

# Projet de renforcement ou de réparation d'un pont

## Réparation, protection du béton et des armatures

par **Daniel POINEAU**

*Ingénieur divisionnaire des Travaux Publics de l'État – Ex-Directeur technique à la Division des Grands Ouvrages du Sétra  
Professeur à l'École nationale des Travaux Publics de l'État, à l'École spéciale des Travaux Publics et à l'École supérieure des ingénieurs des Travaux de la construction  
Consultant*

et **Jean-Armand CALGARO**

*Ingénieur général des Ponts et Chaussées  
Membre permanent du Conseil général de l'Environnement et du Développement Durable  
Professeur au Centre des Hautes Études de la Construction*

*Cette édition est une mise à jour de l'article de Roger LACROIX et Jean-Armand CALGARO intitulé Projet de renforcement ou de réparation d'un pont paru en 1999.*

<b>1. Techniques de réparation du béton et d'ajout de béton .....</b>	<b>C 7 804 – 2</b>
1.1 Ragréages .....	— 2
1.2 Béton projeté .....	— 3
1.3 Coulage ou injection de béton ou de mortier – Produits de calage ..	— 4
1.4 Traitement des fissures et vides .....	— 4
<b>2. Protection du béton .....</b>	<b>— 6</b>
2.1 Fonctions des produits – Systèmes de protection de surface .....	— 6
2.2 Classification des produits et systèmes de protection de surface ...	— 6
2.3 Produits et systèmes utilisables pour la protection du béton .....	— 7
2.4 Choix des produits et systèmes de protection pour béton .....	— 8
2.5 Incidence de l'état du support béton sur la mise en œuvre du produit .....	— 9
<b>3. Prévention et restauration de la passivité des armatures .....</b>	<b>— 9</b>
3.1 Rappel .....	— 9
3.2 Prévention et protection cathodiques des armatures .....	— 9
3.3 Déminéralisation et ré-alkalinisation électrochimique .....	— 10
3.4 Revêtements actifs ou non sur les armatures de béton armé .....	— 11
3.5 Inhibiteurs de corrosion à la surface du béton .....	— 12
3.6 Réinjection des câbles de précontrainte .....	— 12
<b>Pour en savoir plus .....</b>	<b>Doc. C 7 803</b>

**C**e dossier fait suite aux articles traitant de la « Pathologie et évaluation des ponts existants » ([C 7 402], [C 7 403], [C 7 404] et [C 7 405]). De ce fait, il s'adresse aux mêmes lecteurs.

Un pont existant a été conçu pour assurer un certain service. Or, à cause d'erreurs de conception et/ou d'exécution, du vieillissement de ses matériaux, des attaques de l'environnement, de l'agressivité du trafic, d'actions accidentelles, etc., ce pont peut présenter des désordres et ne plus assurer le service prévu. Il faut donc le réparer, voire le remplacer.

Dans certains cas, la capacité portante et la géométrie d'un pont existant ne sont plus adaptées aux nouveaux besoins qui se font jour du fait de

l'augmentation du trafic et des charges. Il faut donc permettre à l'ouvrage de remplir ces nouveaux services, ce qui impose, dans la majeure partie des cas, de le renforcer.

Dans le 1<sup>er</sup> volet de cette thématique, [C 7 803], on abordait les questions de « méthodologie ».

Ici, nous nous concentrerons sur les techniques de réparation et de protection du béton et des armatures.

Ensuite, les articles suivants traitent spécifiquement des méthodes de réparation et renforcement :

- par armatures additionnelles, [C 7 805] ;
- des ponts métalliques, [C 7 806].

Ce dossier traite de :

- restauration du béton ;
- renforcement structurel (ajout de béton) ;
- préservation et restauration de la passivité des armatures ;
- protection du béton.

## 1. Techniques de réparation du béton et d'ajout de béton

Il y a lieu de rappeler qu'une méthode de réparation et/ou renforcement peut jouer plusieurs rôles à la fois. Par exemple, la projection en couche mince d'un micro-béton à la surface d'un élément en béton armé, après purge du béton pollué ou dégradé, va permettre la restauration du béton et, en même temps, celle de la passivité des armatures.

Les principales techniques traitées dans le présent paragraphe concernent la restauration et le renforcement du béton par :

- réparation du béton par **ragréage** ;
- **béton projeté** ;
- **béton coulé ou injecté**, avec ou sans collage ;
- **traitement des fissures et vides**.

### 1.1 Ragréages

Le ragréage correspond à la mise en œuvre de produits ou systèmes de réparation des bétons appliqués, le plus souvent, en faible épaisseur (reconstitution de l'enrobage des armatures) manuellement ou mécaniquement et, en général, sur des surfaces limitées.

L'expérience acquise sur le comportement des produits de ragréage dans le domaine des ponts a conduit à sélectionner les produits les plus efficaces parmi ceux proposés par l'industrie chimique et à réduire l'emploi des produits à base de résines synthétiques qui étaient en vogue dans les années 1970 pour revenir vers l'utilisation plus traditionnelle de produits hydrauliques modifiés par l'ajout de polymères organiques, dont les caractéristiques (coefficient de dilatation, pH...) sont équivalentes au béton de la structure existante.

■ **Avant de procéder à un ragréage**, il est nécessaire de préparer avec soin les surfaces à traiter afin de créer un support sain, propre, rugueux, de nature à favoriser une bonne adhérence au niveau de

la surface de reprise. Les techniques les plus efficaces et les moins traumatisantes pour le béton et les armatures sont l'hydrodémolition et le grenailage ou le « sablage » (abrasifs garantis sans silice interdite à cause des risques pour la santé).

Le burinage manuel, le piquage au petit marteau pneumatique, le bouchardage, le décapage au marteau pneumatique sont des techniques traumatisantes pour le support et les armatures à des degrés divers et doivent donc être sélectionnées avec soin en fonction des objectifs recherchés (par exemple, utilisation d'un marteau piqueur pour enlever rapidement le béton plus ou moins désorganisé, et finir par un sablage à sec ou humide).

Le décapage thermique, le décapage chimique (à interdire pour le BA et le BP) et le rabotage mécanique sont des techniques déconseillées en raison de leur brutalité.

■ **En présence d'aciers corrodés**, il est indispensable de les décapage (par sablage ou grenailage), puis de leur conférer une nouvelle protection à l'aide de produits hydrauliques ou de résines organiques, voire de les remplacer dans les cas extrêmes. **Il est essentiel de dégager les armatures non seulement sur leur face apparente mais sur tout leur pourtour** de façon à éliminer toute la partie dépassivée du béton (figures 1 et 2). Il faut appliquer un passivant sur les armatures ainsi préparées, sauf dans le cas d'une projection de béton par voie sèche.

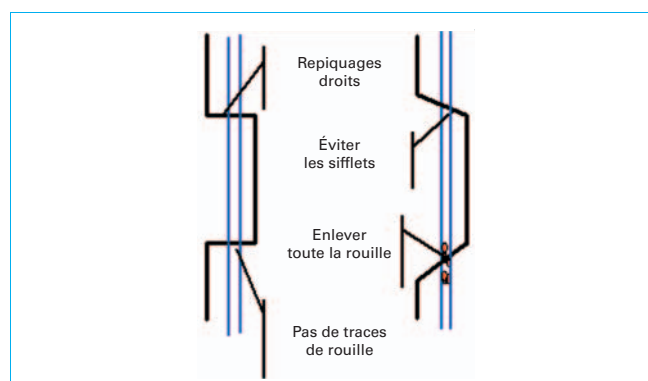


Figure 1 – Décapage des armatures

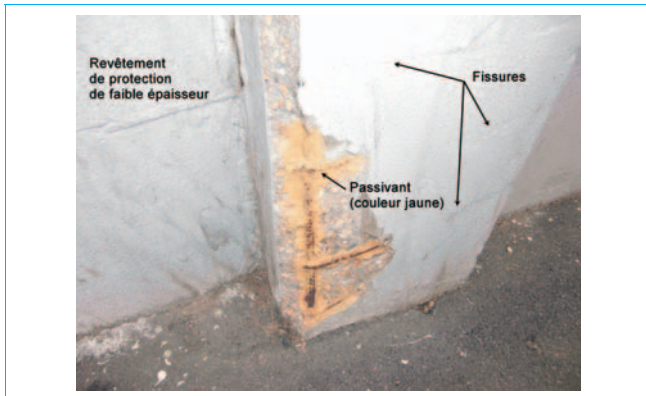


Figure 2 – Conséquences d'un défaut de décapage et de mise en place du passivant sur les armatures (Crédit D. Poineau)

■ Il existe sur le marché une **grande quantité de produits de ragréage prêts à l'emploi qui peuvent être classés en trois catégories** principales :

- à **base de liants hydrauliques**, constitués par un mélange de sable, de ciment, de résines miscibles dans l'eau et, éventuellement, de fibres. Ce sont les produits les plus utilisés ;
- à **base de résines de synthèse**, constitués de sable (dans le cas de mortiers), de polymères organiques réactifs additionnés d'adjuvants spécifiques et, éventuellement, de charges minérales. Les produits les plus couramment utilisés sont ceux à base de résines époxydiques ou polyuréthanes ;
- les **produits mixtes**, qui sont des produits à base de ciment et de polymère organique réactif.

