituée par l'épaisseur et la qualité du béton de recouvrement. Suivant la constitution de ce béton (forte compacité, faibles porosité et perméabilité), un écran plus ou moins important s'oppose aux agents agressifs, gaz carbonique de l'air qui neutralise l'alcalinité du béton et chlorures. Bien entendu, si les matériaux utilisés (ciments, eaux, granulats, adjuvants) contiennent par nature des chlorures, ils seront les premiers générateurs de la corrosion.

### 1.3 Déroulement du processus de corrosion

Le mécanisme comprend deux phases.

La première, dite **phase d'incubation**, dépend en grande partie des processus assurant le transport des éléments agressifs jusqu'à l'armature, mais aussi des réactions chimiques se produisant au sein du béton et des réactions électrochimiques à l'interface.

La seconde phase est la **période de croissance** pendant laquelle la corrosion se poursuit avec une certaine vitesse, conduisant à la formation de la rouille et aux états ultimes de dégradation.

La pénétration des agents agressifs (figure 1) s'effectue sous forme gazeuse (molécules d'air ou de  $\text{CO}_2$ ) ou ionique. Les processus de transport font intervenir les phénomènes de diffusion et de convection (sous l'effet des gradients de température) ou de capillarité.

La diffusion obéit aux lois de Fick. Les gaz sont transportés en phase gazeuse ou aqueuse mais la vitesse de diffusion des gaz dans l'eau est  $10^4$  fois plus grande qu'elle ne l'est dans l'air. L'état de saturation en eau du béton de recouvrement affecte essentiellement la résistance à la diffusion des gaz.

Les mouvements de l'eau sont très importants, ils assurent en grande partie le transport d'ions ou de molécules dissous. Ils sont dus à des variations de température, de pression ou au contact entre le béton et l'eau liquide (immersion, pluie, condensation). La peau du béton est le plus souvent soumise à des cycles de séchage-humidification.

Les fissures du béton ont un rôle à part (figure 2). Ce sont en effet les passages préférentiels pour le milieu ambiant. Dans le cas où elles pénètrent jusqu'à l'armature, le temps d'initiation est très court. Il se produit tout d'abord une perte d'adhérence locale, pouvant se propager suivant le profil de l'acier. Le milieu agressif environnant pénètre alors jusqu'à l'acier, pour dépassiver localement le métal (figure 3). Parallèlement, le front de progression des agents agressifs se modifie et il est possible que la microfissuration joue un rôle dans ce domaine (figure 4).

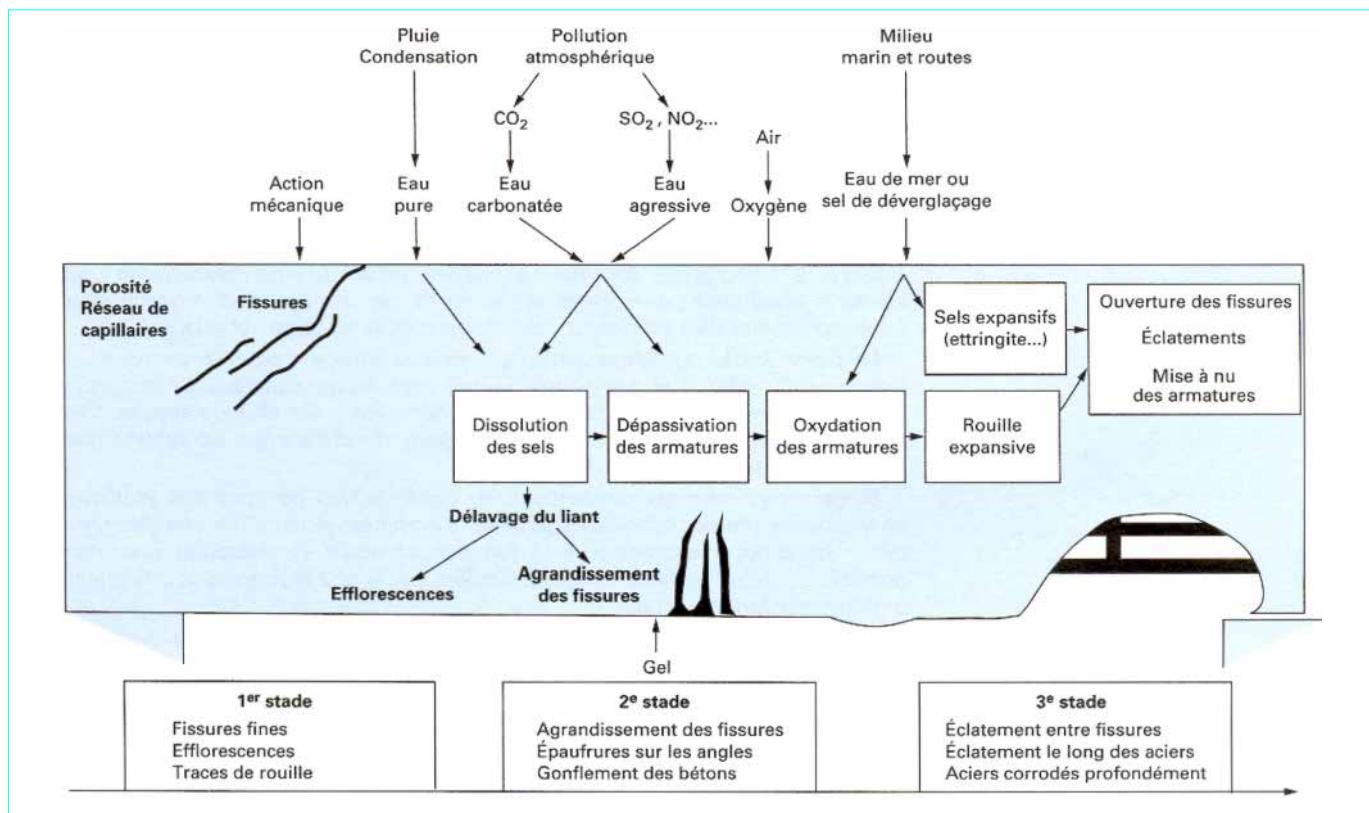


Figure 1 – Processus de corrosion (d'après M. Ducrot, Sté SIKA)

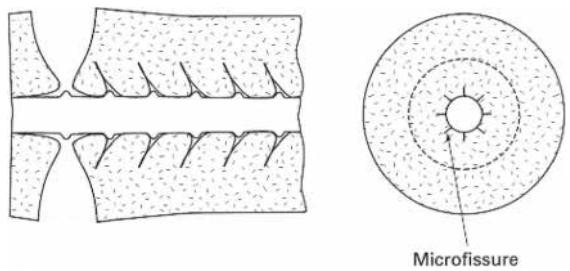


Figure 2 – Déformation du béton autour de l'acier, après formation de fissures internes (d'après G. Taché, CEBTP)

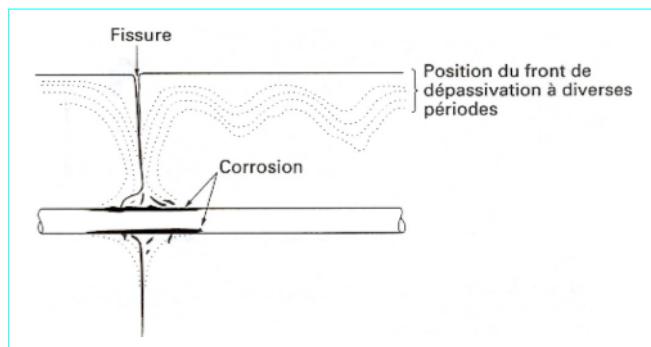


Figure 3 – Avancement du front de dépassivation en fonction du temps (d'après G. Taché, CEBTP)

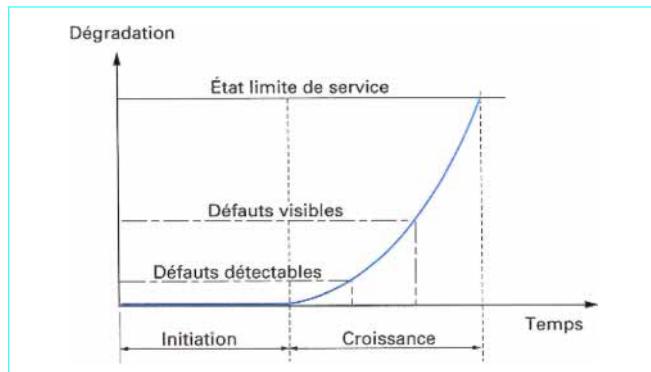


Figure 4 – Évolution de la dégradation d'une structure en béton armé (d'après G. Taché, CEBTP)

## 1.4 Conséquences de la corrosion

La corrosion de l'acier provoque la réduction de la section de l'armature (partiellement, localement ou en totalité). De plus, la réaction chimique de formation de la rouille (mélange d'oxydes et d'hydroxyde de fer) s'effectue avec une expansion (le volume de l'acier devient 3 à 4 fois supérieur). Ce gonflement provoque dans le béton des contraintes d'expansion importantes, supérieures à la résistance à la cohésion du béton. La manifestation visuelle qui en résulte se présente sous forme de fissures en surface qui s'amorcent à partir de l'acier (figure 5).