Ces produits sont actuellement visés par la norme NF EN 1504-3 qui classe ces produits en deux catégories (cf. [Doc. C 7 803]) :

- les produits de **réparation structurelle** ;
- les produits de **réparation non structurelle**. Ces derniers ont des performances moindres, en particulier, en matière d'adhérence au support.

Les produits de réparation structurelle peuvent aussi être utilisés dans le cadre d'un renforcement par ajout de matière, donc en forte épaisseur.

Il est très important d'analyser la fiche technique de tels produits car, ils n'ont pas tous le même usage, ne se mettent pas tous en œuvre de la même façon, ne protègent pas les armatures de la même façon vis-à-vis de la carbonatation, etc.

Généralement, les ragréages sont localisés à certaines zones. Il est vivement conseillé d'appliquer un **revêtement de protection** sur toute la surface pour stopper la pénétration de l'humidité et des agents agressifs et pour ponter la microfissure qui se forme à la jonction entre le ragréage et le béton de la structure.

**Remarque** : dans le cas où les surfaces à traiter sont importantes (sous-face complète d'un tablier comprenant le hourdis, les entretoises et les poutres), le recours à un béton projeté par voie sèche, moins coûteux que les produits spéciaux, est à privilégier, d'autant que le traitement est efficace et durable.

## 1.2 Béton projeté

Il existe **deux techniques principales de projection du béton**, dont la différence principale réside dans la chronologie des opérations élémentaires :

- la projection par **voie sèche** ;
- la projection par **voie mouillée**.

Des guides sur la formulation, la mise en œuvre et le contrôle sont disponibles sur le site Asquapro. Se reporter également à la norme NF P 95-102 et aux normes européennes qui traitent surtout de la voie mouillée (cf. [Doc. C 7 803]).

### ■ Projection par voie sèche (avec ou sans pré-mouillage)

Avec cette technique, le mélange des constituants (à l'exception de l'eau) est introduit dans la machine à projeter, puis propulsé dans une canalisation par un flux d'air comprimé. Dans la projection sans pré-mouillage, l'eau est introduite au droit de la lance de projection, tandis qu'avec pré-mouillage l'eau est ajoutée dans la conduite deux à trois mètres avant la lance, ce qui a pour effet de diminuer l'émission de poussières.

### ■ Projection par voie mouillée

Le mélange de tous les constituants du béton, y compris l'eau, est introduit dans la machine à projeter. Le transport est effectué dans une canalisation, soit par un flux d'air comprimé pour la voie mouillée à flux dilué, soit par pompage pour la voie mouillée à flux dense. Dans les deux cas, une injection d'air comprimé à la lance de projection est nécessaire pour accélérer la vitesse de projection. Le béton peut être fabriqué dans une centrale à béton de chantier ou une centrale de béton prêt à l'emploi.

Chacun des procédés ayant ses avantages et ses inconvénients, il convient donc de choisir le mode de projection à utiliser suivant la nature des travaux à réaliser.

Actuellement, en France, l'emploi de la voie sèche est fortement recommandé pour la réparation des ouvrages d'art (bonne adhérence sur le béton support et compactage efficace du béton ainsi mis en œuvre).

### ■ Formulation du béton

La plupart des adjuvants et additions utilisés dans la fabrication des bétons spéciaux mis en place par coulage peuvent être incorporés dans le béton projeté, par exemple :

- les bétons à base de ciment fondu ou de ciment prompt ;
- les bétons légers à base de granulats légers (argile ou schiste expansé) ;
- les bétons à base de fibres métalliques, de verre ou de polypropylène ;
- les bétons avec incorporation de fumée de silice...

Il y a lieu de faire une distinction entre le béton et le mortier projeté utilisés en réparation de structures. Le mortier, appelé parfois « gunite », a des granulats dont la dimension D est inférieure ou égale à 5 mm, tandis que le béton contient des granulats dont la dimension peut aller jusqu'à 16 mm en voie sèche, et 12 mm en voie mouillée.

Concernant le béton projeté utilisé en réparation ou renforcement d'ouvrages d'art, la dimension maximale des granulats se trouve être limitée par la nécessité de réaliser la mise en place du béton projeté en plusieurs passes d'épaisseur 5 à 7 cm, sans recours à l'emploi d'accélérateur de prise.

### ■ Mise en œuvre du béton projeté

Le processus de mise en place du béton est différent selon le type de voie utilisé.

• **En voie sèche**, les divers éléments sortent de la lance avec une vitesse très élevée (de l'ordre de 100 m/s), et les gravillons qui arrivent avec une forte énergie sur le support rebondissent, alors que les grains de ciment et les gouttelettes d'eau forment un film de pâte pure qui adhère au support et qui accueille des grains de sable de plus en plus gros. La couche de mortier ainsi formée permet ensuite aux gravillons de s'insérer. Le rebond des gravillons diminue et la forte énergie cinétique des gravillons qui viennent frapper le béton en place assure son compactage et procure à ce matériau de meilleures performances mécaniques que celles du béton mis en œuvre par voie mouillée.

Ce mécanisme d'adhésion rend inutile toute interposition d'une résine d'accrochage. Selon cette méthode, il est possible de transporter le béton sur des distances importantes : plus de 500 m à l'horizontale, et plus de 100 m à la verticale.

La voie sèche, en raison d'une résistance élevée, d'une bonne adhérence au support et d'une faible fissuration du béton projeté mis en œuvre, est donc bien adaptée à la réparation du béton et aux renforcements structuraux de ponts en béton ou en maçonnerie.

- **En voie mouillée**, les rebonds de gravillons sont beaucoup plus faibles qu'en voie sèche, car ceux-ci arrivent sur le support en étant déjà enrobés par du liant, ce qui facilite leur accrochage. La projection d'un matériau mouillé évite la production de poussières qui constitue un inconvénient de la voie sèche.

Dans le cas de la **voie mouillée à flux dense**, la vitesse de sortie du béton à la lance est relativement faible (de l'ordre de 1 m/s), et les caractéristiques mécaniques du matériau s'en trouvent diminuées par comparaison avec la voie sèche.

La **voie mouillée à flux dilué** constitue une solution intermédiaire de mise en œuvre, qui fournit un béton projeté dont les caractéristiques mécaniques se rapprochent davantage de celles du béton projeté par voie sèche.

La voie mouillée est donc employée préférentiellement dans le domaine des tunnels, de la projection sur terrain (talus, fouilles, berges...) et de la réparation des maçonneries (garnissage de vides, rejointoiements...).

#### ■ Dispositions générales

Pour obtenir une épaisseur fixée de béton, le nombre de passes doit être aussi faible que possible sans, toutefois, chercher à projeter des couches très épaisses, sous peine de provoquer une décohésion du béton ou même de faire retomber les couches ! C'est ainsi qu'avec la voie sèche l'épaisseur souhaitable est de 5 cm, et l'épaisseur maximale de 7 cm. De même que l'adhérence entre béton support et béton projeté doit être bonne, celle entre les diverses couches de béton projeté doit être de qualité. Pour cela, il est conseillé d'éliminer par balayage la laitance de la surface de la couche précédente lorsque celle-ci termine sa prise, et de traiter par sablage, accompagné d'une humidification, cette même surface lorsque la couche précédente a déjà fait prise.

**En aucune manière**, il ne faut interposer de résine d'accrochage entre couches, ni talocher une couche de béton projeté qui joue un rôle structurant : seule peut être talochée une éventuelle couche de finition de faible épaisseur.

Si le béton projeté par voie sèche pose rarement des problèmes de retrait, il convient toutefois d'effectuer une cure soignée pendant plusieurs heures, en particulier pour les parements exposés au soleil ou au vent.

Comme dans le cas des réparations structurelles, les adjuvants sont inutiles dans la mesure où les qualités intrinsèques du béton projeté par voie sèche sont suffisantes.