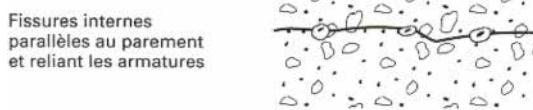
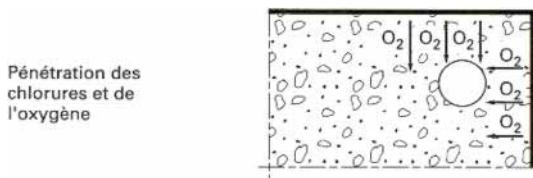


Figure 5 – Fissurations dues à la corrosion

Des fissures internes reliant les armatures peuvent aussi disloquer le béton. La décohésion peut présenter des pustules ou des plaques de béton. Les manifestations diffèrent selon l'épaisseur du béton, l'écartement et le diamètre des aciers. Il en résulte que l'élément ne fonctionne plus, au point de vue de la résistance des matériaux, comme il avait été calculé primitivement (figure 6). À la limite, cet état de déséquilibre peut entraîner la ruine par l'effondrement de l'ouvrage.

## 1.5 Carbonatation

Les bétons exposés à l'atmosphère se carbonatent plus ou moins rapidement. Le dioxyde de carbone qui pénètre à la surface du béton réagit avec les constituants alcalins contenus dans la pâte du ciment, surtout le calcium.

Pendant le durcissement du béton, de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se forme. Avec le temps, celle-ci associée au dioxyde de carbone crée du carbonate de calcium ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ).

Cette carbonatation a pour conséquence une modification lente de la structure du matériau et un changement de son comportement.

La carbonatation génère deux propriétés antagonistes :

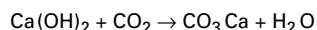
- elle est bénéfique en améliorant la résistance mécanique et la résistance aux eaux agressives ;
- elle est néfaste en réduisant la protection chimique des armatures.



**Figure 6 – Corrosion de l'armature métallique d'un balcon.**  
Sous l'effet de la corrosion des armatures, le béton armé de recouvrement s'est fissuré et a éclaté.  
Ces destructions mettent en cause la stabilité de ce balcon

### 1.5.1 Déroulement du phénomène

La chaux provenant de l'hydratation des silicates de calcium bi et tricalciques  $\text{SiO}_2$ ,  $2\text{CaO}$  et  $\text{SiO}_2$ ,  $3\text{CaO}$  se carbonate plus facilement (cas des ciments Portland) pour donner du carbonate de calcium, suivant la réaction :



Chaque molécule de gaz absorbé (44 g) libère une molécule d'eau (18 g). Cette carbonatation s'effectue avec gain de masse. Elle progresse du parement vers l'intérieur et provoque une neutralisation progressive de l'alcalinité du ciment, d'autant plus rapidement que le mélange est plus poreux (figure 7).

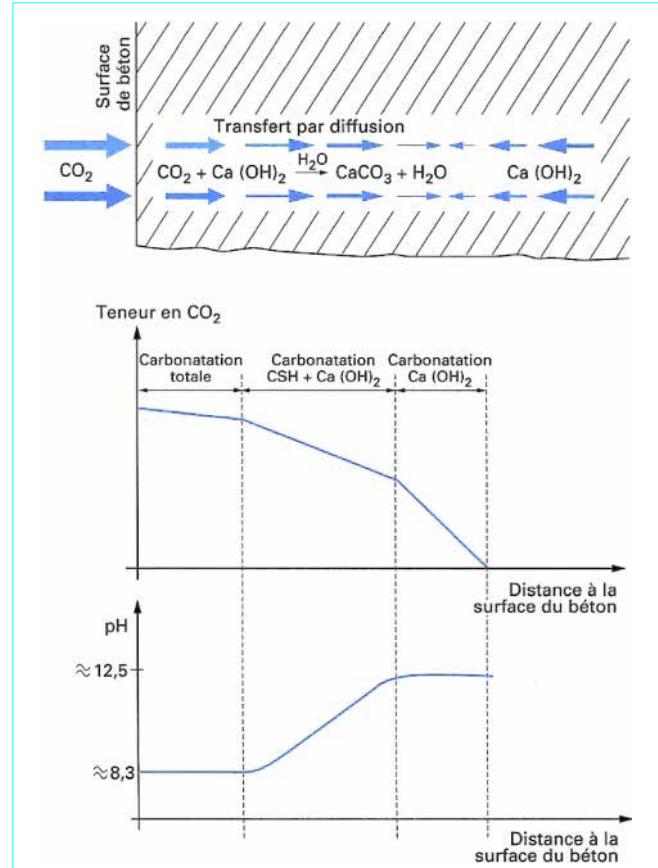
Au départ, le milieu est basique (pH 12,6 pour une saturation en chaux), ensuite cette basicité diminue. Le pH passe à 10 (pour le  $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) et devient inférieur à 10 pour un mélange de carbonate de calcium et de  $\text{Ca}(\text{CO}_3\text{H})_2$ . C'est pour cette raison que la protection des armatures devient moins bonne lorsque la couverture en béton se carbonate, le carbonate de calcium n'est plus protecteur.

Par contre, physiquement, la carbonatation augmente l'imperméabilité grâce au colmatage de certains pores par le carbonate. Ainsi l'absorption capillaire est-elle réduite.

Bien que la carbonatation protège physiquement l'armature en réduisant la migration de l'humidité et de l'oxygène, cette transformation est néfaste au point de vue chimique car l'alcalinité du ciment est neutralisée.

### 1.5.2 Recherche de la profondeur de carbonatation

Afin d'évaluer le stade de vieillissement d'un béton en vue de sa réparation, il peut être intéressant de connaître jusqu'où, à un moment donné, la carbonatation a pénétré, c'est-à-dire la limite de protection existant encore par rapport aux emplacements des armatures. Comme beaucoup de paramètres interfèrent sur la vitesse de progression de la carbonatation (humidité relative, perméabilité du béton, température, etc.), seule une détermination expérimentale peut donner cette information importante. La corrosion ne peut s'initier que lorsque la couverture en béton est totalement carbonatée. La détermination de cette profondeur de carbonatation s'effectue sur une coupe fraîche de béton ou sur une saignée. Après dépoussiérage, on pulvérise un colorant sensible au pH (la phénolphtaléine). La coloration rose instantanée donne la profondeur



**Figure 7 – Modèle simplifié de la carbonatation du béton** (d'après [10])

carbonatée [3]. La partie non entièrement carbonatée se colore en rose violacé [4], la phénolphtaléine vire au rouge au contact de matériaux dont le pH est supérieur à 9,2 et demeure incolore pour les faibles valeurs de pH.

L'évolution de la carbonatation en fonction du temps dépend du coefficient de diffusivité du  $\text{CO}_2$ , de sa concentration et des composés formés. Cependant, une autre théorie estime qu'il existe une profondeur limite de carbonatation, et que la loi de progression n'est pas linéaire mais se ralentit dans le temps (figure 8).

## 1.6 Dispositions préventives contre la corrosion

Les facteurs essentiels sont l'épaisseur et la qualité du béton d'enrobage de l'acier.

Les recommandations pour l'épaisseur du béton de recouvrement sont les suivantes.

Pour les ouvrages au voisinage de la mer (chlorures), l'épaisseur d'enrobage doit être au moins de 4 cm.

Pour les parements non coffrés susceptibles d'être soumis à des actions agressives, l'enrobage doit être au moins de 3 cm.

Pour les autres régions près des **parements exposés aux intempéries**, aux **condensations** ou au contact d'un **liquide**, il est nécessaire d'avoir **au moins 2 cm**.

Pour les parois situées dans des **locaux couverts et clos**, non exposées aux condensations, on impose **au moins 1 cm**.

La **constitution** de ce béton doit respecter les impératifs suivants :

— le **dosage en ciment** doit être suffisant pour réaliser un béton qui englobe parfaitement les granulats (au moins 350 à 400 kg/m<sup>3</sup>) ;

— l'incorporation de chlorure de calcium ou d'adjuvants pouvant en contenir est interdite pour le béton précontraint, les cuves de réservoirs, les planchers chauffants ;

— la **nature du ciment** dépend de sa compatibilité avec l'adjuvant. Les ciments suivants sont compatibles : CPA, CPAL, CPF et CLK. La teneur maximale en ions chlorés (Cl<sup>-</sup>) admissible pour les coulis, mortiers et bétons non armés est de 1 % de la masse de ciment. Pour les bétons armés, la limite est de 0,65 % de la masse du ciment.

Un exemple de corrosion due à l'insuffisance d'enrobage des armatures est donné figure 9.

## 2. Mesure de l'épaisseur d'enrobage des armatures

La localisation des armatures s'effectue assez couramment avec des appareils (profomètre, pachomètre) basés sur le principe des détecteurs de métaux. Ces appareils sont sensibles à l'influence exercée par un objet métallique sur les champs magnétiques qu'il crée. Mais des techniques plus élaborées ont fait l'objet de recherches ces dernières années. Un système d'imagerie micro-onde pour le contrôle non destructif des armatures métalliques a été conçu par le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) et une équipe du CNRS/ESE (Centre National de la Recherche Scientifique / École Supérieure d'Électricité) [5]. Cette nouvelle technique permet, à partir de l'acquisition du champ électrique micro-onde réfléchi, de former des images en coupes (**tomographie micro-onde**) du milieu ausculté. Ainsi est-il possible d'obtenir des images avec une résolution inférieure au centimètre, dans les deux directions du plan de coupe, en ce qui concerne la localisation et l'évaluation du diamètre des aciers. La profondeur maximale d'investigation est d'environ 8 cm. La comparaison entre cette nouvelle méthode et les résultats obtenus avec le matériel léger disponible dans le commerce montre que des développements expérimentaux restent encore à accomplir pour être plus performants dans la détection classique : diamètre des aciers, épaisseur d'enrobage...

L'examen par **gammagraphie** est aussi une technique très performante mais relativement onéreuse et qui nécessite d'avoir l'accès aux deux parements opposés. Son principe est basé sur les variations d'absorption que subit un rayonnement ionisant (rayon  $\gamma$ ) en fonction de la nature, de la densité du matériau et de l'épaisseur qu'il traverse.