En réparation de structures en béton, le béton projeté, normalement en voie sèche, peut être utilisé pour :

- reconstituer l'enrobage des armatures (restauration du béton) ;
- des réparations ponctuelle de béton en forte épaisseur lorsqu'il est difficile de couler le béton (par exemple, en sous-face d'un hourdis) ;
- des réparations en fortes épaisseurs sur des surfaces importantes (par exemple pour réparer la paroi d'un tunnel après incendie)...

Le béton projeté par voie sèche ne peut être appliqué sur une surface horizontale ou quasi-horizontale.

## 1.3 Coulage ou injection de béton ou de mortier – Produits de calage

■ **Lorsque le volume de béton à reconstituer est assez important ou de forte épaisseur** (au moins 5 à 10 cm), les techniques de ragréage et de béton projeté peuvent être inadaptées pour des raisons techniques (par exemple, pour réaliser un béton contrecollé afin d'augmenter l'épaisseur d'une dalle).

Une technique alternative permet alors de reconstituer une partie de structure en béton dégradé : le coulage ou l'injection de béton, de mortier ou de coulis. Ce type de réparation est généralement durable, pourvu que la compatibilité chimique entre le nouveau ciment et le ciment en place ait été vérifiée. En raison des épaisseurs mises en œuvre, on ne rencontre pas les phénomènes de gradient thermique de surface qui endommagent parfois la surface de reprise et provoquent le décollement des ragréages. En plus, les épaisseurs mises en œuvre permettent d'armer le béton rapporté et de le connecter à son support (armatures de couture).

■ **La technique traditionnelle de remplissage par coulage** consiste à remplir les coffrages à l'aide de béton ou de mortier en évitant l'emprisonnement d'air et la ségrégation du matériau coulé. Mais on peut également mettre en place, dans un premier temps, les granulats à l'intérieur du coffrage, puis injecter un coulis de ciment ou un mortier fluide pour remplir les interstices entre les granulats (béton « *prepacked* »).

La principale difficulté de cette méthode réside dans la maîtrise des vides laissés entre les granulats, car des bouchons peuvent se former lors de la mise en place des granulats sans que l'on puisse toujours s'en apercevoir. Enfin, une injection de coulis peut être pratiquée lorsque l'on désire consolider des nids de cailloux qui présentent une certaine résistance et que l'on ne souhaite pas détruire. Le coulis doit être suffisamment fluide pour remplir les interstices restés vides. L'opération d'injection nécessite le perçage de deux trous dans le nid de cailloux afin de disposer le tube d'injection, équipé d'une vanne permettant de maintenir une légère pression après l'injection, et le tube servant d'évent.

■ **Dans certains renforcements par ajout de béton**, tel que celui par « **béton contrecollé** », une colle est appliquée sur le béton durci avant coulage du béton frais. Cela permet, dans ce cas, de réduire le nombre des armatures de couture entre les deux bétons. La norme NF EN 1504-4 fixe les exigences en matière de collage structural pour le collage du béton durci sur le béton durci ou du béton frais sur le béton durci (cf. [Doc. C 7 803]).

■ **Lors de reprises en sous-œuvre**, de remplacement d'appareils d'appui, de pose de têtes d'ancrage lors de la mise en œuvre d'une précontrainte additionnelle..., il est souvent nécessaire de procéder à un calage de pièces à l'aide d'un mortier ou d'un micro-béton. Il faut utiliser des produits et systèmes présentant des propriétés particulières comme un retrait compensé et un fluage réduit.

La norme XP P 18-821 traite des produits de calage à base de liants hydrauliques et la norme XP P 18-822 des produits de calage à base de résines synthétiques (il n'y a pas actuellement de norme européenne sur le sujet). Voir [Doc. C 7 803].

## 1.4 Traitement des fissures et vides

Selon l'origine des contraintes de traction qui les ont provoquées, les fissures offrent un faciès et un tracé typiques. Très souvent, notamment dans le cas de la flexion, la fissuration comporte des fissures principales nettes et rectilignes sur lesquelles se greffent de nombreuses ramifications. De telles ramifications peuvent exister aussi au voisinage des armatures proches de la fissure principale : elles sont dues à l'effet d'entraînement des aciers dans la zone perturbée.



### ■ Les fissures sont caractérisées par :

- leur **âge**, qui peut conditionner leur injectabilité à cause de la poussière, des débris, des concrétions qui peuvent obturer la fissure ;
- leur **tracé**, souvent révélateur de leur origine (flexion, effort tranchant...) ;
- leur **ouverture**, mesurable à l'aide d'appareils spécialisés (fissuromètre, compte-fils, jauges d'épaisseur, etc. Certaines méthodes de laboratoire permettent une précision de l'ordre de 0,01 mm mais, en général, une précision de 0,1 mm est suffisante ;
- leur **profondeur**, permettant de distinguer les fissures traversantes, aveugles ou de surface ;
- leur **activité** et/ou leur évolution, permettant de distinguer les fissures inertes (quasiment inactives) des fissures actives dont l'ouverture varie en fonction de facteurs extérieurs tels que température, charges, vibrations, hygrométrie etc. La variation de cette ouverture définit le souffle de la fissure ;
- la présence ou non d'une circulation d'eau...

Le traitement des fissures précède généralement un autre système de réparation. Il peut simplement s'agir d'un traitement de protection destiné à colmater les fissures pour empêcher la pénétration de tout corps étranger et, en particulier, de l'eau, ou d'un traitement de renforcement du béton par introduction d'un matériau rigide en complément d'un ajout de forces par précontrainte pour rétablir le monolithisme de la structure.

### ■ On distingue deux grandes catégories de traitements :

- les traitements de surface ;
- le traitement dans la masse.

#### ● Traitements de surface

Les traitements de surface sont des traitements qui ne réparent pas les fissures, ils permettent de les boucher en surface empêchant ainsi le passage de l'humidité, des liquides, voire des gaz qui sont des agents agressifs à l'intérieur du béton. Ces traitements peuvent s'appliquer à certains défauts de surface. On peut citer :

- le **calfeutrement**, qui consiste à obturer la fissure par application d'un produit déposé sur un fond de joint dans une engravure façonnée le long de son tracé avec une ouverture de l'ordre des deux tiers de sa profondeur (figure 3) ;
- le **pontage**, qui rend hermétique l'ouverture de la fissure par application superficielle d'un film généralement armé et adhérent (épaisseur ~ 3 mm) de part et d'autre des lèvres de la fracture. Le pontage s'insère, le plus souvent, dans un complexe de revêtement général (figure 3) ;
- le **revêtement de surface** qui permet d'étancher une surface présentant un réseau important et diffus de microfissures (fissures peu profondes et non-injectables). Le produit est passé sur la surface concernée, à la brosse ou au rouleau. Il adhère à la surface et, en général, pénètre sur quelques millimètres dans les microfissures. Ce revêtement bouche également les défauts de surface, tels que les pores et capillaires (§ 2).

Le calfeutrement et le pontage ne réparent pas les fissures qui restent ouvertes. Ces traitements sont applicables lorsque les fissures n'ont pas d'incidence structurelle. Dans les zones soumises au gel, un revêtement de surface peut en atténuer très efficacement les effets destructeurs en réduisant la saturation en eau du béton.

#### ● Traitement dans la masse

Le traitement dans la masse consiste à injecter en profondeur un produit (cf. la norme NF EN 1 504-5 dans [C 7 803]) qui va remplir les fissures, vides et interstices. Le remplissage ainsi réalisé, suivant le cas :

- transmet les efforts au travers des fissures, vides et interstices. Il possède des caractéristiques mécaniques voisines de celles du béton environnant. Il permet donc les réparations structurelles (produits de type F) ;

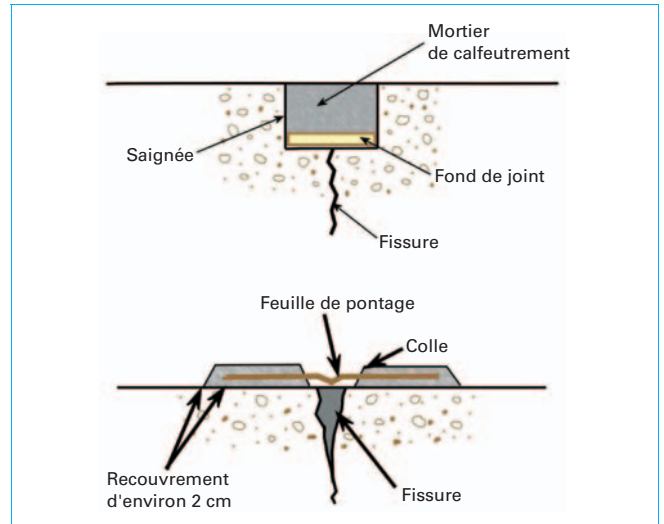


Figure 3 – Principes du calfeutrement et du pontage



Figure 4 – Injection de fissures (Crédit D. Poineau)

- s'adapte aux déformations qui affectent les fissures, vides, interstices et le béton. C'est donc un matériau ductile qui a essentiellement pour but l'obturation de fissures plus ou moins actives (produits de type D) ;
- s'expande dans les fissures, vides et interstices. Ce type de remplissage est utilisé pour obturer les fissures soumises à des circulations d'eau et en permanence au contact de l'eau (produits de type S).