Pour réaliser une image gammagraphique, il suffit de disposer un film sensible sur le parcours du rayonnement transmis. Après traitement, à l'aide d'un négatoscope, on obtient un cliché « **gammagraphique** » observable par transparence. Actuellement, cette méthode est la seule qui permette de détecter les aciers dans les poutres à plus de 10 cm des parements.

Pour certaines applications (épaisseurs supérieures à 30 cm), l'importance de la puissance de la source de radiation nécessaire limite l'utilisation de cette technique (à cause du poids du plomb servant de protection).

Les applications pour les ouvrages en béton précontraint, en béton armé, sont assez nombreuses pour justifier l'intérêt de cette technique. D'excellents résultats ont été obtenus pour la détection d'armatures sous les blocs de pierre constituant les voûtes du Panthéon à Paris. Aucune méthode non destructive n'était susceptible de déterminer les armatures utilisées pour armer les pierres (technique utilisée par Soufflot) dans le cas de voûtes dont la statique de l'assemblage n'était pas assurée par le montage habituel de la théorie des voûtes.

### 2.1 DéTECTEURS CLASSIQUES

Le fonctionnement des profomètres est basé sur le principe des courants de Foucault. Un courant de fréquence connue parcourt la bobine de la sonde, créant un champ magnétique variable. Les aciers se trouvant dans l'action de ce champ sont parcourus par des courants de Foucault, qui émettent à leur tour un champ magnétique. Ce champ magnétique induit provoque une altération de la tension de la bobine de réception qui est fonction de l'épaisseur de la couverture du béton et du diamètre de l'armature. Le pachomètre comporte en plus un transformateur de référence qui permet une comparaison des forces électromotrices obtenues dans la bobine de réception avec celles du transformateur (figure 10).

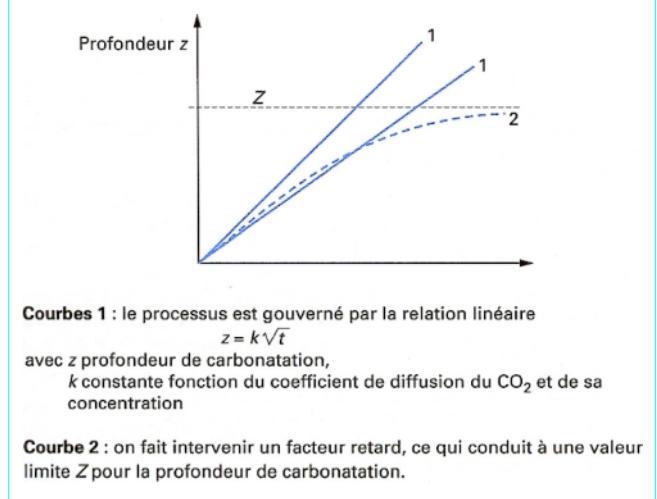


Figure 8 – Évolution de la carbonatation en fonction du temps



Figure 9 – Dégradation du béton due à l'insuffisance d'épaisseur

### ■ Limites de ces appareils

Il est nécessaire de connaître l'un des deux paramètres : diamètre de l'acier ou épaisseur de recouvrement. La détection n'est pas possible au-delà de 8 cm d'épaisseur de béton.

Dans le cas de réseaux d'armatures très denses, la lecture est quelquefois incertaine. L'enrobage est détecté avec une erreur de l'ordre de 4 mm, et le diamètre de l'acier est détecté avec une précision de 2 mm.

## 2.2 Exemples d'applications

Une recherche effectuée au CEBTP [6] sur la sécurité des poteaux en béton armé, sur plusieurs chantiers, a montré que la détection de la position des armatures s'effectue jusqu'à une profondeur de 55 mm avec une précision de  $\pm 5$  mm et qu'un recouvrement inférieur à 2 cm n'a été observé que dans très peu de chantiers (moins de 3 %).

Une recherche récente [7] effectuée sur plusieurs bâtiments et ouvrages, le long du littoral breton (42 sites), a montré que, dans certains cas, près de la moitié des armatures ont un enrobage inférieur à 2 cm (façades d'immeubles à Concarneau). Mais sur un autre site (pignon du bâtiment au Relecq Kerhuon), la majorité de l'épaisseur d'enrobage est de 3 à 4 cm (30 % des cas), à peine 1 % a un enrobage inférieur à 2 cm. Par contre, sur un pont dans le Finistère Nord construit en 1934, l'enrobage est excellent (30 à 40 % supérieur à 3 cm).

Les auteurs concluent que les désordres sont en relation avec l'épaisseur d'enrobage, la qualité du béton et de son vieillissement. La forte porosité de certains bétons (supérieure à 15 %) due à la composition du béton [fort rapport E/C (eau/ciment), puissance de vibration trop faible] est un paramètre très aggravant.

D'après cette recherche, l'enrobage devrait être d'au moins 4 cm pour les ouvrages exposés directement aux embruns et de 5 cm pour ceux en contact avec l'eau de mer.

Il faut signaler que, pour les ouvrages de grande hauteur, la robotisation d'un châssis automoteur équipé de deux sondes magnétiques de type pachomètre et d'une caméra vidéo (pour détecter les fissures) par le CEBTP permet une inspection globale, facilitant le diagnostic lié à la corrosion. Un logiciel de traitement permet une analyse sur le site, à partir d'enregistrement vidéo. La vitesse de déplacement du chariot détecteur sur un plan vertical (le « lézard ») est de 10 cm/s à des hauteurs pouvant atteindre 50 m.

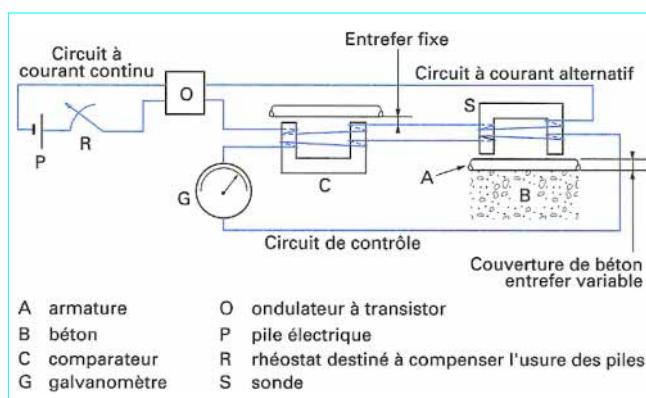


Figure 10 – Schéma de principe du pachomètre

## 2.3 Méthodes de détection de la corrosion des armatures

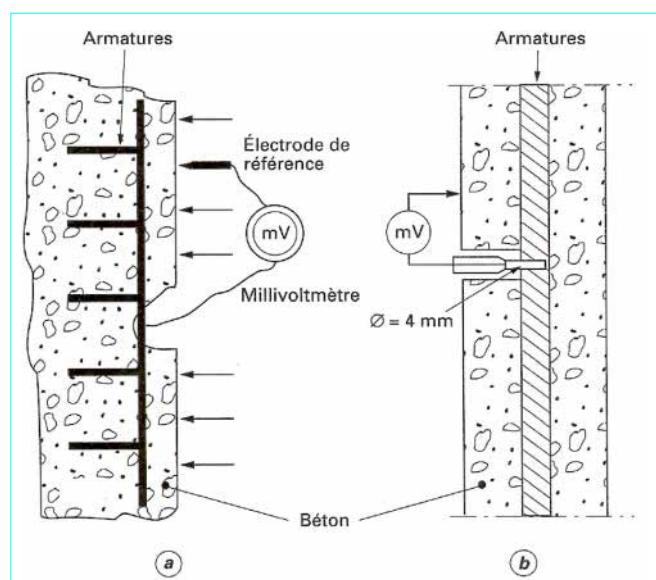
Avant que les phénomènes de corrosion des armatures soient apparents, il est important de détecter, par une mesure rapide non destructive, la présence d'un début d'oxydation des aciers. La mesure est basée sur le caractère électrochimique de la corrosion. En pratique, on mesure la tension de la pile formée entre l'acier enrobé de béton et une électrode de référence non polarisable placée sur le parement en béton (figure 11a). La valeur de cette tension est complexe car elle dépend de nombreux facteurs :

- les réactions anodiques (oxydation de l'acier) ;
- les réactions cathodiques (réduction de l'oxygène) ;
- les caractéristiques du béton d'enrobage (humidité, salinité, pH, oxygénation, nature du liant, compacité).

En effectuant plusieurs mesures en des points préalablement repérés, on trace les lignes équipotentielles à la surface du béton. On délimite ainsi les zones où le potentiel est le plus faible (zones anodiques, où l'acier est le siège du processus de corrosion).

Pour assurer un contact électrique, on dégage localement l'armature (figure 11b). Le réseau d'armatures est ainsi relié aux bornes d'un millivoltmètre à haute impédance d'entrée. L'autre borne est connectée à une électrode de référence appliquée sur le parement du béton, aux nœuds de chaque maille.

L'analyse des résultats est basée sur le fait que, dans le béton armé à pH élevé, l'acier est passivé. Le potentiel d'électrodes des armatures est de  $-100$  mV/ECS (Électrode Cuivre-Sulfate de cuivre, cf. norme ASTM C 876). Au droit des zones corrodées, l'abaissement de potentiel peut varier de  $-200$  à  $-900$  mV/ECS. Ce procédé doit être utilisé en complément d'autres modes d'investigation : vitesse du son, profondeur de carbonatation.



Le béton exposé au gel ou aux sels de dé verglaçage peut s'altérer. les granulats sont déchaussés ; sous l'effet du gel, la phase liante du mortier perd sa cohésion.

Figure 11 – Méthode de détection de la corrosion des armatures (doc. CEBTP)

## 3. Fissuration

L'un des désordres les plus fréquents des structures en béton est la fissuration.