Dans le cas des fissures apparentes, l'injection se fait par cheminement du produit liquide dans la fissure, de l'extérieur vers l'intérieur et normalement du bas vers le haut, après obturation de la partie visible de la fissure (figure 4). Normalement, l'injection se fait sous faible pression de 1 à 2 MPa et même gravitairement (les produits d'injection qui ont une très faible viscosité et un fort pouvoir mouillant pénètrent surtout par capillarité).

Dans le cas de fissures traversantes aveugles, l'injection est toujours difficile à réaliser puisqu'on ne peut intervenir que sur une seule face. La solution la plus couramment utilisée dans ce cas consiste à régler progressivement la viscosité du produit injecté en l'épaississant au fur et à mesure de l'injection, jusqu'à atteindre la pression dite de « refus » à partir de laquelle le liquide ne s'écoule plus.

Dans le cas des vides internes, l'injection est effectuée à l'aide d'injecteurs qui sont fixés ou scellés dans des forages.

## ■ Produits pour injection

Deux grandes familles de produits existent, utilisables en traitement de surface comme en traitement dans la masse, selon leur origine (minérale ou organique).

- Les **produits minéraux** sont des produits compatibles avec les milieux humides. Pendant la mise en œuvre sur le site, ils se présentent sous forme de solution ou de suspension aqueuse. Il s'agit principalement de coulis à base de ciments spéciaux, fabriqués à partir d'un clinker broyé très finement et adjuvantés par l'incorporation de produits synthétiques, de mortiers et pâtes modifiés par des résines qui leur confèrent une extrême souplesse en abaissant fortement leur module d'élasticité, et de silicates qui réagissent avec les ions calcium du béton et que l'on peut modifier par apport d'autres ions pour obtenir, après réaction, un réseau de cristaux insolubles.

- Les **produits organiques** sont des produits synthétiques à macromolécules formant une chaîne réticulaire. Les produits de type F sont principalement des résines époxydiques, systèmes bicomposants thermodurcissables, modifiables par des charges inertes, et les résines polyuréthanes. Ces résines permettent d'atteindre tous les degrés de dureté après polymérisation.

Signalons l'existence de produits acryliques, d'emploi plutôt rare, et de silicones, produits monocomposant qui réagissent avec l'humidité ambiante. Les résines polyester qui ont tendance à se saponifier au contact du béton basique ne sont plus employées.

- **Critères de choix** des produits sont essentiellement liés aux objectifs visés et au milieu ambiant. Les plus importants sont :

- la **compatibilité avec l'environnement** (agents agressifs extérieurs et température) ;
- la **durée pratique d'utilisation** (DPU) en pot après mélange des composants est la période de stabilité du produit dans sa phase d'application. La DPU permet de choisir un produit en fonction du temps d'application souhaité et de la température ambiante ;
- la **viscosité**, grandeur variable avec la température exprimée en pascal seconde (Pa.s), qui caractérise la capacité d'un liquide à s'écouler (une viscosité < 0,5 Pa.s permet normalement d'injecter des fissures > 0,2 mm) ;
- l'**injectabilité**, notion complexe dans laquelle interviennent la viscosité, mais aussi les phénomènes de tension capillaire, de pouvoir mouillant, de porosité absorbante, de frottements, etc. L'essai d'injectabilité consiste à réaliser une véritable injection, sous pression constante, d'une colonne verticale transparente, remplie d'un sable siliceux calibré. On exprime l'injectabilité par le temps nécessaire au produit pour atteindre différents niveaux dans la colonne de sable (cf. la norme d'essai NF EN 1771 dans [Doc. C 7 803]).

## 2. Protection du béton

### 2.1 Fonctions des produits – Systèmes de protection de surface

Lorsque l'enrobage des aciers est trop poreux et/ou d'épaisseur insuffisante, ou lorsque l'environnement est particulièrement agressif, il est souvent nécessaire d'appliquer un traitement de protection du béton. Une telle protection peut aussi être appliquée après une réparation pour protéger la réparation, mais aussi le reste de la structure.

Pour un usage donné, ces produits et systèmes de produits doivent satisfaire à une ou plusieurs des fonctions suivantes :

- protection du béton contre les risques de pénétration :
  - de gaz (tout particulièrement du gaz carbonique responsable de la carbonatation), mesurée par la perméabilité aux gaz,

- de la vapeur d'eau, mesurée par la perméabilité à la vapeur d'eau (une certaine perméabilité à la vapeur d'eau est nécessaire dans le domaine du bâtiment mais, elle entraîne *ipso facto* une perméabilité au CO<sub>2</sub>),

- de l'eau liquide, mesurée par la perméabilité à l'eau et l'absorption capillaire. Un produit assurant cette fonction empêche également la pénétration de l'eau chargée en ions agressifs, tels que les chlorures ;

- contrôle de l'humidité du béton pour conserver la passivité des armatures, limiter les risques de gel... ;
- augmentation de la résistivité du béton pour conserver la passivité des armatures ;
- augmentation de la résistance du béton aux attaques physiques ou mécaniques (frottements, érosion...) ;
- augmentation de la résistance du béton aux attaques chimiques (présence d'eaux séléniteuses, d'eau de mer, d'eaux acides...) ;
- adhérence au support et compatibilité thermique – vieillissement climatique et adhérence au support ;
- résistance minimale à la fissuration, mesurée en provoquant des fissures de diverses ouvertures du support témoin ;
- résistance à la fissuration après un essai de vieillissement ;
- protection du béton contre l'écaillage dû aux cycles de gel-dégel, avec ou sans fondants ;
- résistance au nettoyage à l'eau sous pression ;
- résistance aux pressions d'eau (étanchéité) ;
- stabilité des couleurs (aspect) ;
- classe du brillant spéculaire qui caractérise l'aspect du produit (brillant, satiné, ou mat), etc.

### 2.2 Classification des produits et systèmes de protection de surface

La composition des produits, tels que les peintures et revêtements, fait appel à :

- un liant (acrylique, vinylique, époxydiques, polyuréthanes...) ;
- des charges qui assurent, par exemple, la résistance à l'abrasion, donne la texture... ;
- des pigments qui apportent la couleur ;
- un solvant (produit en phase solvant) ou de l'eau (produit en phase aqueuse) qui sont appelés « véhicules » ;
- des additifs qui apportent, par exemple, la thixotropie.

Pour avoir une vue complète de la **classification** de l'ensemble des produits et systèmes de protection de toutes les sortes de substrats, dont le béton, il faut se référer à la norme NF T 36-005 : peintures, vernis et produits connexes. La classification des produits est basée sur la nature du liant principal (vinylique, acrylique, époxydique...) (cf. [Doc. C 7 803]). Consulter aussi les normes et guides ci-après qui visent les domaines du bâtiment et du génie civil.

#### ■ Domaine du bâtiment

La norme NF EN 1062-1 : produits de peinture et systèmes de revêtements pour maçonnerie et béton extérieurs, classe les propriétés et caractéristiques, et les différents niveaux de performance (exigences), mais elle ne donne aucun conseil sur le niveau de performance à imposer pour un usage donné ou que peut présenter un produit ou un système donné. Il faut se reporter, d'une part, au fascicule de documentation FD T 30-808 : produits et systèmes de peintures pour façades qui liste les différents produits utilisables (silicates, silicones, acryliques, revêtements plastiques...) et, d'autre part, à la norme expérimentale XP T 34-722 qui donne dans un tableau les niveaux de performance minimaux que doivent présenter des différents produits : hydrofuges, lasures, peintures microporeuses, revêtements plastiques épais (RPE), revêtements plastiques semi-épais (RPSE) et revêtements d'imperméabilité.