### 3.1 Causes les plus fréquentes

Ces causes sont multiples, on peut les classer en trois grandes catégories :

— les causes propres **inhérentes aux propriétés des matériaux** : par exemple, le retrait dû à l'évaporation de l'eau de gâchage, le gonflement dû à la réaction exothermique du liant, la résistance mécanique de la cohésion du liant ;

— les causes **directes externes**, c'est-à-dire celles agissant directement sur les structures en béton : par exemple, les déformations excessives sous l'action des charges, les déformations sous l'action de la température ou sous l'action de l'humidité ;

— les causes **externes indirectes**, c'est-à-dire les répercussions sur certaines structures d'actions provenant d'autres éléments : par exemple, le tassement différentiel des fondations, certains cas de concentrations de contraintes, l'association à d'autres éléments qui se déforment excessivement (dilatation de toiture...), les vibrations, les trépidations soumettant certaines sections à une fatigue de déformations dépassant les limites élastiques du béton.

### 3.2 Définition et classification des fissures

Des enquêtes sur les formes de pathologie observées sur des maisons individuelles ont donné les résultats suivants :

- fissuration horizontale au niveau du dernier plancher ;
- fissuration oblique partant des angles de l'appui de fenêtre.

#### 3.2.1 Caractéristiques géométriques

##### ■ Ouverture

L'ouverture est la largeur entre lèvres, elle peut être évaluée à l'œil nu et peut se mesurer avec précision à l'aide d'un fissuromètre.

##### ■ Tracé

Le tracé d'une fissure est le développé de la fissure visible sur toutes les surfaces de la structure.

##### ■ Fissure traversante

Une fissure est dite « traversante » lorsqu'elle est visible sur au moins deux faces de la structure.

##### ■ Fissure de surface

Une fissure est dite de surface quand elle ne traverse pas l'épaisseur de la structure. L'ouverture, dans ce cas, est maximale en surface et nulle au sein du matériau.

#### 3.2.2 Classification des fissures

Il n'existe pas actuellement de normes classant les fissures suivant leur ouverture. On a coutume néanmoins de distinguer les fissures proprement dites du faïençage et des microfissures.

##### ■ Faïençage

C'est un réseau caractéristique d'ouvertures linéaires superficielles de très faible largeur qui n'intéresse, le plus souvent, que la couche superficielle du béton ou de l'enduit à base de liant hydraulique.

##### ■ Microfissure

C'est une fissure très fine au tracé plus ou moins régulier et le plus souvent discontinu et dont la largeur est inférieure à 0,2 mm. Elle peut évoluer jusqu'à former un réseau.

##### ■ Fissure

C'est une ouverture linéaire au tracé plus ou moins régulier dont la largeur est d'au moins 0,2 mm.

### 3.2.3 Évolution de la largeur des fissures

L'activité d'une fissure se caractérise par la variation ou la stabilité de son ouverture dans le temps.

##### ■ Fissures passives ou mortes

Leur ouverture ne varie plus dans le temps, quelles que soient les conditions de température, d'hygrométrie ou de sollicitation de l'ouvrage. Ce type de comportement des fissures est très rare, car les ouvrages subissent toujours plus ou moins de variations dimensionnelles sous l'effet de l'évolution des conditions thermiques (l'échauffement conduit à une expansion de la matière, donc à une diminution de la largeur des fissures et inversement).

##### ■ Fissures stabilisées

Leur ouverture varie dans le temps dans des limites connues. Souvent leur mouvement suit une évolution cyclique, liée aux variations thermohygrographiques que subit l'ouvrage.

##### ■ Fissures actives ou évolutives

Ces fissures continuent à évoluer car les mouvements qui les ont fait naître ne sont pas stabilisés (par exemple, tassements différentiels de fondation).

### 3.2.4 Mesures de l'évolution des fissures

Avant d'entreprendre le traitement des fissures, il est indispensable, pour choisir la technique appropriée, de déterminer si elles sont mortes, stabilisées ou actives.

La connaissance de l'amplitude d'ouverture et de la période des battements extrêmes correspondants est une information nécessaire en pratique avant l'exécution d'une réparation. Pour cela, il faut apparailler les fissures et suivre leur évolution pendant une durée d'au moins un an. Parmi les dispositifs les plus performants, deux systèmes sont à signaler (cf. article *Extensométrie* [R 1 850] dans le traité Mesures et Contrôle) :

— l'extensomètre acoustique par cordes vibrantes, qui permet un suivi sans avoir un accès à proximité de la fissure. Il suffit, après la mise en place des cordes, de descendre les fils électriques qui permettent l'excitation des cordes à la base de l'élément à ausculter ;

— les extensomètres mécaniques, qui nécessitent l'accès aux bases de mesures fixées de part et d'autre de la fissure étudiée.

Les anciens dispositifs témoins fixés sur la fissure (en plâtre ou en verre) donnent juste une indication, par tout ou rien, à un moment donné, montrant qu'il y a eu un mouvement dépassant la limite d'extension du verre ou du plâtre utilisé pour la réalisation du témoin. Cette information est intéressante, mais insuffisante pour suivre une évolution précise des fissures.

### 3.3 Techniques de réparation

Quatre procédés permettent de traiter les fissures.

#### 3.3.1 Pontage et protection localisés

Cette technique consiste à recouvrir en surface des fissures, actives ou non, pour assurer l'étanchéité à la structure. Cette intervention permet, si nécessaire, la pose d'un revêtement de finition.

#### 3.3.2 Calfeutrement

C'est un colmatage avec des produits souples en profondeur pour assurer une étanchéité des fissures à l'eau ou à l'air, ou pour éviter des pénétrations de matières solides risquant de gêner le mouvement de la fissure ou du joint [en bâtiment le SNJF (Syndicat National des Joints et Façades) a établi des recommandations de dimensionnement pour les joints de façades, cf. article *Calfeutrement des joints dans le bâtiment* [C 3 660] du présent traité].

#### 3.3.3 Injection

Il s'agit de faire pénétrer dans les fissures un produit susceptible de créer une liaison mécanique et/ou une étanchéité entre les parties disjointes.

#### 3.3.4 Traitement généralisé

Ce traitement assure une ou plusieurs des fonctions suivantes :

- esthétique ;
- imperméabilisation ;
- étanchéité.

### 3.4 Produits de réparation

Il est intéressant, pour traiter d'une façon complète ces quatre procédés de réparation, de se référer aux sources d'information suivantes :

- fascicules du STRRES (Syndicat National des Entrepreneurs de Travaux de Réparation et de Renforcement des Structures) ;
- guide pour le choix et l'application des produits de réparation des ouvrages en béton (LCPC – SETRA) [8] ;
- recommandations d'un fabricant et formuleur de résine (SIKA).

#### 3.4.1 Prescriptions du STRRES

##### 3.4.1.1 Pontage et protection localisée

###### ■ Produits à base de liants hydrauliques

Il s'agit de mortiers à base de ciment dont les propriétés sont fortement modifiées par l'ajout de résine de synthèse qui en abaisse le module d'élasticité. Leur emploi est exclusivement limité au faïençage et aux microfissures.

###### ■ Produits à base de liants organiques

###### ● Liants

Ils sont utilisés seuls ou pour saturer les armatures, ou pour le collage de feuilles.

Les produits de base sont les suivants :

- bitumes souples sans solvant ;
- acryliques en émulsion aqueuse ou sans solvant ;
- époxydes assouplis sans solvant ;
- polyuréthanes sans solvant.

###### ● Armatures

Ce sont des textiles tissés ou non, de diverses natures et de divers grammages qui sont noyés dans le liant compatible, tels que : toile ou mats de verre, de polyester, etc.

###### ● Feuilles

Elles sont collées au support, généralement de part et d'autre de la fissure ; elles peuvent être en métal (aluminium) ou en élastomère armé ou non (*Hypalon*, *Néoprène*, *PVC*...) et collées avec des colles époxydiques.

##### 3.4.1.2 Calfeutrement

Le calfeutrement nécessite l'élargissement des lèvres par une ouverture en V qui peut être pratiquée manuellement ou avec une meuleuse électrique ou pneumatique.

Le mastic de calfeutrement est mis en œuvre avec un pistolet manuel ou pneumatique.

Les produits utilisés peuvent être à base de liants hydrauliques ou de liants organiques.

###### ■ Produits à base de liants hydrauliques. Mortiers de ciment

Les composants ciment, eau, granulats, adjuvants doivent être choisis en accord avec les normes existantes.

Les adjuvants utilisés sont composés de résines dites miscibles à l'eau de gâchage. Leur rôle est d'améliorer certaines propriétés essentielles (adhérence, résistance à la traction, réduction des effets du retrait).

###### ■ Produits à base de liants organiques

La plupart des familles de produits utilisés pour le calfeutrement sont soit des mastics constitués d'un liant organique et de charges minérales, soit des monocomposants ou des bicomposants. Ils nécessitent quelquefois l'application d'un primaire d'accrochage.

Les catégories suivantes sont utilisées :

- silicones monocomposants ;
- polyuréthanes, le plus souvent monocomposants ;
- polysulfures monocomposants ou bicomposants ;
- acryliques monocomposants, en émulsion aqueuse ou en solution dans un solvant organique ;
- butyls monocomposants ;
- époxydes bicomposants ;
- polyesters bicomposants.

##### 3.4.1.3 Injection

Ce traitement a pour but de reconstituer l'intégrité de la cohésion mécanique de la structure.

La possibilité d'injection dans les fissures les plus fines limite ce traitement à des ouvertures supérieures à 0,1 mm. Le choix des produits est fonction de l'ouverture des fissures.

###### ■ Fissures d'ouverture supérieure à 10 mm

Ces traitements s'effectuent avec des mortiers à base de ciment, complétés par un adjuvant.

Les dosages en ciment sont habituellement supérieurs à 400 kg/m<sup>3</sup> avec un rapport C/E compris entre 1 et 2, selon le degré de plasticité souhaité par la technique d'injection.

Les dosages en sable sont variables et compris entre 0,5 et 4 fois le poids du ciment.

Les caractéristiques physico-chimiques des mortiers sont améliorées par des fluidifiants, des plastifiants, des hydrofuges, des minéralisateurs agissant sur les constituants ou sur le support.

Les ajouts employés doivent être adaptés à la nature du liant. Leur rôle peut être de réduire ou de compenser le retrait. Il est aussi possible d'utiliser des mortiers prêts à l'emploi pour compenser le retrait. Les parties apparentes de la fissure doivent être calfeutrées par des coffrages légers ou par bourrage superficiel d'un mortier plus sec.

L'injection est souvent réalisée par gravité à l'aide d'injecteurs placés le long de la fissure.

#### ■ Fissures d'ouverture comprise entre 1 et 10 mm

On utilise surtout les coulis de ciment et les résines chargées.

- Les **coulis de ciment** peuvent être :

- soit purs ;
- soit additionnés de charges très fines (fillers, poudres, farines, argiles, bentonites, etc.) ;
- soit en compléments d'émulsions ;
- soit additionnés de minéralisateurs.

Ces coulis, suivant leur composition et leur fluidité, peuvent présenter des risques de décantation (ressuage). Pour remédier à cet inconvénient, des ajouts de fines (bentonites, fumées de silice) améliorent le pouvoir de rétention d'eau.

Les coulis à base de liants contiennent, comparativement aux mortiers, plus de ciment et moins de matières inertes par unité de volume.

● Les **résines chargées** sont utilisées essentiellement dans les fissures d'ouverture inférieure à 3 mm, la nature de ces résines doit être adaptée en fonction des largeurs à injecter.

#### ■ Fissures d'ouverture comprise entre 0,5 et 3 mm

On utilise pour ces traitements les produits suivants (cf. article *Utilisation in situ des polymères liquides dans le génie civil* [C 5 435] de ce traité) :

- époxydes (traitement rigide ou semi-rigide en milieu sec ou humide) ;
- polyuréthannes (traitement semi-rigide ou souple à injecter sur un support sec) ;
- acryliques (traitement souple pour l'étanchéité en présence d'eau) ;
- coulis de ciment additionnés de minéralisateurs (traitement rigide en milieu sec ou humide).

● Les **époxydes** sont des résines thermodurcissables à deux composants : une base ou résine et un durcisseur. Ils doivent être sans solvant pour éviter retrait et contraction volumiques.

Après mélange des deux composants, la réaction de polymérisation se produit, conférant au mélange des caractéristiques mécaniques élevées dont l'adhérence au support est généralement bonne.

● Les **résines polyuréthannes élastiques** sont thermodurcissables à deux composants et doivent être sans solvant. Après mélange des deux composants, la réaction provoque la prise et l'obtention d'un matériau élastique. Certaines compositions comprennent trois composants : résines, catalyseurs, accélérateur.

● Les **acryliques** sont de la famille des émulsions polymères thermoplastiques ; ils sont à base de résines acryliques. Leur utilisation est surtout préconisée pour l'obtention d'injections souples en présence d'humidité.

● Les **coulis** additionnés de minéralisateurs conviennent pour des fissures inertes. Leur rôle est l'étanchement et la reconstitution des caractéristiques mécaniques. Ces coulis sont composés de mélange de ciment, de sable (éventuellement), d'eau et d'un minéralisateur en poudre (silicate).

#### ■ Fissures d'ouverture inférieure à 0,5 mm

Pour ces fissures très fines, on utilise surtout les époxydes, les acryliques et les minéralisateurs.

● Les **époxydes**. Dans la mesure où la viscosité dynamique du mélange à la température d'utilisation est inférieure à 0,5 Pa · s et même à 0,05 Pa · s, l'injection est réalisable dans les fissures les plus fines (< 0,2 mm).

- Les **acryliques** sont utilisés uniquement pour réaliser des injections souples en présence d'eau.

- Les **minéralisateurs** sont utilisés en solution non chargée. Certaines résines du type polyesters, phénoplastes, aminoplastiques ou certains mélanges (époxyde-polyuréthane-brai) peuvent être éventuellement utilisés pour leurs propriétés particulières de viscosité ou de résistance chimique. Mais une vérification préalable d'aptitude est nécessaire pour déterminer le retrait, l'adhérence et la compatibilité chimique.

### 3.4.2 Recommandations du guide pour le choix et l'application des produits de réparation des ouvrages en béton (LCPC-SETRA)

Dans ce document sont définies les différentes catégories de produits pouvant être utilisés pour la réparation des ouvrages en béton :

- polymères thermoplastiques (acryliques, acrylamides, styrènes-acryliques, acétate de polyamyle, styrène-butadiène) ;
- polymères thermodurcissables (époxydes, polyuréthannes, polyesters) qui se présentent en général sous forme de deux composants à mélanger au moment de l'emploi ;
- liants hydrauliques classiques et liants spéciaux ;
- mélanges de liants hydrauliques et de polymères.

En ce qui concerne la réparation des fissures, une distinction est faite entre les fissures actives profondes et les fissures passives suivant la largeur de leur ouverture.

#### ■ Fissures actives profondes

(Si la résistance mécanique n'est pas en cause).

- **Colmatage par injection :**

- liant époxyde non plastifié ;
- liant polyuréthane souple ;
- liant acrylamide.

- **Colmatage superficiel :**

- mastic époxyde souple, après imprégnation avec des polymères non chargés ;
- mastics de polyuréthane souples en milieu sec ;
- mastics de silicone sur couche d'accrochage en liant époxyde.

#### ■ Fissures passives

- **Ouverture inférieure à 0,2 mm**

Colmatage par injection de :

- polyester à faible retrait ou époxyde très fluide sans solvant ;
- liant acrylamide.

- **Ouverture comprise entre 0,2 et 0,6 mm**

Colmatage par injection de :

- liant époxyde fluide sans solvant ;
- liant acrylamide.

- **Ouverture comprise entre 0,6 et 3 mm**

Colmatage par injection de :

- liant époxyde pur ou chargé sans solvant ;
- liant acrylamide.

- **Ouverture supérieure ou égale à 3 mm**

Colmatage par injection de :

- liant époxyde pur ou chargé sans solvant ;
- blocage des éléments de la structure pour transmettre les contraintes de compression avec un coulis de ciment Portland ;
- coulis de ciment à retrait compensé ;
- coulis de ciment Portland additionné d'époxyde.

### 3.4.3 Recommandations préconisées par un formuleur et fabricant de résine (SIKA)

Avant d'entreprendre un traitement, on doit analyser les causes de la fissuration.

Cette société conseille de distinguer les fissures actives vivantes et les fissures stabilisées ou mortes.

#### ■ Fissures actives

Elles doivent être traitées comme un joint de dilatation :

- on ouvre la fissure en V ou en U, de préférence à la scie à béton ;
- on insère un fond de joint, par exemple du polyéthylène ;
- on applique un mastic élastomère, par exemple un polyuréthane à un composant.

De cette façon, la fissure est protégée contre les infiltrations d'humidité et d'air.

Si la fissure active est dans une paroi soumise à une pression d'eau (cas d'un réservoir ou d'un cuvelage), on injectera en profondeur une résine formant un gel élastique.

#### ■ Fissures stabilisées

Elles sont traitées par injection profonde avec des résines époxydes : on rétablit ainsi la continuité du béton permettant la transmission des contraintes mécaniques.

Après avoir mis en place les injecteurs le long de la fissure préalablement obturée superficiellement, on fait pénétrer la résine en partie basse de façon à laisser l'air s'échapper en partie haute. De proche en proche on injecte la totalité de la fissure.

La résine injectée doit avoir une faible viscosité, c'est-à-dire être très fluide et avoir un bon pouvoir mouillant. Sa durée pratique d'utilisation (*pot life*) doit être adaptée aux conditions d'emploi.

### 3.4.4 Recherches sur l'injection des coulis de ciment effectuées au LCPC

Une recherche effectuée sur l'injectabilité des coulis de ciment de différentes dimensions de grains a montré que cette possibilité présente l'avantage d'être d'un coût plus faible que les résines.

Une des difficultés de l'injection des coulis à base de liants hydrauliques est leur essorage dès que la largeur de la fissure est inférieure à 3 mm.

La comparaison de la progression de l'injection a montré qu'un mélange (liant 50 %, fines calcaires 50 %) donne un coulis d'injectabilité identique à celles des polymères. La suite des études a montré que la dimension maximale des grains de ciment était le facteur déterminant de l'aptitude à l'injectabilité.

Des essais en semi-grandeur permettent d'établir que l'on ne peut injecter un coulis que dans un interstice de 1,5 à 2,3 fois la taille des grains de ciment.

De très bons résultats ont été obtenus en associant du ciment CPA HPR, de la fumée de silice, du fluidifiant pour réaliser un coulis hydraulique à rapport *E/C* moins élevé, injectable dans des fissures très fines.

## 4. Altération des surfaces en béton sous l'action du vent

Des particules de matières diverses en suspension dans l'air sont agitées et transportées par le vent. Lorsque ces particules heurtent une paroi, l'impact s'effectue avec une certaine énergie cinétique, qui est fonction de la masse et de la vitesse de déplacement (au carré) des grains. Selon la nature de la paroi, son élasticité, sa rugosité, les particules peuvent adhérer ou rebondir. Ces points d'impact, constamment renouvelés, peuvent provoquer une microdéstruction locale. La vitesse du vent joue un rôle important qui dépend de nombreux facteurs : l'altitude, les turbulences ; les écrans créent des obstacles. Suivant l'orientation des parois aux vents dominants, l'érosion sera plus ou moins importante.