Les tableaux 1 et 2, donnés à titre pédagogique, montrent, d'une part, que si les produits sont perméables à la vapeur d'eau, cela les rend perméables au CO<sub>2</sub>, un des facteurs de la corrosion des

**Tableau 1 – Caractéristiques performantielles des peintures et revêtements**  
(d'après la norme NF EN 1062-1)

Épaisseur du revêtement $E_i$ (en $\mu\text{m}$ )	Perméabilité à la vapeur d'eau $V_i$ (en $\text{g}/\text{m}^2$ )	Perméabilité à l'eau liquide $W_i$ (en $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ )	Résistance à la fissuration $A_i$ (en $\mu\text{m}$ )
$E_1 \leq 50$	$V_1 > 150$	$W_1 > 0,5$	$A_0$ hors classe
$50 < E_2 \leq 100$	$15 < V_2 \leq 150$	$0,1 < W_2 \leq 0,5$	$A_1 > 100$ à $23^\circ\text{C}$
$100 < E_3 \leq 200$	$V_3 < 15$	$W_3 < 0,1$	$A_2 > 250$ à $-10^\circ\text{C}$
$200 < E_4 \leq 400$	/	/	$A_3 > 500$ à $-10^\circ\text{C}$
$E_5 > 400$	/	/	$A_4 > 1\,250$ à $-10^\circ\text{C}$
/	/	/	$A_5 > 2\,500$ à $-10^\circ\text{C}$

**Tableau 2 – Exigences minimales pour différents produits et systèmes** (d'après la norme NF EN 1062-1)

Produits		Épaisseur du revêtement	Perméabilité à la vapeur d'eau	Perméabilité à l'eau liquide	Résistance à la fissuration
Hydrofuge		$E_1$	$V_2$	$W_2$	$A_0$
Lasure béton		$E_2$		$W_1$	
Peintures microporeuses		$E_3$			
RPE		$E_5$		$W_2$	
RPSE		$E_4$			$A_1$
Revêtements d'imperméabilité	I1				$A_2$
	I2				$A_3$
	I3				$A_4$
	I4	$A_5$			
		$E_5$			

armatures et, d'autre part, que des produits, tels que les hydrofuges, lasures, peintures courantes et revêtements courants ne peuvent absorber la fissuration du support.

#### ■ Domaine du génie civil

La norme NF EN 1504-2 : produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation – Partie 2 : systèmes de protection de surface pour béton, classe les propriétés, caractéristiques et les différents niveaux de performance que doivent présenter les différents produits et systèmes.

Là encore, il faut se référer au guide de l'AFNOR GA P 18-902 et au guide [11] qui donnent des indications sur les fonctions et les niveaux de performance à imposer. L'examen de ces textes montre, dans le domaine du génie civil, un quota d'exigences plus important, ainsi que des niveaux de performances plus élevés que dans celui du bâtiment.

### 2.3 Produits et systèmes utilisables pour la protection du béton

Nous trouvons dans cette catégorie :

– l'**imprégnation hydrophobe** qui permet de rendre la surface hydrofuge, mais sans remplissage des pores. Le produit est passé

sur la surface concernée, à la brosse ou au rouleau, et pénètre de quelques millimètres dans le béton. Produits utilisables :

- silanes et siloxanes ;

– l'**imprégnation** qui permet de réduire la porosité de surface avec un remplissage presque total des pores et capillaires. Produits utilisables :

- **minéralisateurs** (peintures silicatées),
- **lasures**, film mince de  $50\,\mu\text{m}$  ( $0,05\,\text{mm}$ ) ;

– le **revêtement** qui permet d'obtenir une couche protectrice continue à la surface du béton (épaisseur comprise entre  $0,1$  et  $3\,\text{mm}$ , voire plus). Produits utilisables :

- peintures film continu de  $50\,\mu\text{m}$  ( $0,05\,\text{mm}$ ) à  $300\,\mu\text{m}$  ( $0,3\,\text{mm}$ ),
- revêtements de  $0,3$  à  $3\,\text{mm}$ , voire plus.

**Nota** : le guide de l'AFNOR ne va pas au-delà de  $3\,\text{mm}$  d'épaisseur pour les revêtements, mais n'impose pas cette valeur comme une limite à ne pas dépasser.

#### ■ Imprégnations hydrophobes

Elles sont destinées à rendre la surface du béton imperméable à l'eau tout en assurant une perméabilité à la vapeur d'eau. Il s'agit principalement de silicones en solution aqueuse que l'on peut appliquer sur une surface légèrement humide ou de silicones, siloxanes et silanes en solution dans un solvant organique qui exigent une surface sèche. Ils présentent tous la propriété d'avoir un effet

répulsif envers l'eau par modification de sa tension superficielle à la surface du matériau.

Leur durée de vie n'est de l'ordre de quelques années, ce qui signifie que ce type de traitement doit être renouvelé régulièrement pour conserver son efficacité.

#### ■ Minéralisateurs

Ce sont des produits qui contiennent des atomes de silicium capables de réagir avec le calcium contenu dans la chaux du ciment pour donner des microcristaux de C-S-H, dans le cadre d'une réaction de type pouzzolanique. Ce sont des produits d'imprégnation qui pénètrent dans les pores et créent une sorte de « minéralisation du support ».

Les plus couramment utilisés sont les silicates alcalins qui sont parfois associés à des molécules organiques. Leur efficacité et leur durabilité sont semblables à celles des imprégnations hydrofuges.

#### ■ Peintures

Les principales familles de peintures utilisées en génie civil sont les :

- copolymères acryliques ou vinyliques en émulsion aqueuse ;
- copolymères acryliques en phase solvant ;
- résines époxydiques ;
- résines polyuréthanes.

Même si elles assurent une certaine protection, les peintures ont surtout un rôle esthétique. Les peintures à base de résines thermoscurissables (époxydiques, polyuréthanes) présentent en général de meilleures performances que les peintures à base de résines thermoplastiques (acryliques et vinyliques).

#### ■ Revêtements minces à base de liant hydraulique modifié ou de polymères

• Les revêtements minces à base de liant hydraulique modifié (LHM) sont des produits bicomposants constitués d'un ciment additionné de charges minérales et d'une résine miscible souple (par exemple latex styrène-butadiène). Ils sont appliqués en une ou deux couches sur des épaisseurs totales de 1 à 3 mm.

• Les revêtements minces à base de polymères sont constitués de plusieurs couches de résines époxydes (EP) ou polyuréthanes (PUR) dont l'épaisseur totale est comprise entre 0,5 et 2 mm. Ces revêtements minces constituent la meilleure protection contre les agressions extérieures.

#### ■ Revêtements plastiques semi-épais (RPSE) et épais (RPE)

Les revêtements plastiques ont la même composition que les peintures classiques à base des mêmes liants, mais comportent en plus des charges dont la granulométrie atteint le millimètre. Ils sont appliqués pour obtenir une épaisseur finale de 2 à 4 mm, voire plus. Le liant est souvent une résine acrylique ou vinylique en émulsion. Ces revêtements doivent être armés si la fissuration du support est importante. Ces produits sont perméables à la vapeur d'eau et ne peuvent donc empêcher le passage du gaz carbonique. De plus, ils ne peuvent être mis en œuvre que sur des parois inclinées à 45°, au minimum. Ils sont peu adaptés aux ouvrages de génie civil.

Le tableau 3 permet de passer des abréviations françaises aux abréviations européennes

## 2.4 Choix des produits et systèmes de protection pour béton

■ Le tableau 4 résume les points forts et faibles vis-à-vis des fonctions essentielles des familles de produits qui viennent d'être citées.

Tableau 3 – Abréviations françaises et européennes

FRANCE	EUROPE	Nom utilisé dans les normes européennes
LHM	PCC	<i>Polymer Cement Concrete</i>
EP ou PUR	P	Liant polymère réactif

Tableau 4 – Points forts et faibles des familles de produits et systèmes de protection

Caractéristiques	Imprégnations	Lasures	Peintures	RPE, RPSE et revêtements d'imperméabilité	Revêtements minces LHM	Revêtements minces EP et PUR
Étanchéité à la pénétration de l'eau	0 à 1	/	0 à 1	0 à 3		
Étanchéité à la pénétration des chlorures	0 à 1	/	0 à 2	2 à 3		
Étanchéité à la pénétration du CO <sub>2</sub>	0 à 1	/	1 à 2	1 à 3		
Imperméabilisation vis-à-vis de l'eau sous pression	/	0 à 1	/	0 à 3		
Compatibilité avec la fissuration à venir	0	0	0 à 1	1 à 3	1 à 2	1 à 3
Durabilité	1	1	1	2	2	2
Régularité de teinte	0	0	3	3	3	3
Aptitude à couvrir les irrégularités de parement	0	0	1	3	2	2
Aptitude à couvrir le faïençage	0	0	1	3	3	3
Aptitude au nettoyage	/	1	1 à 2	0 à 3		
<b>3</b> très satisfaisant <b>2</b> satisfaisant <b>1</b> passable <b>0</b> mauvais comportement ou n'apporte rien						



**Attention**, ce tableau est donné à titre indicatif. Le choix d'un produit passe par l'examen des **normes** et des **notices techniques**.

#### ■ Incidence de l'état du support béton sur le choix de la famille de produits

Le support béton doit faire l'objet d'une véritable expertise, car l'état du support et son environnement doivent être pris en compte dans le choix du revêtement de protection. L'expertise porte sur les points suivants :

- orientation du support (parties verticales, inclinées et horizontales, ou quasi horizontales) et exposition aux intempéries et agents agressifs ;
- défauts géométriques d'ensemble : creux, bosses, balèvres... ;
- défauts de texture : nids de cailloux, traces de ressuage, bullage... ;
- défauts d'aspect : taches, coulures, poussières, micro-organismes... ;
- caractéristiques physiques et chimiques : surface lisse ou rugueuse, porosité, perméabilité, résistance à l'arrachement, humidité, pH... ;
- fissuration et ses causes...

#### Exemples

**1<sup>er</sup> cas.** La porosité du béton joue un rôle dans le choix de la famille de produits à utiliser :

- porosité < 12 % : tous les produits sont utilisables ;
- 12 % ≤ porosité ≤ 20 % : utiliser les peintures ou les revêtements ;
- porosité > 20 % : seuls les revêtements sont envisageables.

**2<sup>e</sup> cas.** En présence d'une corrosion en cours de développement des armatures, il faut commencer par réparer le béton armé avant de procéder à la mise en œuvre d'un revêtement.

**3<sup>e</sup> cas.** L'importance de la fissuration du support peut imposer la mise en place d'une armature pour armer le revêtement...

## 2.5 Incidence de l'état du support béton sur la mise en œuvre du produit

Suivant l'état du support existant et l'aspect souhaité après mise en œuvre du produit, une préparation, plus ou moins lourde du support, est nécessaire (consulter le site STRRES [Doc. C 7 803]).

# 3. Prévention et restauration de la passivité des armatures

## 3.1 Rappel

Dans le dossier [C 7 803] sont listées les différentes techniques de préservation et de restauration de la passivité des armatures, passives comme actives. Ces différentes techniques sont développées dans la suite du texte.

## 3.2 Prévention et protection cathodiques des armatures

■ La **protection cathodique** est une technique permettant de stopper un processus de corrosion. Elle doit être appliquée avant que les risques d'ordre mécanique soient trop importants. Couramment utilisée pour protéger les matériaux métalliques immergés ou enterrés, elle n'est évoquée ici que dans le cas des armatures du béton.

■ La **prévention cathodique** s'applique aux armatures non encore touchées par la corrosion. Dans un tel cas, l'intensité de courant nécessaire pour empêcher la corrosion est nettement moins importante (entre 0,2 et 2 mA/m<sup>2</sup>) que dans le cas d'une **protection cathodique** (entre 2 et 20 mA/m<sup>2</sup>).

Ces deux techniques de protection font l'objet de la norme NF EN 12696 qui définit les principes, les limites d'emploi, les différents procédés, la mise en œuvre, le contrôle et le fonctionnement d'une installation à courant imposé (cf. [Doc. C 7 803]).

Cette méthode consiste à abaisser, en tout point de l'armature, le potentiel (potentiel de structure) de ce métal jusqu'à une valeur dite potentiel de protection, qui est telle que la vitesse de corrosion de l'acier devient négligeable. L'abaissement de potentiel est obtenu en imposant le passage d'un courant électrique qui va de l'enrobage vers l'armature. Ce potentiel ne doit pas être trop négatif, sinon l'eau interstitielle du béton pourrait se décomposer par électrolyse, et de l'hydrogène pourrait alors se former et fragiliser les aciers à haute résistance, tels que les armatures de précontrainte (il n'y a pas de risque de fragilisation des aciers par l'hydrogène sous réserve de la stricte application de la norme susvisée).

■ La **polarisation** est obtenue par la circulation d'un courant continu créé par divers procédés. Dans le circuit ainsi créé, le pôle négatif est relié à l'armature et le pôle positif à une anode placée à la surface du béton d'enrobage (figure 5).

La protection cathodique des armatures du béton est un procédé efficace lorsqu'elle permet la formation, à leur surface, de produits passivants sans cesse renouvelés. Il ne s'agit donc pas d'éliminer les possibilités de dissolution métallique, mais de repassiver les aciers quelles que soient les agressions venant du milieu extérieur.

■ La **prévention et la protection cathodique peuvent être réalisées** soit par :

- des **anodes actives (protection galvanique)**, en général en zinc, placées sur le parement (sous forme d'un film continu sur toute la surface de la pièce), ou dans le béton (dans ce cas, pour les ouvrages en construction, elles sont placées avant le coulage et, pour les ouvrages existants, dans des encoches, des saignées..., à créer, qui sont ensuite rebouchées), les anodes sont reliées aux armatures pour permettre le passage du courant ;
- **courant imposé** au moyen d'un générateur électrique qui fournit un courant continu circulant entre une anode placée à la surface de la pièce (enrobée ou non) et la cathode constituée par l'armature. Ce procédé présente l'avantage de s'autoréguler en fonction de la résistivité du béton laquelle dépend de son humidité.

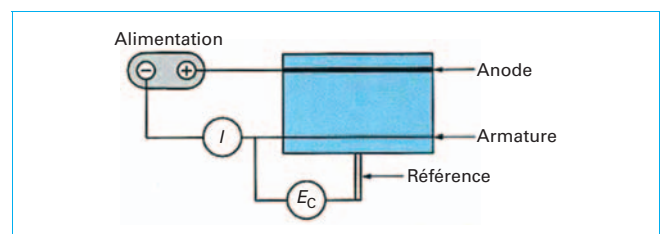
■ On distingue **deux procédés** :

- avec anodes en titane activé avec **deux variantes** (anodes placées dans des rainures ou à enrober de béton) ;
- avec revêtements conducteurs en guise d'anodes.

Le terme d'**ensemble anodique** recouvre la notion d'anode.

#### • Procédé avec anodes placées dans des rainures

Selon ce procédé, le courant arrive par des fils de platine ou des bandes de titane (anodes primaires) disposés dans des rainures creusées par sciage du béton, dont l'espacement est généralement



**Figure 5 – Principe de protection cathodique des armatures dans le béton**

compris entre 7,50 et 30 m. Les anodes secondaires sont des torons à base de carbone ; elles sont placées dans des rainures perpendiculaires aux précédentes, à un espacement qui n'excède pas 200 mm.

Ce procédé n'est plus appliqué à la protection des tabliers de ponts car sa durée de vie est trop limitée.

#### • Procédé avec anodes à enrober de béton

Plusieurs procédés à base d'anodes enrobées de béton sont envisageables. Le plus efficace, mais aussi le plus cher, emploie une anode en treillis de titane traité (dit « activé »), qui est ancrée au béton par des fixations isolantes, espacées de 0,60 à 0,90 m. Le courant est amené par des petites barres en titane. Ces anodes sont ensuite recouvertes de béton (béton projeté pour les surfaces verticales).

#### • Procédé avec revêtements conducteurs comme anodes

Des procédés plus récents utilisent des **ensembles anodiques**, soit **métalliques** sous forme de zinc pur ou allié déposé sur le béton par métallisation : le métal est projeté à l'état de gouttelettes sur le béton pour former un revêtement mince, soit **organiques** à base de carbone. Ce revêtement est en fait une anode secondaire, l'anode primaire étant une barre métallique (à base de titane, de cuivre, etc.) fixée sur le béton. À noter que de telles anodes en zinc déposé par métallisation ont été utilisées pour la protection cathodique des armatures par la méthode de protection galvanique, c'est-à-dire sans alimentation électrique.

Des revêtements de peintures conductrices sont aussi utilisés comme anodes. Le courant admissible dans ces revêtements est environ six à dix fois plus faible que pour les autres types d'anodes. Leur durée de vie est également plus faible.

Des anodes primaires, sous forme de fils de cuivre nickelé fixés sur le béton, sont associées à du béton projeté conducteur, contenant des fibres de carbone, et d'une épaisseur d'environ 6 mm. Ce procédé est aussi très récent et sa durabilité n'est pas encore connue.

L'annexe C de la norme donne, à titre indicatif, la durée de vie potentielle des différents systèmes anodiques :

- 5 à 15 ans pour les revêtements métalliques et organiques ;
- 25 à 100 ans pour les ensembles anodiques en titane activé.

#### • Conception, mise en œuvre et suivi d'une installation de protection cathodique

La protection cathodique s'applique principalement dans les zones, à identifier, où les armatures risquent de se corroder. Les désordres dus à la corrosion (délamination...) doivent être réparés (purge du béton, nettoyage des armatures, réfection de l'enrobage des armatures par un mortier ayant une résistivité voisine de celle du béton existant (pas plus de 50 à 200 %). Ensuite, chaque zone est équipée d'une anode reliée par des câbles conducteurs au pôle positif du redresseur lié à un transformateur électrique (ou du générateur) et d'une électrode de référence qui sert principalement à mesurer le potentiel (de structure) de l'acier sous protection. La continuité électrique des armatures dans une zone protégée par une anode individualisée doit être assurée.

La conception d'une installation comprend le calcul de dimensionnement qui a pour but de définir les caractéristiques de l'installation et notamment :

- le nombre et l'emplacement des zones d'implantation d'anodes ;
- le type et les caractéristiques des anodes ;
- le courant total nécessaire, donc les caractéristiques de l'alimentation électrique.

Pour ce calcul, la densité de courant à appliquer par unité de surface d'armature à protéger dépend de la résistivité moyenne du béton d'enrobage. Cette résistivité dépend fortement de sa teneur en sels, tels que les chlorures, et peut être mesurée. Pour donner

un ordre de grandeur, la résistivité d'un béton sain est supérieure à 1 000  $\Omega \cdot m$ , celle d'un béton pollué par des chlorures inférieure à 100  $\Omega \cdot m$ . La densité de courant en  $mA/m^2$  est de l'ordre de :

- 50 pour un béton de moins de 100  $\Omega \cdot m$  ;
- 30 pour un béton de résistivité comprise entre 100 et 1 000  $\Omega \cdot m$  ;
- 10 pour un béton sain de résistivité supérieure à 1 000  $\Omega \cdot m$ .

Le calcul du courant total à appliquer à partir du parement (produit de la densité de courant par l'aire totale des armatures sous une anode) détermine l'anode à utiliser.

Après la conception de l'installation de protection cathodique et avant sa mise en place, des vérifications complémentaires sont nécessaires, portant sur :

- le bon état de l'enrobage de béton au niveau des anodes ;
- la continuité des armatures : ce contrôle s'effectue en mesurant la résistance électrique entre deux éléments du réseau d'armatures, après dégagement local de l'enrobage de béton. La continuité entre deux points de mesure est assurée si la résistance est inférieure ou égale à 50  $\Omega$  ;
- la continuité des anodes, en mesurant également les résistances électriques ;
- éventuellement, la conductivité du matériau autour des anodes.

La mise en route d'une installation de protection cathodique se fait par étapes successives, car la formation du produit passivant autour des aciers n'est pas instantanée : les six premiers mois de mise en service d'une protection cathodique sont considérés comme étant une période transitoire. Le réglage définitif de l'installation est fait après cette période, en ajustant le potentiel de structure, sous polarisation, à une valeur comprise entre – 800 mV et – 1 050 mV (par rapport à l'électrode argent – chlorure d'argent), en tout point de la construction protégée. Ces valeurs correspondent à une température voisine de 20 °C et à un béton placé dans l'air.

Le suivi du fonctionnement d'une installation de protection cathodique consiste à vérifier le bon état général des appareils, des circuits électriques et des dispositifs de sécurité. Ces opérations sont effectuées au moins une fois par mois.

En cours d'exploitation, les contrôles suivants sont effectués au moins tous les **deux mois** pour vérifier que les grandeurs électriques gardent des valeurs conformes aux indications initiales. Ces grandeurs sont essentiellement :

- les températures indiquées par les sondes ;
- le courant d'alimentation ;
- la différence de potentiel entre anode et cathode ;
- le potentiel de structure.

Tout cela montre que la mise en œuvre d'une protection cathodique est onéreuse, mais cette technique présente un intérêt incontestable lorsque les interventions de maintenance ou de réparation sur un pont doivent être aussi espacées que possible, par exemple pour ne pas gêner son exploitation.

### 3.3 Déminéralisation et ré-alkalinisation électrochimique

La déminéralisation électrochimique ou déchloruration a pour but d'extraire les chlorures contenus dans le béton. La ré-alkalinisation a pour but d'augmenter le pH du béton de façon à restaurer la passivité des armatures. Seule la ré-alkalinisation fait l'objet d'un texte qui est le fascicule de documentation FD CEN/TS 14038-1.

■ **Attention**, ces deux techniques ont des **limites d'emploi bien précises** :

- la déminéralisation et la ré-alkalinisation sont déconseillées, sauf essais préalables, pour les **structures précontraintes**, dans l'état actuel des connaissances, à cause des risques de fragilisation des aciers de précontrainte par l'hydrogène ;

- au cas où les granulats du béton sont potentiellement réactifs, il faut faire des essais de ré-alkalinisation préalables pour détecter tout risque de réaction entre les nouveaux alcalins et les granulats ;
- la déminéralisation est impossible si le béton est totalement saturé en sel ou si la pénétration des chlorures (au-delà de 0,4 % du poids du ciment) dépasse nettement l'épaisseur de l'enrobage des armatures (le traitement ne peut concerner que les ions présents dans la zone d'enrobage parcourue par le courant entre l'anode et la cathode ;
- la ré-alkalinisation pose problème si la profondeur de carbonatation dépasse nettement l'épaisseur de l'enrobage. Il est cependant possible de prendre en compte les lits d'armatures plus profonds, mais la profondeur d'action de la technique ne dépasse pas 20 cm.

#### ■ Deux procédés sont opérationnels :

- procédé à **courant imposé** par un générateur qui circule de l'anode vers les armatures qui jouent le rôle de cathode. Ce procédé impose de séparer la déminéralisation de la ré-alkalinisation ;
- procédé à **anode active** directement reliée aux armatures et basé sur la création d'un courant galvanique. Ce procédé permet de réaliser la déminéralisation et la ré-alkalinisation en même temps.

##### ● Procédé à courant imposé

Dans le procédé, breveté, à **courant imposé**, un treillis formant anode est fixé sur la paroi de béton à traiter, puis enrobé par une couche de cellulose (pâte à papier). Pour la **déminéralisation**, la cellulose est maintenue constamment humide par arrosage et, dans le cas de la **ré-alkalinisation**, la cellulose est imprégnée d'une solution alcaline (carbonate de sodium). Une tension électrique continue est appliquée entre ce treillis (anode) et la nappe d'armatures de l'ouvrage (cathode). Ce treillis est constitué d'acier, dans le cas d'une anode sacrificielle, et de titane, dans le cas d'une anode inerte. Les ions négatifs et, en particulier, les ions chlorures  $\text{Cl}^-$ , placés dans ce champ électrique migrent vers l'anode. Cette opération provoque aussi, à la cathode, une réaction électrochimique avec création d'ions hydroxyles  $\text{OH}^-$  qui tendent à renforcer le pH autour de l'armature (nouvelle passivation), mais qui migrent aussi, en partie, en direction de l'anode.

La densité de courant habituellement utilisée est d'environ  $1 \text{ A/m}^2$ , et les tensions se situent entre 30 et 40 V. Le traitement, qui peut durer de 6 à 12 semaines, permet d'extraire entre 50 et 80 % des chlorures situés dans le béton, surtout au voisinage de la surface. Si le taux de chlorure mesuré dépasse les 0,4 %, ou risque de remonter à ce niveau (présence de grandes quantités de chlorures derrière les armatures), il faut envisager une nouvelle campagne. Si le traitement n'est pas suivi d'une ré-alkalinisation, il faut que le béton puisse sécher dans une atmosphère où le degré d'humidité ne dépasse pas 50 % ce qui impose de choisir une période de traitement favorable au séchage.

Le procédé est relativement coûteux et ne saurait apporter une solution définitive sans la mise en place, par exemple, d'un **revêtement de protection** destiné à empêcher une nouvelle pénétration des chlorures.

Pour la **ré-alkalinisation**, le principe et la mise en œuvre du procédé sont très proches de ceux relatifs à la méthode d'extraction des chlorures. Les deux différences principales résident dans le remplacement de la pâte à papier humide par une pâte à papier imprégnée d'une solution alcaline, généralement à base de carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), et dans l'application d'une densité de courant plus faible ( $0,1 \text{ A/m}^2$ ).

Bien que le mécanisme de cette méthode électrochimique de ré-alkalinisation ne soit pas complètement élucidé, on distingue deux phénomènes principaux qui sont :

- une électrolyse à proximité de la cathode permettant, par la création d'ions  $\text{OH}^-$ , de renforcer la passivité des aciers ;
- une pénétration des ions  $\text{Na}^+$  en provenance de la solution alcaline.

##### ● Procédé à anode active

Dans le procédé, breveté, à anode active, les **deux opérations d'extraction** des chlorures du béton armé et de régénération du pH se déroulent en même temps. Ce procédé fonctionne en auto-génération de courant et sous très faible intensité. Il consiste à polariser négativement les armatures au moyen d'une anode sacrificielle placée dans une solution alcaline. Un fil conducteur relie l'armature et la grille anodique faite dans un métal à fort potentiel électrique. Une différence de potentiel d'environ 1,5 V s'établit entre l'armature et l'anode par effet de pile, dès l'application de l'électrolyte sur la grille.

Cette nouvelle méthode électrochimique apparaît donc comme une méthode plus « douce » que les méthodes classiques d'extraction des chlorures et de ré-alkalinisation du béton.

### 3.4 Revêtements actifs ou non sur les armatures de béton armé

Lors d'une opération de réparation d'un béton dégradé, si les armatures présentent une quelconque corrosion, il est nécessaire de procéder à l'élimination de toute trace de rouille et, normalement, d'appliquer sur toute la surface des armatures un revêtement de protection contre leur corrosion, d'autant que le produit de réparation n'a pas toujours un caractère passivant. La mise en œuvre d'un revêtement n'est pas nécessaire et, même, déconseillée dans le cas de mise en œuvre d'un béton projeté par voie sèche. La norme NF EN 1504-7 fixe les caractéristiques que doivent présenter ces types de produits (cf. [Doc. C 7 803]).

#### ■ Deux types de produits sont utilisables :

- les **revêtements actifs** qui contiennent des pigments actifs (pigments métalliques, inhibiteurs de corrosion anodiques) permettant un contrôle des zones anodiques là où se produit la dissolution de l'acier ;
- les **revêtements étanches** qui isolent l'armature de l'eau interstitielle (résines synthétiques).

##### Attention

En cas de défaut local de mise en œuvre d'un **revêtement étanche**, une corrosion par piqûre va apparaître, puis se développera en corrosion cavernueuse laquelle entraînera la destruction de l'armature sous le revêtement.

Normalement, le revêtement ne doit pas déborder sur le béton car cela n'assure pas une protection durable contre la corrosion, comme le montre la figure 6.



Figure 6 – Mauvaise mise en œuvre d'un revêtement de protection sur des armatures de béton armé (Crédit D. Poineau)

### 3.5 Inhibiteurs de corrosion à la surface du béton

L'usage des inhibiteurs de corrosion est connu depuis de nombreuses années, par exemple en mélange dans un béton frais ou en revêtement sur les armatures.

Certains produits peuvent être appliqués sur la surface des bétons et migrer vers les armatures assurant ainsi leur protection.

■ Le guide de l'AFGC [12] classe ces produits en **trois catégories** :

- les **inhibiteurs anodiques** qui réduisent le courant de corrosion sur la zone anodique (zone où se développe la corrosion). Ils sont surtout utilisés comme ajout dans le béton frais ;
- les **inhibiteurs cathodiques** :
  - les inhibiteurs d'adsorption qui réduisent le courant de corrosion au niveau de la cathode,
  - les inhibiteurs non oxydants qui augmentent la surtension cathodique ;
- les **inhibiteurs mixtes**.

Les inhibiteurs peuvent avoir une base organique comme les aminoalcools, les sels aminés d'acides carboxyliques et les glucoheptonates, ou une base minérale comme les monofluorophosphates (MFP), les nitrites...

■ L'utilisation de ces produits ne relève, pour le moment, d'aucune norme, fascicule de documentation, ou guide. Quelques **limites d'emploi** sont cependant connues :

- en cas de délaminations dues à la corrosion des armatures, les réparations préliminaires doivent être effectuées ;
- en présence d'une forte teneur en chlorures (au-delà de 0,6 à 0,8 %), la vitesse de corrosion peut s'accroître ;
- en présence d'une carbonatation l'efficacité paraît meilleure ;
- les inhibiteurs à base de nitrites (nitrite de sodium) ne doivent pas être utilisés sur des bétons soumis à des cycles de gel-dégel.

L'utilisation de tels produits impose donc une **épreuve de convenance** sur plusieurs zones après avoir déterminé le niveau de carbonatation et la teneur en chlorures des différentes parties du support à traiter. Sur ces surfaces d'essais, l'inhibiteur est appliqué à divers dosages, et il faut s'assurer que la teneur en produit du béton autour des armatures atteint bien la valeur minimale requise.

■ La mise en œuvre des inhibiteurs de corrosion obéit aux étapes suivantes :

- une **préparation de surface** qui comporte l'enlèvement des anciens revêtements, de la laitance,..., est indispensable afin d'ouvrir les pores pour faciliter la pénétration du produit. De plus, les zones de délamination par corrosion des armatures doivent être purgées ;
- les inhibiteurs sont ensuite appliqués sur toute la surface du béton et leur pénétration contrôlée ;
- puis, un rinçage soignée débarrasse le béton de toute trace du produit pouvant nuire à l'adhérence des ragréages à effectuer sur les zones purgées ;
- un revêtement actif, compatible avec l'inhibiteur, est mis en place sur toute la surface des armatures apparentes, avant la mise en œuvre du produit ou du système de réparation ;
- enfin, après une nouvelle préparation de surface, la mise en œuvre d'un revêtement de protection sur le béton est conseillée pour augmenter l'efficacité de la réparation.

**Conseil** : consulter le site du CEFACOR dont une commission s'est déjà prononcée sur l'efficacité de ces types de produits (cf. [Doc. C 7 803]).

### 3.6 Réinjection des câbles de précontrainte

La réinjection des conduits de précontrainte peut permettre de conserver ou de restaurer la passivation des armatures de précontrainte sous réserve que les armatures ne soient pas affectées par une corrosion fissurante sous contrainte.

■ **Réinjection de conduits de précontrainte au moyen de coulis de ciment**

La technique de réinjection des câbles de précontrainte a beaucoup de points communs avec celle de l'injection de fissures. Il s'agit d'injecter des vides, souvent détectés par auscultation gammagraphique et identifiés à l'aide de sondages, laissés par une injection incomplète de câbles de précontrainte.

Dès qu'un conduit est ouvert, on peut, grâce à un endoscope à fibre optique, faire une évaluation de l'état des armatures tendues (degré de corrosion) ; on peut également connaître avec précision le type de conduit de précontrainte utilisé et son diamètre. Il reste alors à évaluer l'importance du vide, c'est-à-dire le volume à injecter. La méthode la plus courante est la méthode par mise sous pression d'air. La mise en pression peut être remplacée par une mise en dépression : c'est le principe de la **méthode d'injection par le vide**.

Lorsque l'on procède à l'injection d'un câble, on introduit le coulis par une extrémité et on le fait progresser vers l'autre extrémité. Dans le cas de défauts d'injection, il existe des zones vides dont on ne connaît pas l'étendue ; rechercher leurs extrémités conduirait à multiplier les sondages, avec le risque d'affaiblir dangereusement les sections résistantes pour constater en fin de compte que les extrémités se trouvent dans une zone inaccessible. C'est pour cette raison que la technique mise au point pour la réinjection est basée sur l'utilisation d'un seul point d'accès au câble qui peut se situer en n'importe quel point du tracé.

L'opération de réinjection consiste à remplacer l'air présent dans la cavité par un produit du type coulis de ciment très fluide et stable. Le remplissage ne peut être complet que si l'on parvient à évacuer l'air emprisonné. Pour ce faire, on utilise la technique du vide qui exige l'emploi de tuyauteries et de raccords spéciaux, tant pour le circuit de mise sous vide, que pour celui d'injection qui est, lui aussi, à un certain moment, mis en dépression. On injecte de préférence des produits ayant peu de parties volatiles et de forte densité (coulis de ciment par exemple), de façon à se réserver la possibilité de procéder à un contrôle gammagraphique, une fois la réinjection terminée.

**Remarque** : il est aussi possible de réinjecter les conduits de précontrainte au moyen de résines, comme les résines époxydes, mais, une résine ayant un pH de 7, n'assure pas la restauration de la passivité des armatures.

■ **Stabilisation de la corrosion d'armatures de précontrainte au moyen d'inhibiteurs de corrosion**

Il existe un procédé breveté PMD – ATEAV, d'origine belge, de stabilisation de la corrosion des armatures de précontrainte au moyen d'inhibiteurs de corrosion de type nitrites. Ce procédé reste du domaine expérimental, bien qu'un retour d'expérience d'une dizaine d'années soit prometteur.