Les éléments constituant les polluants atmosphériques se divisent en deux catégories : les particules solides ou liquides.

Les plus abrasives sont les débris de roches dures (quartz), les oxydes de fer, le ciment, le charbon, etc. Selon leur diamètre, la vitesse des particules portées par l'air croît jusqu'à une valeur limite (les forces de frottement freinent la vitesse en fonction de la forme des grains).

D'autres facteurs compliquent ce phénomène, comme par exemple les agglomérats de particules qui sont plus nombreux que les particules isolées.

Dans les zones de vents brisants, les particules de sable et de silt érodent les surfaces sur lesquelles elles sont violemment projetées. Comme ce phénomène est souvent cyclique, année après année, des milliers de fois, il finit par user et creuser les matériaux les plus durs. Les alvéoles, les arêtes des joints, la laitance superficielle du béton, dans les zones balayées par les vents brisants, sont très sensibles à l'érosion.

Pour le béton destiné à rester apparent, la précaution principale consiste à réaliser un béton de haute qualité mécanique. La surface doit être exempte de bulles et ne pas présenter des cavités anormales. Pour obtenir ce résultat la composition granulométrique du béton doit être bien étudiée. Le dosage en ciment doit être d'au moins 400 kg/m<sup>3</sup> et sa qualité doit permettre des hautes performances mécaniques. Le liant doit parfaitement recouvrir les granulats pour assurer leur parfaite adhérence. La mise en œuvre du béton doit être réalisée par un serrage puissant en évitant un excès d'eau. La peau du béton doit être composée de grains fins de sable dur. Un mortier de forte compacité doit être en quantité suffisante pour remplir tous les vides entre les gros granulats et la paroi du moule.

## 5. Réparation externe du béton : éclatements, destructions accidentelles

L'exécution d'une réparation est dans tous les cas une opération délicate qui constitue souvent un cas particulier. Il est nécessaire au préalable de vérifier :

- que le procédé utilisé répond au problème posé et permet d'atteindre l'objectif que l'on s'est fixé ;
- que l'équipe chargée de l'exécution est en mesure, avec le matériel mis à sa disposition, d'obtenir le résultat escompté.

Pour les opérations de réfection, il convient de distinguer la reconstitution partielle du renforcement qui peut avoir pour objet de remédier à des insuffisances pour résister à des sollicitations.

### 5.1 Réparation externe

Il s'agit d'une reconstitution partielle (d'une épauprure, d'un éclat), d'un traitement superficiel tel qu'un colmatage, ou d'une étanchéité à l'aide d'un matériau d'apport.

La technique la plus utilisée est le **ragréage**, il peut intéresser des épaisseurs de béton ou de mortier très variables. Les matériaux utilisés sont :

- du mortier ou béton avec des ciments classiques (conformes aux normes) ou spéciaux ;
- du béton projeté ;
- du mortier ou béton aux polymères (béton époxyde par exemple).

Depuis ces dernières années, une importante société française spécialisée dans les adjuvants pour le béton a mis au point un produit de réparation à hautes performances, à base de fumée de silice.

Ce mortier prêt à l'emploi comporte l'addition d'adjuvants améliorant les propriétés pour la réparation et la protection du béton : l'adhérence est supérieure à la cohésion du béton support, la résistance mécanique est très élevée, son coefficient de dilatation thermique est identique à celui du béton.

Par ailleurs la protection des armatures est garantie.

## 5.2 État de surface du béton

La mise en œuvre des produits nécessite un soin très important. Rien ne sert de choisir le produit le plus performant si l'application ne respecte pas les préconisations d'emploi.

Toutes les réparations nécessitent des qualités d'adhérence élevées sur le support en béton dégradé. Cette exigence garantit la longévité de la réparation.

Dans tous les cas de réfection rencontrés depuis 40 ans, il ressort que le temps à passer et le soin à apporter pour la préparation de la surface du béton sont les phases les plus importantes.

Le béton ou le mortier doit être propre, sain, exempt de toute laitance, poussière, fragments ou souillure quelconque. Il est indispensable d'enlever le béton dégradé (toutes les particules sans cohésion) jusqu'à mise à nu du béton sain. Plusieurs procédés sont utilisables : le sablage, le jet d'eau sous forte pression ou le grenaillage à sec, le rabotage, le repiquage au marteau manuel ou pneumatique et le découpage thermique au chalumeau, (mais cette technique, très intéressante pour son rendement, doit être réalisée avec précaution pour éviter l'éclatement et la fissuration des granulats).

Le bouchardage est à déconseiller sur des éléments en béton armé ou précontraint du fait d'une trop forte énergie des chocs risquant de microfissurer le béton.

## 5.3 Adhérence du produit rapporté au béton

Lorsqu'il s'agit d'un béton à base de liant polymère, le problème de l'adhérence au béton hydraulique est lié à l'affinité du polymère vis-à-vis du ciment et à la compatibilité du produit avec l'état d'humidité du support. Ainsi les **thermoplastiques** utilisés en faible épaisseur nécessitent, pour adhérer, une humidification préalable du support. Dans la famille des **thermodurcissables**, les **polyuréthannes** sont incompatibles avec toute trace d'eau. Aussi, dans ce cas, faut-il une couche d'accrochage. Si le support peut être parfaitement sec, elle peut être en polyuréthane pur, mais si le séchage n'est pas assuré il est recommandé d'appliquer une couche d'accrochage en liant époxyde judicieusement formulé.

Les liants époxydes adhèrent, selon leur formulation, sur des bétons secs ou humides. Il est conseillé d'enduire au préalable la surface de contact d'une couche de système époxyde non chargée, en particulier si le support est très poreux.

D'une façon générale, pour éviter toute pénétration du polymère dans les capillaires du béton hydraulique, il est toujours conseillé d'enduire d'une couche de primaire pour améliorer l'accrochage du mortier ou du béton rapporté. On évite ainsi le désenrobage des granulats.

Dans le cas d'une réparation à base de liants hydrauliques, l'adhérence est faible et pratiquement nulle sur support sec. Si les ragréages sont d'une épaisseur inférieure à 2 cm et faiblement sollicités, on peut se contenter, après un brossage énergique de l'ancien support, d'une humidification et de l'application d'un gobetis d'accrochage (très riche en ciment). Cela peut être suffisant pour les ragréages à base de ciment associé aux polymères thermoplastiques, mais il est conseillé d'appliquer d'abord sur l'ancien béton une couche d'accrochage en liant époxyde formulée pour être compatible avec l'eau.

Une seule exception à cette règle, la couche primaire en liant époxyde est déconseillée pour le béton projeté sous pression car elle risque d'entraîner un glissement du béton projeté. On se contente généralement d'humidifier soigneusement la surface avant toute projection. Mais si, après la purge du béton dégradé, le support reste sans cohésion ou friable, une couche de primaire en liant époxyde est utile pour consolider par imprégnation le béton ancien.

La température de mise en œuvre conditionne la vitesse de durcissement du produit. Il est nécessaire, avant toute mise en œuvre, d'évaluer les durées nécessaires pour la préparation du mélange et son application sur la surface à traiter.

De plus, selon la température du chantier et de l'élément à traiter, il faut, au-delà de 25 °C, prendre en compte la durée pratique d'utilisation (DPU). Par temps froid, il peut être nécessaire de chauffer le support à traiter ou d'ajouter, le cas échéant, un accélérateur, mais avec précaution. On a aussi intérêt à maintenir le produit à des températures voisines de 20 à 25 °C. Il faut garder à l'esprit qu'un produit appliqué en couche mince sur un support prend très rapidement la température du support qui a une plus forte inertie thermique. Le durcissement et la polymérisation du mélange s'effectuent quand même à la température ambiante. (Pour plus de détails sur les polymères, on se reportera à l'article *Utilisation in situ des polymères liquides dans le génie civil* [C 5 435] du présent traité).

## 6. Nettoyage du béton

Un certain nombre de précautions sont indispensables avant de définir la technique de nettoyage. Il faut procéder à un examen minutieux de reconnaissance du support et s'informer sur :

- la nature du béton à traiter : nature du liant et des granulats ;
- le traitement de surface et de protection (nature de la peinture) et, éventuellement, l'application d'un hydrofuge ;
- la nature des joints.

L'**examen sur parement** doit détecter les traces d'oxydation des armatures (taches de rouille, adhérence du béton de revêtement).

Les **points critiques** sont toujours les bandeaux, balcons, linteaux, accroteries, scellements (de volets, garde-corps, etc.).

Pour enlever les salissures des parements en béton, les méthodes classiques de **nettoyage** sont utilisées dans la majeure partie des cas. Mais si, après essais, elles se révèlent insuffisantes, il convient de choisir des procédés plus puissants (abrasifs ou chimiques).

Après avoir vérifié expérimentalement la technique la plus performante en fonction du degré d'enrassement et de la cohésion du parement, on adopte une des méthodes proposées ci-après (certaines, non applicables sur les pierres, peuvent être conseillées sur le béton ayant plus de cohésion que les pierres tendres).

### 6.1 Projection d'eau chaude ou surchauffée sous pression

Cette méthode convient particulièrement aux matériaux peu poreux (comme le béton entre 15 et 25 % de porosité), mais non fragiles. Elle est efficace pour décapier les façades revêtues d'anciens revêtements plastiques épais (RPE). Dans la méthode de projection d'eau chaude surchauffée, le nettoyeur produit au niveau de la lance une eau en phase liquide, portée à une température d'environ 140 °C sous pression qui, à la sortie de la buse, se transforme en vapeur. La pression est en général de 8 MPa. Le lavage à la vapeur réduit la consommation d'eau. Ce type de nettoyage ne permet pas d'éliminer les salissures incrustées.

## 6.2 Sablage à sec

Cette technique consiste à projeter sous faible pression un jet de sable sec sur le parement. Tous les inconvénients dus à l'eau sont évités. Cette méthode est rapide, efficace, peut éliminer toutes salissures ou peintures anciennes, mais elle est dangereuse pour l'opérateur qui doit porter un masque (contre les risques de silicose). Une attaque trop brutale conduit à l'usure des angles et des arêtes. Le nettoyage régulier du parement n'est pas facile à obtenir, et des nuisances importantes pour l'environnement sont à craindre (poussières, bruit...).

## 6.3 Sablage hydropneumatique

Cette projection s'effectue à basse pression. La proportion de sable et d'eau doit être réglée en fonction de la dureté et de la compacité du béton à nettoyer. Le sable use la surface des matériaux à nettoyer, l'eau détrempe, amollit et facilite le détachement des salissures.

Cette technique est rapide, efficace, particulièrement préconisée pour les surfaces en béton, moins poreux et moins fragile que certaines pierres calcaires tendres.

Cette méthode n'est pas polluante pour l'environnement, mais l'utilisation est délicate pour une application à pression très élevée sur les arêtes vives et dans le cas de façades en matériaux mixtes : certaines briques de parement n'ont pas une dureté suffisante pour subir le même traitement que le béton.

## 6.4 Projection basse pression de microfines de verrerie

Cette technique a été mise au point spécialement pour le béton. Elle est très efficace et plus douce que le sablage.

Il s'agit d'un procédé qui a été breveté par Thomann-Hanry, presque exclusivement exploité par ses inventeurs. La technique consiste à projeter à sec, sous pression, une poudre très fine réalisée souvent à partir de grain de verrerie. Suivant son degré de finesse le grain porte le nom de fine, microfine ou superfine. Le choix de la dimension du grain est fonction de la dureté, de la cohésion du parement, et de la nature et de l'adhérence des salissures. À l'origine de l'application de cette technique, les opérateurs revêtus de scaphandres travaillaient dans une nacelle équipée d'aspirateur. Cette nacelle était appliquée contre la façade, à l'aide d'une grue, montée sur un camion. Cet équipement présente de nombreux avantages : l'accès est possible jusqu'à une trentaine de mètres sans échafaudage, la rapidité d'intervention permet en 2 ou 3 jours de traiter la façade d'un immeuble courant.

Cependant l'intérêt global de cette méthode n'est pas toujours vérifié, en particulier si d'autres interventions sont nécessaires pour compléter le ravalement : réfection de certaines parties, travaux de peinture (qui nécessitent souvent un échafaudage de pieds).

## 6.5 Procédés chimiques

L'utilisation des produits chimiques est moins dangereuse pour les façades en béton que pour les façades en pierre calcaire ; toutefois il convient de respecter certaines limites.

Le procédé facilite l'élimination des salissures par une action physico-chimique de surface. La méthode consiste à appliquer, après mouillage du parement, un agent chimique, mélangé à un liquide ou à un produit pâteux, avec une spatule, une brosse, un pinceau ou un pulvérisateur basse pression. Le temps d'action varie de quelques minutes à quelques heures. Suivant la concentration des

agents actifs et la nature de l'encrassement, cette durée de contact est à adapter. Ensuite, un rinçage abondant à l'eau est indispensable jusqu'à l'arrêt total de la réaction.

Après une analyse de la nature des salissures et un essai de traitement, il est possible de mettre au point un processus spécifique au support. Ainsi cette technique bien adaptée peut s'avérer plus efficace et moins nocive que les méthodes traditionnelles.

Les produits chimiques à utiliser doivent remplir certaines conditions :

- ne pas modifier l'aspect du parement ; il faut s'assurer par des essais que ni la teinte ni la rugosité ne seront changées (par exemple, sur un béton lisse, le mortier fin de peau ne devra pas être décapé) ;

- la structure cristalline du béton ne doit pas être modifiée ;

- le vieillissement de la couche superficielle du béton ne doit pas être compromis ;

- aucun sel nocif, tel que les sulfates, ne doit résulter de la réaction de l'agent nettoyant sur la pâte de ciment. Toute attaque anormale augmentant la porosité (déchaussement des granulats ou autres) est à proscrire pour éviter l'oxydation des aciers qui devraient moins protégés par suite du nettoyage.

Pour le traitement des salissures alcalines, les acides minéraux ou organiques sont toujours utilisés en dilution dans l'eau, de préférence en faible concentration. Pour éviter la pénétration par capillarité du produit de nettoyage dans le béton, il faut, à l'avance, imprégner abondamment d'eau la masse de béton. L'action du produit est toujours facilitée par un brossage mécanique. Le rinçage est indispensable pour supprimer l'excès de produit et les sels formés.

## 6.6 Traitement pour l'enlèvement des salissures diverses

Les taches grasses causées par les agents de décoffrage sont difficiles à enlever totalement. La meilleure solution consiste à pulvériser, à chaud si possible, une **lessive fortement détergente**. Un rinçage abondant à l'eau doit suivre ce traitement. Dans les cas les plus difficiles, il faut ramollir le corps gras avec un solvant avant le traitement à la lessive, mais il faut veiller à ce qu'aucun excès de solvant n'entraîne une pénétration du corps gras dans les capillaires du béton, ce qui créerait une tache indélébile. Les taches de peinture ou de goudron sont traitées avec le solvant approprié, mais, pour éviter la pénétration du corps gras, le solvant doit être en émulsion, et un rinçage à l'eau sous pression est indispensable pour terminer l'opération.

Dans certains cas, le seul recours consiste à **poncer**. Cette technique nécessite un ruissellement d'eau pour éviter l'échauffement, qui entraînerait le noirissement de la partie traitée.

## 6.7 Taches sur le béton

Les taches dues à l'**oxyde de fer** disparaissent après l'application d'une solution d'acide oxalique (à 100 g/L d'eau), suivie d'un brossage et d'un rinçage. On peut aussi appliquer une pâte composée d'un mélange de blanc d'Espagne, de citrate de sodium, d'eau (6 parties en volume) et de glycérine (6 parties), puis brosser après séchage et terminer par un rinçage.

Les taches ayant le **cuivre** comme origine peuvent disparaître après application d'un mélange composé (en masse) de 2 parties de chlorure d'ammonium, 8 parties de talc, 3 parties d'ammoniaque.

Les taches provenant de l'**aluminium** peuvent être traitées avec une solution d'acide chlorhydrique à 10 %.

Les taches provenant d'**huiles animales ou végétales** (par exemple huile de lin) peuvent disparaître après application d'une pâte composée d'une partie de phosphate de sodium, 1 partie de

perborate de sodium, 3 parties de poudre absorbante (talc, chaux ou blanc d'Espagne) mélangées dans une solution savonneuse. Il est déconseillé d'utiliser des solvants seuls, qui favoriseraient l'étalement et la pénétration de la tache.

Pour les **huiles minérales**, il est conseillé d'utiliser une pâte composée de benzène mélangée à une poudre absorbante.

Les taches provenant des **huiles de vidange** des véhicules sont parmi les plus difficiles à enlever car elles contiennent des impuretés métalliques très finement divisées ainsi que des imbrûlés.

Les taches de **graisse** peuvent être nettoyées avec une solution détergente ou une solution de phosphate trisodique.

Les taches de **bitume** peuvent être traitées avec un mélange de benzène et de poudre absorbante, mais sont généralement difficiles à enlever.

Les taches de **peinture** disparaissent après l'application d'un solvant (trichloréthylène) ou de lessives alcalines.

Les taches dues au développement de la **végétation, mousse, algues**, disparaissent après brossage énergique à l'eau de Javel.

Les taches **brunes** provenant en général de matières humiques contenues dans les granulats s'enlèvent à l'aide de soude ou de lessives alcalines.

## 7. Traitement de la surface du béton

À la différence des matériaux compacts et non poreux comme la céramique, le granit et le verre, les parements en béton perdent à chaque lavage un peu de leur laitance superficielle, ce qui les rend plus sensibles et plus fragiles en surface. Il est donc nécessaire de les protéger contre les risques de dégradations provoquées par l'abrasion induite par le transit des poussières dures dans les microfissures, contre les actions cycliques du gel et du dégel et aussi contre l'accroissement de la perméabilité du béton (qui favoriserait la migration de l'humidité, facteur aggravant les risques de corrosion des armatures).

Actuellement les meilleures solutions de protection consistent à réaliser les deux traitements suivants : durcissement et imperméabilisation.

### 7.1 Traitements durcisseurs

Ils provoquent la transformation des carbonates de calcium tendres en fluorures de calcium plus durs et indécomposables. L'opération s'effectue en pulvérisant à refus une solution de fluosilicate de magnésium sur la surface nettoyée. Pour éviter les dépôts blancs, il faut protéger ou rincer pendant la projection.

Ce traitement de durcissement est définitif.

Le fluosilicate de zinc a aussi été employé comme durcisseur.

Les cristaux de chaux sont transformés en fluorure de calcium insoluble.

D'une façon générale, les procédés les plus anciens sont la silication et la fluation.

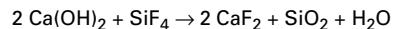
La **silication** consiste à traiter la surface sèche du béton par une solution chaude de silicate de sodium  $3 \text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O}$  ou de potassium  $3 \text{SiO}_2 \cdot \text{K}_2\text{O}$ . Le carbonate de sodium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  provenant de l'hydratation du ciment est transformé en silicate de calcium plus dur et insoluble. Les pores du béton sont bouchés en partie, ce qui améliore l'imperméabilité. Cette couche formée n'est pas visible. Il est recommandé d'utiliser des solutions dont le rapport silice/soude est au moins égal à 3. L'application doit s'effectuer en 2 ou 3 couches à un jour d'intervalle.

La **fluation** a été proposée en 1882 par un chimiste français Kessler, initialement pour durcir les pierres calcaires, puis utilisée avec succès depuis 1905 pour le béton. Elle consiste à imprégner la surface à l'aide d'un sel fluosilicique  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  (fluosilicate de magnésium, de zinc, d'aluminium). La chaux en présence de silicate est transformée en fluorures de calcium et de magnésium (ou de zinc ou d'aluminium) et il se forme de la silice colloïdale. Par exemple, avec le fluosilicate de magnésium on a la réaction suivante :



D'autres traitements ont été développés à l'étranger (Allemagne, Hollande), notamment l'ocratation. Elle est basée sur l'utilisation d'un gaz, le tétrafluorure de silicium ( $\text{SiF}_4$ ).

La réaction obtenue est la suivante :



La fluation est plus profonde que celle obtenue par imprégnation.

## 7.2 Hydrofuges de surface

Les pores du béton sont imprégnés avec une résine hydrophobe qui empêche l'eau et les salissures de s'y incruster et d'y pénétrer, cela en laissant passer l'air et la vapeur d'eau. Le traitement d'imperméabilisation se fait lorsque le traitement de durcissement est sec.

On peut appliquer des silicones qui rendent la surface hydrophobe. Souvent des savons métalliques du type stéarate de zinc sont combinés avec des résines silicones, car ils améliorent leur résistance à l'hydrolyse alcaline.

Les hydrofuges à base de résines acryliques en solvant pétrolier s'appliquent en deux couches (300 à 400 g au  $\text{m}^2$ ) qui forment un revêtement microporeux laissant respirer le matériau, tout en étant étanche à l'eau. On commercialise, par exemple, un mélange de résine du type méthylacrylamine avec un accélérateur (persulfate d'ammonium) et un durcisseur.

Les hydrofuges les plus utilisés sont à base de silicones dans des solutions qui permettent une pénétration de 2 à 5 mm suivant la compacité du support et le mode d'application.

Il existe deux familles de produits :

— les siliconates en solution aqueuse (composés, par exemple, de 5 à 8 g de méthylsilicate de potassium et 95 à 92 g d'eau) ; ces solutions peuvent s'appliquer sur un rapport légèrement humide, mais l'utilisation par temps sec est conseillée ;

— les silicones (par exemple, un méthylpolysiloxane) en solution dans un solvant organique (toluène, white-spirit).

## 8. Traitement anti-graffitis

La lutte contre ce type d'agression des parements se situe à deux niveaux suivant que l'on désire protéger préventivement ou effacer les marques d'une agression.

Les principes à respecter dans le choix de ces protections ou de ces décapants font appel aux mêmes critères de respect de la nature et de la fonction des supports, en particulier veiller à la respiration de l'épiderme des matériaux.

Dans l'évaluation d'un traitement, il convient de tenir compte de la répétitivité du phénomène qui nécessite des actions de nettoyage fréquentes et qui, à la longue, peuvent dégrader non seulement la surface du parement mais aussi le cœur du matériau.

Cela est fréquent pour les décapants très énergiques, plus agressifs, capables de faire disparaître sur pratiquement tous les types de surface les inscriptions d'origines diverses : peinture, feutre, crayons.

Les produits de protection les plus performants ne permettent pas aux inscriptions de s'accrocher ; celles-ci peuvent s'enlever au jet ou à l'éponge sans que la protection anti-graffitis soit entamée.

Ces produits sont en général des vernis réticulés, sortes de peintures qui stoppent la migration pigmentaire de la peinture utilisée par les graffeurs.

Il existe également des produits liquides pour décoller les affiches.

## 9. Protection des surfaces en béton (peinture, revêtement)

### 9.1 Préparation des supports

Avant d'appliquer une couche de protection sur une surface en béton, des précautions sont à prendre.

Le taux d'humidité doit être inférieur (en masse) à 5 %. Cette humidité libère l'alcalinité du ciment et des risques de saponification sont encourus lors de l'application de produits gras (peintures alkydées, glycéroptthaliques) et à un degré moindre pour les peintures à l'acétate de polyvinyle.

Les travaux de mise en peinture doivent respecter les règles de l'art : DTU 59-1 pour les peintures et films minces, et DTU 59-2 pour les revêtements plastiques épais (RPE).

Cela implique que le support soit préparé pour être sain et cohérent. Les opérations suivantes sont nécessaires : décapage, brossage, sablage, époussetage, ponçage, etc.

L'application d'une couche d'impression permet de fixer les fonds et améliore l'adhérence des couches de finition.

Le décapage par voie chimique impose un rinçage efficace et la protection des éléments de construction voisins (ouvertures, portes, volets).

L'action de l'eau froide ou chaude sous pression n'est pas conseillée sur les supports de faible cohésion et poreux.

Par ailleurs, comme l'eau pénètre par capillarité, sa présence risque de ralentir la progression des travaux, le séchage devant être suffisant pour que le support contienne moins de 5 % d'eau. Le soin et la qualité des travaux préparatoires jouent un rôle essentiel (aussi important que le choix des produits) sur la tenue des futurs revêtements.

Dans certains cas d'exposition, des traitements spécifiques sont à envisager, l'application de produits anticryptogamiques détruisant

(au moins pendant un certain temps) l'ensemencement biologique (mousses, algues, champignons...).

Les solutions fongicides et algicides appliquées par pulvérisations ou au rouleau donnent une protection efficace.

De même, le traitement des fissures avant l'exécution des revêtements est nécessaire (§ 3.3 et 3.4 et article *Travaux de peinture* [C 3 690] du présent traité).

### 9.2 Produits de protection des parements en béton

#### 9.2.1 Peintures à films minces

Les compositions recommandées sont :

- les acryliques en solution dans un solvant organique (type *Piolite*) ;
- les émulsions de copolymères vinyliques ou acryliques.

#### 9.2.2 Revêtements plastiques épais

La différence avec le film mince réside dans les charges de granulométrie variable qu'ils contiennent (normes NF T 30-700) ; par leur nature ils sont plus garnissants. Leur application doit être effectuée selon les prescriptions du DTU 59-2. Leur fonction est d'assurer la décoration en cachant les défauts de la maçonnerie ou du béton (faïencage).

#### 9.2.3 Revêtements semi-épais

Leur rôle est surtout esthétique : cacher les irrégularités du support (faïencage), les différences de teinte, etc.

D'autres ont un objectif supplémentaire qui consiste à assurer l'étanchéité à l'eau d'un support poreux, microfissuré ou fissuré. Ces systèmes souples et adhérents peuvent comporter une armature fibreuse incorporée ou rapportée (textile tissé ou non). Le but de cette armature est d'améliorer la résistance à la traction du revêtement, qui peut être soumis à des tensions sous l'effet des variations de longueur au droit des fissures.

Sur le marché sont récemment apparus des systèmes composés de liants réticulables (sous l'effet du rayonnement solaire) qui sont plus performants que les produits antérieurs à base de résines thermoplastiques très sensibles aux variations de température (durcissant à basse température et ramolissant aux températures élevées).

# Restauration des bâtiments en béton armé

par **Marc MAMILLAN**

Ingénieur de l'École du Bâtiment et des Travaux Publics  
Conseiller Technique au CEBTP (Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics)

## Bibliographie

- [1] MAMILLAN (M.). – *Influence de la mise en œuvre sur l'homogénéité du béton*. Revue Technique du Bâtiment, n° 135, nov.-déc. 1989.
- [2] MAMILLAN (M.). – *Hétérogénéité du béton. Mise en évidence par la vitesse du son*. Annales ITBTP, n° 309-310, sept.-oct. 1973.
- [3] DELOYE (F.X.), BOUSSION (R.), MASSIP (M.), OLIVIER (G.) et RANGEARD (D.). – *Mesure de la profondeur de carbonatation du béton*. Projet de méthode d'essai, n° 17, LCPC, Service chimie, nov. 1986.
- [4] *Mesure de la profondeur de carbonatation du béton durci*. Projet de Recommandation de la RILEM, CPC18, vol. 17, n° 102, Matériaux et Construction (1985).
- [5] PICHOT (C.) et TROUILLET (P.). – *Application de l'imagerie micro-onde à la cartographie des aciers dans le béton armé*. Bulletin de liaison du LCPC, n° 162, juil.-août 1989.
- [6] MAMILLAN (M.), BOUINEAU (A.) et CHAGNEAU (B.). – *Étude de la sécurité des poteaux. Influence des défauts d'exécution*. Annales ITBTP, n° 405, juin 1982.
- [7] COCHARD (C.) et TACHÉ (G.). – *La dégradation du béton armé liée à la corrosion des armatures le long du littoral breton*. Matériaux et Construction, n° 10-11 (1993).
- [8] *Choix et application des produits de réparation des ouvrages en béton*. Guide pratique du LCPC (1977).
- [9] MAMILLAN (M.). – *Bétonnage par temps froid et résistance au gel du béton durci*. Annales ITBTP, n° 477, oct. 1989.
- [10] SCHIESSL (P.). – *Corrosion of the reinforcement and its effects on concrete durability*. Séminaire Durabilité des bétons et des pierres. Munich, nov. 1991.

## Normalisation

### Association Française de Normalisation (AFNOR)

NF T 30-700 3.83 Peintures. Revêtements plastiques épais. Spécifications.

### Documents Techniques Unifiés (DTU)

DTU 59.1 11.1978 Peinturage

DTU 59.2 12.1980 Revêtements plastiques épais sur béton et enduits à base de liants hydrauliques [= NF P 74-202 (5-93)]

### American Society for testing Materials (ASTM)

C876-91 Test Method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete.