



Groupe de travail

"Réhabilitation du béton armé dégradé
par la corrosion"



Documents scientifiques et techniques

Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion

Novembre 2003

Le présent document a été préparé, à la demande du Comité Scientifique et Technique de l'AFGC, par le groupe de travail AFGC / CEFRACOR (Centre Français de l'Anti-Corrosion).

L'objectif de ce groupe "Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion" est d'établir des recommandations pour guider dans le choix du mode de réhabilitation le mieux adapté pour une structure présentant de la corrosion, et ceci en fonction de critères tels que le processus de dégradation concerné, les caractéristiques du béton armé, le milieu environnant, les contraintes et sujétions rencontrées, etc.

Le document ci-après s'adresse aux gestionnaires, maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvre, architectes, confrontés à des problèmes de corrosion de structure ainsi qu'aux entreprises de réparation, laboratoires de contrôle, applicateurs et fournisseurs de produits concernés par la mise en œuvre de méthodes ou produits de réhabilitation.

La rédaction du document a été réalisée par les membres du groupe :

Guy Taché	(CEBTP), animateur
André Raharinaivo	(LCPC), co-animateur
Ginette Arliguie	(LMDC)
Alain Bouineau	(Rincent BTP)
Patrick Charlemagne	(Effiscience)
Emmanuel Courteville	(Ananeo)
Michel Donadio	(Sika)
Christelle Ebner	(Sika)
Laurent Fontaine	(Ananeo)
Gilbert Grimaldi	(CETMEF)
Olivier Houdusse	(LERM)
Philippe Loutrel	(Rénofors)
Brigitte Mahut	(LCPC)
Bernard Malric	(MFP SA)
Elisabeth Marie-Victoire	(LRMH)
Philippe Merrien	(Gaz de France, CEOS DESPC)
Isabelle Moulin	(LERM)
Daniel Poineau	(SETRA)
Annick Texier	(LRMH)
Christian Tourneur	(Freyssinet)
André Vincens	(CEBTP)

La coordination a été assurée par Jocelyne Jacob (SETRA), Responsable des publications au sein de l'AFGC et Guy Taché (CEBTP), Animateur du groupe de travail.

SOMMAIRE

1.	DONNEES CONCERNANT L'OUVRAGE	4
1.1.	Introduction	4
1.2.	Types de dégradations du béton armé	11
1.3.	Origines et mécanismes des désordres dus à la corrosion	12
1.4.	Conséquences des désordres	14
1.5.	Cas des ouvrages en béton précontraint	15
2.	CARACTERISATION, DIAGNOSTIC	16
2.1.	Introduction. Objectifs du diagnostic	16
2.2.	Visite préliminaire	18
2.3.	Inspection détaillée	19
2.4.	Investigations in situ	20
2.5.	Analyses et essais de laboratoire	26
2.6.	Rapport de diagnostic	29
3.	CONTRAINTES ET EXIGENCES	31
3.1.	Contraintes structurelles	31
3.2.	Contraintes de site et d'exploitation	34
3.3.	Exigences à prendre en compte pour les réparations	37
3.4.	Durabilité	38
4.	LES METHODES DE REHABILITATION	39
4.1.	Reconstitution de l'enrobage	39
4.2.	Imprégnations	47
4.3.	Inhibiteurs de corrosion	51
4.4.	Revêtements de surface	55
4.5.	Béton projeté	65
4.6.	Traitements électrochimiques	73
4.7.	Récapitulatif	83
5.	CONTROLES DE LA MISE EN ŒUVRE	87
5.1.	Préparation des travaux	88
5.2.	Contrôle intérieur de l'entreprise	89
5.3.	Contrôle extérieur du maître d'œuvre	91
	ANNEXES	92
	DOCUMENTS DE REFERENCE	106

1. DONNEES CONCERNANT L'OUVRAGE

1.1. INTRODUCTION

Ce document traite d'une part, des dégradations par corrosion des ouvrages en béton armé en service et, d'autre part, des techniques de prévention ou de réparations de ces désordres.

Les ouvrages et éléments concernés par la corrosion des armatures sont les suivants :

- **Bâtiments** : acrotères et balcons, dans toutes les atmosphères, éléments verticaux et terrasses, en milieux industriel et maritime. Ce sont bien sûr les éléments les plus sensibles des bâtiments, du fait soit de leur minceur, soit de la difficulté à maintenir des enrobages suffisants.



photo 1.1 : Eclats en formation

- **Bâtiments industriels** : poteaux et dalles. Ces éléments sont en effet soumis assez souvent à des expositions d'agents chimiques. Les poutres sont également des éléments particulièrement sensibles des constructions industrielles, car supportant parfois les dalles de plancher. Certaines d'entre elles sont parfois dans des états assez surprenants.



photo 1.2 : Poutre support de réservoir

- **Parkings** : poutres et dalles, en milieu maritime ou montagneux. Cela est lié dans les deux cas à la présence des chlorures (provenant respectivement de l'eau de mer et des sels de déverglaçage).



photo 1.3 : Poteau porteur sous garage



photo 1.4 : Poteau support de ligne électrifiée

- **Composants de structures préfabriquées** : il ne semble pas que des problèmes importants soient à signaler dans cette rubrique, du fait probablement que les bétons sont mieux soignés et mieux mis en œuvre. Toutefois, les poteaux de lignes électriques par exemple semblent être un objet de préoccupation. Il existe également une importante pathologie touchant divers éléments de construction, due à l'utilisation dans les années 60-80 d'accélérateurs de prise à base de chlorures de calcium. Cela concerne des panneaux de façade, des acrotères, jardinières, etc.
- **Ponts et ouvrages d'art** : dans cette catégorie d'ouvrages, il apparaît que les zones les plus sensibles soient les tabliers, les appuis en superstructures, et les équipements de tablier où l'influence des sels de déverglaçage est importante.



photo 1.5 : Pile de pont

- **Réservoirs (enterrés, au sol, aériens)** : le principal problème de ces structures est lié aux circulations d'eau dues soit à la présence de fissures d'origines diverses (thermiques, mécaniques,....) ou de défauts d'enrobages des armatures, notamment si le milieu contient des sels agressifs (chlorures notamment). Sur les structures existantes souffrant de fissures, ou de fuites diffuses, les réparations consistent à colmater les défauts ou à installer une étanchéité.

- **Silos** : les silos pour le stockage des matériaux granuleux ou poudreux (céréales, ciments,...) sont soumis à de fortes contraintes, notamment pendant les périodes de chargement et de déchargement. Ces contraintes induisent des fissures, verticales ou horizontales. Celles-ci peuvent être à l'origine de pénétration d'eau, engendrant une corrosion des armatures.
- **Aéroréfrigérants industriels, de centrale nucléaire** : ces structures sont soumises à un environnement sévère (brouillard d'eau sous forme de vapeur ou de gouttelettes entraînées à l'intérieur, soleil, pluie ou gel à l'extérieur) engendrant des contraintes amorçant des fissures. Par ailleurs le fort gradient hydrique est à l'origine d'un transfert de vapeur d'eau pouvant être la source d'altération du béton.



photo 1.6 : Paroi d'aéroréfrigérant

- **Cheminées** : les cheminées (industrielles notamment) sont soumises à un environnement très sévère, acide particulièrement (acide sulfurique et acide chlorhydrique).

- **Structures portuaires** : celles situées en bord de mer souffrent de l'agression due aux chlorures. L'intensité de la corrosion est liée à l'agressivité du milieu (zone de marnage, d'éclaboussures, d'embruns). Des défauts d'enrobage ou de qualité du béton sont alors immédiatement mis en évidence.



photo 1.7 : Pile en zone de marnage



photo 1.8 : Poutre de tablier



photo 1.9 : Quai en zone de marnage

- **Canalisations en béton armé et précontraint** : la plupart sont enterrées, et des ruptures surviennent lorsque la protection du béton n'est plus suffisante (défauts locaux d'enrobage, présence de chlorures).



photo 1.10 : Tuyau en béton armé

Il faut également signaler les **monuments historiques protégés** (églises ou autres ouvrages des architectes tels que A. Perret ou Le Corbusier), en béton armé, de plus en plus nombreux, qui possèdent leurs contraintes propres, notamment en termes de réparation.



photo 1.11 : Parement en béton armé dans un monastère classé

Certaines structures sont au contact de l'atmosphère : il s'agit, par exemple, des piles et tabliers de ponts, des silos ou des réservoirs. D'autres sont au contact avec le sol et éventuellement de l'eau : il s'agit, par exemple, de canalisations ou de pieux pour fondations. Enfin certaines structures sont au contact à la fois du sol et de l'eau ou de l'atmosphère et de l'eau. Il s'agit, par exemple, de culées de ponts, de quais (fluviaux ou maritimes), de tunnels ou de murs de soutènement.

Les milieux naturels que sont l'atmosphère, les sols ou les eaux, peuvent également contenir des produits qui sont agressifs vis-à-vis du béton armé, par exemple, des engrais ou des sels de déverglaçage.

Il convient aussi de remarquer que le béton lui-même peut être dégradé de diverses façons. Mais, le processus de corrosion des armatures dépend en fait assez peu de son origine.

1.2. TYPES DE DÉGRADATIONS DU BÉTON ARMÉ

1.2.1. Les phases de dégradation

La dégradation du béton armé comporte deux phases successives :

- une phase d'incubation ou de latence (dite parfois d'amorçage) qui correspond à l'altération lente du béton, sans qu'il ne se produise encore des effets visibles,
- une phase de développement (dite parfois de croissance) des dégradations du matériau.

La phase d'incubation s'arrête :

- soit lorsque les produits formés par les réactions internes du ciment atteignent un "volume critique" provoquant un gonflement néfaste du béton (par exemple, par réaction sulfatique),
- soit lorsque l'enrobage de béton ne protège plus les aciers contre la corrosion (par exemple, si l'enrobage est carbonaté).

La phase de développement est celle où les dégradations sont visibles. A ce stade les réparations deviennent lourdes et coûteuses.

1.2.2. Les dégradations dues à la corrosion des armatures

Les corps dissous dans le milieu qui environne l'ouvrage, peuvent pénétrer progressivement dans le béton. Certains d'entre eux sont agressifs, par exemple le dioxyde de carbone (CO_2), les acides (engrais, etc.) et les chlorures.

Un acier mis au contact d'un béton qui a une forte basicité (pH de l'ordre de 12) et qui n'est pas pollué par des chlorures, se recouvre d'oxydes protecteurs. Si son enrobage est chimiquement modifié, cet acier se recouvre de produits "intermédiaires" qui ne sont pas stables en présence d'oxygène dissous dans le béton. Ils se transforment en des produits "finaux" non protecteurs, ce qui conduit à la dissolution et à l'enrouillement continu de l'acier.

C'est pourquoi, les dégradations par corrosion des armatures produisent des défauts qui ne deviennent visibles qu'après un certain délai. Les défauts invisibles sont des modifications chimiques et parfois physiques (liés à la microstructure) de l'enrobage de béton. Il s'agit aussi du début d'un éclatement (délaminage) de cet enrobage ou de la formation d'une fine couche de rouille sur l'acier. Dans certains cas, la dissolution des armatures se produit, sans aucune trace visible sur le parement.

Les dégradations mises en évidence sont des éclatements, des épaufrures et des fissures du béton d'enrobage. D'autres mécanismes peuvent également être à l'origine de ce type de désordres. Lorsque la corrosion est très avancée, des traces de rouille sont visibles, les armatures peuvent être mises à nu et leur dissolution (perte de section) constatée.

1.3. ORIGINES ET MÉCANISMES DES DÉSORDRES DUS A LA CORROSION

1.3.1. Les agents corrosifs dans les milieux au contact du béton

Les bétons armés sont au contact d'un milieu naturel : atmosphère, eaux ou sols. Ces milieux contiennent souvent des produits qui sont agressifs vis-à-vis du béton ou des armatures. Ainsi, les sulfates contenus par exemple dans l'eau de mer et les eaux séléniteuses peuvent provoquer le gonflement du béton, s'ils sont en quantité suffisante. Mais les agents qui sont à l'origine de la corrosion des armatures sont surtout le dioxyde de carbone et les chlorures.

Le dioxyde de carbone CO_2 pénètre sous forme gazeuse dans le béton. Il provoque une réaction, dite de carbonatation, avec l'eau interstitielle. Le front de carbonatation avance progressivement à partir du parement. Il transforme les hydroxydes [surtout, la chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$] en carbonate (CaCO_3) et abaisse le pH de la solution interstitielle depuis environ 13 jusqu'à environ 9. Ceci dégrade la passivation des armatures.

Les chlorures dissous dans l'eau (eau de mer, sels de déverglaçage, etc.) pénètrent à partir de la surface du béton. Ainsi, la teneur en chlorure dans le béton a un certain profil. Il s'agit d'une courbe "concentration-profondeur" qui est strictement décroissante, si les cycles humidification-séchage sont négligeables. Dans le cas contraire, ce profil n'est décroissant qu'à partir d'une profondeur où le béton est, de façon permanente, saturé d'eau (l'eau interstitielle ne s'évaporant pas).

1.3.2. Les stades de corrosion

Le stade d'incubation de la corrosion correspond à la durée pendant laquelle les agents agressifs (dioxyde de carbone, chlorures) pénètrent dans l'enrobage de béton, sans corroder les armatures. Il s'arrête lorsqu'au niveau des armatures, la teneur en agent agressif atteint un certain seuil.

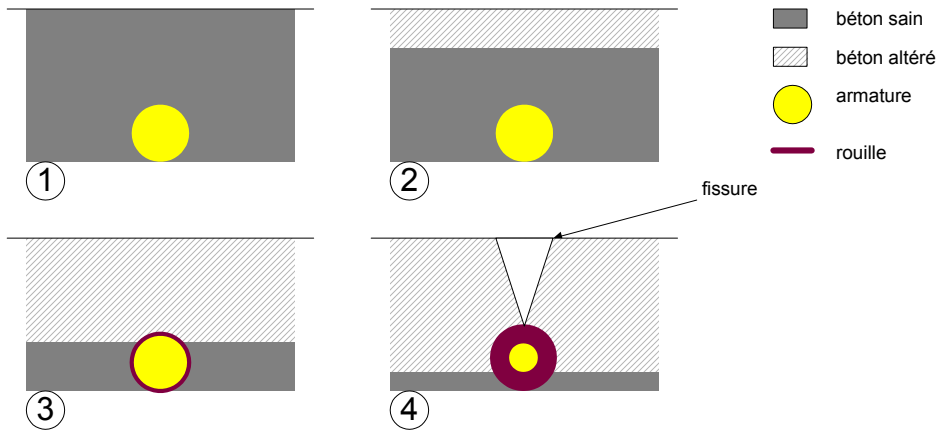
La figure ci-après illustre ces stades de dégradation par corrosion due à des agents agressifs venant du milieu environnant.

Dans le cas de la carbonatation, ce seuil correspond au fait que les armatures se trouvent dans un béton carbonaté et suffisamment humide.

Dans le cas des chlorures, le béton étant alors généralement humide et oxygéné, le seuil correspond très approximativement à un taux de 0,4% par rapport au poids de ciment.

Cette valeur correspond à un rapport de concentrations $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ compris entre 0,6 et 1, suivant les ciments.

Pendant le stade de développement de la rouille, la vitesse de dissolution (corrosion) de l'acier est significative. La rouille formée est le plus souvent gonflante et provoque une désagrégation de l'enrobage, par épaufrure, éclatement ou fissuration.



Dégradation due à la corrosion.

Cette dégradation procède par étape : dans le béton sain (1), un agent agressif pénètre progressivement (2), lorsque sa teneur est assez forte, l'armature commence à se corroder (3) et la rouille peut faire éclater l'enrobage (4)

L'apparition des fissures dépend fortement des caractéristiques de l'enrobage : épaisseur, résistance mécanique, etc. Plus précisément, une fois que l'armature a commencé à se corroder, les fissures apparaissent très tôt même dans un béton de bonne résistance mécanique. Les produits de corrosion diffusent facilement dans un béton poreux et tachent le parement.

1.4. CONSÉQUENCES DES DÉSORDRES

1.4.1. L'aspect de l'ouvrage

Les efflorescences et les taches de rouille conséquence de la pénétration d'agents agressifs dans l'enrobage de béton, altèrent l'aspect de l'ouvrage. Ce point est parfois considéré comme étant de peu d'importance, par le gestionnaire des ouvrages. Par contre, ce sont les fissurations et les fracturations du béton qui commencent à inquiéter le gestionnaire, car des éclats de béton peuvent se produire.

1.4.2. La sécurité vis-à-vis des usagers

Les éclats de béton présentent un risque pour les personnes qui circulent près de l'ouvrage. Leur prévention et leur élimination doivent donc être traitées avec soin.

1.4.3. La stabilité de la construction

Des essais effectués sur des éprouvettes ont permis d'estimer les valeurs des forces d'adhérence pour des éléments en béton dont les armatures sont corrodées. Il est apparu que ni la qualité du béton, ni le rapport enrobage/diamètre d'armature n'influent sur la force résiduelle d'adhérence, même si l'enrobage est fissuré par la corrosion de l'armature sans qu'il ne soit détruit par éclatement.

En ce qui concerne les moments fléchissants et les efforts tranchants, une recherche expérimentale a porté sur l'effet de la corrosion sur ces grandeurs mécaniques. Elle a montré que pour prévoir de façon conservatrice la tenue des éléments en béton armé, il suffit d'appliquer les modèles de calculs classiques, en considérant la section réduite des armatures ainsi que la section réduite de béton. Ainsi, tant que les diminutions de section des armatures restent faibles et que l'enrobage reste cohésif, la corrosion de ces armatures ne modifie pas significativement la tenue au moment fléchissant ou aux efforts tranchants.

Mais lorsque la corrosion a atteint un stade avancé, des calculs plus précis doivent être faits pour évaluer la tenue résiduelle de l'ouvrage. Ce document ne traite que du matériau et laisse de côté les problèmes de structures.

1.5. CAS DES OUVRAGES EN BÉTON PRÉCONTRAIT

Les aciers de précontrainte du béton sont soit directement noyés dans le béton (précontrainte par pré-tension), soit placés dans des gaines qui sont ensuite remplies d'un coulis d'injection, de cire ou de graisse (précontrainte par post-tension). Les aciers tendus et directement au contact du béton, risquent la corrosion avec dissolution et formation de rouille, comme les aciers de béton armé classique.

En outre tous les aciers de précontrainte tendus sont aussi soumis au risque de la corrosion fissurante, sans formation systématique de rouille. La ruine de la structure est alors difficile à prévoir.

Le cas spécifique des ouvrages en béton précontraint n'est pas détaillé dans ce document.

2. CARACTERISATION, DIAGNOSTIC

2.1. INTRODUCTION. OBJECTIFS DU DIAGNOSTIC

2.1.1. Place du diagnostic

Le guide technique "Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton" définit six étapes dans le processus conduisant à une action de réparation. Le diagnostic intervient dans les deux premières étapes de ce processus.

La première étape, appelée « étape de mise en évidence de la dégradation », peut être déclenchée par une opération de surveillance (cas des ouvrages d'art par exemple), une opération d'entretien, ou à la suite d'un événement accidentel (chute de morceaux de béton par exemple). Elle débouche sur le transfert de l'information vers les responsables qui sont ainsi sensibilisés au problème observé.

La deuxième étape est le « diagnostic » proprement dit, ou recherche d'une pathologie à partir des symptômes. Il est demandé dans le cadre :

- d'une étude spécifique,
- de travaux de réfection ou de rénovation, de renforcement,
- d'une inspection régulière mettant en évidence des désordres,
- d'une expertise,
- ou d'une démarche préventive...

Il est à noter que ce texte ne remplace pas "l'Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art", qui constitue un document de référence pour les ouvrages routiers, et qui décrit les modalités de cette surveillance.

2.1.2. Cas particulier de la corrosion des armatures

La corrosion des armatures a souvent pour conséquences des symptômes visibles sur le parement, tels que des éclats, épaufrures, taches de rouille. Dans certaines circonstances, toutefois, une délamination dans le lit des armatures peut se produire, sans signes apparents de corrosion.

La forme, l'étendue des désordres, leur intensité dépendent à la fois de la position des armatures (enrobage, et espacement), de la qualité du béton d'enrobage (compacité et homogénéité), et de l'environnement (nature de l'agent agressif : chlorures).

Ainsi, lorsqu'une corrosion se manifeste, il est raisonnable de s'attendre à ce que le processus de dégradation s'étende au delà de la dégradation visible.

La plupart des méthodes d'investigation sont donc orientées vers la détermination de caractéristiques liées à ces paramètres.

2.1.3. Objectifs du diagnostic de corrosion

Les objectifs d'un diagnostic de corrosion sont :

- l'identification de l'origine (carbonatation, chlorures externes ou internes, autres),
- l'évaluation de l'étendue dans l'espace,
- la prédiction de l'évolution probable, dans le temps ou dans l'espace,
- l'estimation des conséquences sur la sécurité de l'ouvrage ou des personnes,
- la définition des suites à donner et entre autres le principe des solutions de réparation.

Des considérations d'ordre esthétique sont par ailleurs à prendre en compte dans de nombreux cas : bâtiments, monuments historiques, du fait de la nature des matériaux de base, de leur texture, de leur couleur et de la nature du ciment. Ceci est à prendre en compte dans l'établissement du programme d'investigations.

2.1.4. Procédure à suivre

La procédure à suivre pour un diagnostic, s'intègre dans une démarche globale qui peut mener jusqu'à des travaux de réparation.

La découverte des désordres sur une structure entraîne généralement :

- la mise en œuvre de mesures de sauvegarde si nécessaire (purges, filet de protection...),
- la réalisation d'une visite préliminaire et de certaines autres opérations dans le but d'établir un pré-diagnostic,
- la mise au point d'un programme d'investigation,
- le lancement des opérations liées au diagnostic...

L'ingénieur chargé des opérations de diagnostic doit avoir des compétences sur la physico-chimie des matériaux, l'instrumentation, les méthodes de réparation et de traitement. Dans les cas délicats, il devra s'associer avec un ingénieur spécialiste des structures (pour les problèmes d'ordre mécanique), ou un ingénieur chimiste de laboratoire (pour les problèmes liés aux gonflements du béton, etc.).

2.2. VISITE PRELIMINAIRE

La visite préliminaire a pour objet d'améliorer la compréhension de l'état et du fonctionnement de la structure, de préciser les conditions environnementales, les désordres visibles, l'accessibilité des parties dégradées. Cette inspection débouche sur un pré-diagnostic et sur un programme d'investigations. Elle comprend :

- la collecte des informations nécessaires à la compréhension de l'ouvrage : historique, documents, dossiers, rapports, implantation, orientation, date de construction, plans de coffrage et de ferrailage, environnement (nature chimique, vents dominants), matériaux (ciment, agrégats, dosage), etc.
- un examen succinct de l'intégralité de la structure, et le relevé de tous les symptômes avec prise de photographies. On utilisera les moyens d'accès les plus adaptés : il est nécessaire de voir de près les surfaces dégradées. Quelques tests simples (profondeur de carbonatation, présence de chlorures, alcali-réaction) pourront être envisagés à cette étape, afin d'orienter le programme d'analyse futur).

Après cette visite, l'ingénieur doit être capable :

- d'émettre un pré-diagnostic sur les causes probables des désordres,
- d'effectuer la mise au point du programme des investigations. Ce dernier tiendra compte de toutes les sujétions relatives à l'accès, l'environnement, la présence d'énergie électrique etc.,
- d'évaluer si la mise en jeu des responsabilités et garanties est nécessaire,
- et de faire évoluer les mesures de sauvegarde (limitation du trafic, mise sous surveillance renforcée...).

Il doit également estimer le coût probable et la durée des investigations, si celles-ci sont raisonnables au vu de la valeur vénale de l'ouvrage...

2.3. INSPECTION DETAILLEE

L'inspection visuelle de la totalité de la structure est mise en œuvre afin de détecter tous les signes de détérioration, et d'identifier toutes les sources potentielles de désordres. Elle comprend les deux phases suivantes :

2.3.1. Préparation de l'inspection

Il s'agit tout d'abord de vérifier et compléter les informations recueillies lors de la visite préliminaire, de rechercher des documents de synthèse déjà établis, tels que les précédents rapports d'expertise, etc.

Les moyens d'accès seront recensés et définis au préalable, et toutes les dispositions prises (sécurité, accès, nettoyage, etc.).

2.3.2. Inspection

L'inspection proprement dite comprend le relevé, éventuellement sur plans, de tous les désordres visibles, et de tous renseignements utiles quant à l'aspect du parement :

- la présence d'anciens revêtements, ou de produits d'imprégnation,
- l'apparence de la surface du béton, stalactites, efflorescences, traces de rouille,
- la présence de fissures, (ouverture, réseau),
- la détérioration de la peau du béton,
- les armatures apparentes et les épaufrures,
- la déformation de la structure,
- la détection des zones sonnant creux,
- les traces d'humidité.

Ce relevé sera effectué en se référant à un guide des défauts.

2.4. INVESTIGATIONS IN SITU

Le programme des investigations est établi en tenant compte des contraintes et impératifs suivants :

- l'importance de la structure,
- la nature, la gravité et l'intensité des phénomènes, la sécurité des personnes,
- les délais et les coûts,
- l'accessibilité,
- l'environnement, etc.

2.4.1. Mesures relatives aux armatures

2.4.1.1. Mesure de l'enrobage des armatures



L'enrobage des armatures est un paramètre déterminant dans les phénomènes de corrosion. La technique de mesure de l'enrobage fait appel à de nombreux appareils disponibles sur le marché, basés sur des principes magnétiques ou réflectométriques (radar géophysique). Toutefois, les précisions et sensibilités varient fortement d'une technique à l'autre, notamment en fonction de la densité du ferrailage. Ces techniques, dont les performances sont fonction de leur principe de base, permettent d'accéder aux informations suivantes :

- enrobage (profondeur),
- estimation du diamètre des armatures,
- présence d'armatures adjacentes,
- reconnaissance du profil de l'acier.

◀ photo 2.1 : Détection des armatures au radar

L'objectif de ces mesures est de localiser géographiquement les armatures faiblement enrobées (en relation avec les dispositions réglementaires d'une part, et les spécifications particulières d'autre part), d'estimer les surfaces concernées, et enfin d'apporter des éléments quantitatifs pour une modélisation de l'évolution possible des phénomènes (en relation avec la profondeur de carbonatation ou de pénétration des chlorures).

Il est à noter que ces méthodes ne font pas encore l'objet de norme.

L'enrobage des armatures est un paramètre déterminant dans les phénomènes de corrosion. La technique de mesure de l'enrobage fait appel à de nombreux appareils disponibles sur le marché, basés sur des principes magnétiques ou réflectométriques (radar géophysique). Toutefois, les précisions et sensibilités varient fortement d'une technique à l'autre, notamment en fonction de la densité du ferrailage. Ces techniques, dont les performances sont fonction de leur principe de base, permettent d'accéder aux informations suivantes :

- enrobage (profondeur),
- estimation du diamètre des armatures,
- présence d'armatures adjacentes,
- reconnaissance du profil de l'acier.

L'objectif de ces mesures est de localiser géographiquement les armatures faiblement enrobées (en relation avec les dispositions réglementaires d'une part, et les spécifications particulières d'autre part), d'estimer les surfaces concernées, et enfin d'apporter des éléments quantitatifs pour une modélisation de l'évolution possible des phénomènes (en relation avec la profondeur de carbonatation ou de pénétration des chlorures).

Il est à noter que ces méthodes ne font pas encore l'objet de norme.

2.4.1.2. Estimation des surfaces corrodées et évaluation des risques de corrosion : mesures de potentiel

Parmi les méthodes électrochimiques pouvant être appliquées à la détection du risque de corrosion des armatures dans le béton, les mesures de potentiel sont les plus utilisées et les plus connues, du fait de leur simplicité et de leur caractère non destructif. Cette méthode permet une évaluation des risques de dépassivation des armatures.



photo 2.2 : Mesures de potentiel



photo 2.3 : Roue électrode

Dès le contact de l'armature avec le béton, il s'établit à l'interface acier-béton, une différence de potentiel dépendant à la fois des réactions dites anodiques (oxydations : transformation du métal en oxydes) et des réactions dites cathodiques (réduction de l'oxygène). Ce potentiel est complexe et sa valeur dépend de l'état de corrosion des aciers (le potentiel tend vers des valeurs négatives dès qu'il y a amorces de corrosion), mais aussi de la teneur en eau du béton, de la teneur en éléments agressifs, de la profondeur de carbonatation, de la compacité du béton, etc...Il ne peut être relié à ces facteurs par aucune loi, ni aucune formule mathématique, et la valeur absolue de ce potentiel n'aura donc que peu de signification. Néanmoins, les mesures effectuées sur des surfaces représentatives permettent d'établir une cartographie des probabilités de corrosion et de localiser les zones à risque maximum.

Les mesures de potentiel sont surtout utilisées en *phase diagnostic* (elles permettent la localisation des prélèvements ou de tests complémentaires), mais également pendant les *opérations de réparation* (localisation précise des zones à réparer). En *surveillance* continue, elles permettent également la détection d'un phénomène, bien avant qu'un désordre ne soit visible en surface, et ainsi de mieux planifier les réparations (mesures préventives). Elles ne permettent pas de déterminer la position des armatures (on utilisera pour cela des méthodes magnétiques ou de réflectométrie radar), ni leur vitesse de corrosion (perte d'épaisseur).

Elles ne s'appliquent pas :

- aux éléments enterrés ou immergés, à moins d'adapter la méthodologie à ces cas particuliers (par exemple, mettre hors sol, par affouillement, l'élément de structure, le temps de la dépolarisation pouvant demander plusieurs jours),
- au béton revêtu d'un produit électriquement isolant : celui-ci devra être retiré au droit des points de mesure,
- aux armatures actives du béton précontraint, car la présence de la gaine en matière plastique ou métallique, ne permet pas de récupérer le signal correspondant aux câbles. Dans le cas de fils adhérents, par contre, la méthode est applicable.

La méthode nécessite la mise à nu d'une armature, sa connexion à une borne d'un millivoltmètre à haute impédance, dont l'autre borne est reliée à une électrode de référence placée sur le parement.

La jonction entre le béton et l'électrode doit être humide, et si ce n'est pas le cas, cette humidité doit être assurée (pulvérisation d'eau légèrement alcaline, coton imbibé, etc...). L'électrode de référence est une électrode dont le potentiel est constant, et défini par une suite d'équilibres électrochimiques.

Le tracé des cartographies, et l'étude des gradients de potentiel associés au développement des méthodes informatiques (stockage des données) permettent maintenant des interprétations plus fiables et plus précises, et ont conduit au développement de ce type de mesures. Le matériel peut comprendre une ou plusieurs électrodes, ou des roues électrodes.

Nota : Il existe, sur la méthodologie de mesure, à défaut de norme, une recommandation RILEM (voir bibliographie).

2.4.1.3. Estimation de la vitesse de corrosion

Une autre méthode électrochimique permet d'estimer la vitesse de corrosion instantanée des armatures en une zone donnée.



photo 2.4 : Mesure de vitesse de corrosion

Cette méthode est basée sur la linéarité des courbes intensité/potential au voisinage du potentiel de corrosion libre. La pente de la droite $\Delta E/\Delta I$ exprime la résistance de polarisation R_p , qui est reliée au courant de corrosion par $I_{\text{corr}} = B/R_p \cdot A$ où B est une constante, et A la surface concernée par la polarisation. Malgré plusieurs restrictions, d'origine théorique, en mesurant R_p périodiquement, il est possible de contrôler l'évolution du processus de corrosion, d'identifier les zones à forte activité corrosive, et de prédire une durée de vie résiduelle pour la structure considérée.

Les appareils permettant ce type de mesure possèdent leur propre système d'étalonnage.

Nota : une méthode RILEM définit la méthodologie de mesure et d'interprétation.

2.4.2. Mesures relatives à la qualité du béton ou à son vieillissement

2.4.2.1 . Détermination de la profondeur de carbonatation

Elle constitue une détermination du degré de vieillissement naturel du béton (mais surtout sa profondeur de neutralisation par le gaz carbonique).

Parmi les méthodes de détermination de la profondeur de carbonatation, la plus simple à mettre en œuvre, est le test à la phénolphthaléine. Celui-ci consiste à mesurer le front de coloration de cet indicateur sensible au pH, que l'on pulvérise sur une coupe fraîche de béton. Une norme européenne est en cours de mise au point. Il existe des modes opératoires (AFREM-AFPC, RILEM CPC 18). D'autres indicateurs colorés, ayant des plages de virage différentes (bleu de bromothymol, par exemple), peuvent être utilisés.

Des précautions sont toutefois nécessaires pour établir la représentativité d'une mesure de profondeur de carbonatation : il faut faire un nombre suffisant de déterminations, tenant compte des conditions locales d'exposition, de l'hétérogénéité possible du matériau.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode non destructive de détermination de la profondeur de carbonatation.

2.4.2.2. Mesures de résistivité

La corrosion étant un phénomène électrochimique, et le béton étant un conducteur, la résistivité électrique de ce dernier est un paramètre significatif de l'intensité des échanges. Celle-ci dépend toutefois d'un certain nombre de paramètres : teneur en eau du béton, composition chimique de la solution interstitielle (présence de sels), etc...

Les mesures de résistivité sur site ont été utilisées en parallèle avec les mesures de potentiel, pour affiner le diagnostic de la corrosion. En effet, la vitesse de corrosion est contrôlée par la facilité avec laquelle les ions en solution passent au travers du béton, d'une zone anodique à une zone cathodique. Ainsi, de larges gradients de potentiel associés à de faibles résistivités seront caractéristiques de fortes vitesses de corrosion.

Les mesures peuvent être influencées par la présence d'armatures à proximité du point de mesure, par l'effet d'échelle, ou par la présence d'une couche de surface ayant une résistivité différente de celle du cœur du béton. Par ailleurs, le principe même de la mesure (méthode de Wenner à 4 électrodes), possède ses limites. Une nouvelle méthode utilisant une contre électrode de petite taille a été décrite, et permet d'établir une échelle de risque à partir de la valeur de résistivité obtenue.

2.4.2.3. Mesures de perméabilité

Les propriétés physiques du béton, dont sa perméabilité influencent la durée de la période d'amorçage de la corrosion. Une mesure de perméabilité à partir de la surface est particulièrement intéressante. Toutefois, ce type de mesures in-situ est influencé par la teneur en eau du béton, qui limite son application.

Perméabilité à l'air : sa détermination consiste en la mise en pression d'une enceinte, et la mesure de la décroissance de la pression.

Perméabilité à l'eau : dans ce cas, l'essai consiste en la mise en pression d'eau d'une enceinte, et la mesure du débit d'eau par avancement d'un piston destiné à la pression.

La localisation des zones de mesure de perméabilité doit être parfaitement définie, pour éviter les défauts de surface du béton (nids de cailloux, fissures, etc.) qui la perturbent.

En l'absence de normes ou de spécifications, ces mesures restent comparatives.

2.4.2.4. Cohésion superficielle

Cette détermination a son intérêt afin, par exemple, de définir la nature du revêtement ultérieur à mettre en place, dans le cas notamment d'enduit friable, ou en présence d'autre revêtement.

Elle se détermine à partir d'essais d'adhérence sur des pastilles collées sur la surface du béton (de section carrée $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ou circulaire de diamètre 5 cm). La traction est effectuée à l'aide d'un appareil spécifique. Plusieurs mesures sont nécessaires dans une zone (3 au minimum). Les valeurs sont rapportées en MPa. A titre indicatif, l'application d'un revêtement sur un support béton nécessite un minimum de 0,5 MPa.

2.5 . ANALYSES ET ESSAIS DE LABORATOIRE

2.5.1. Méthodes de prélèvements

Des prélèvements sont effectués, si nécessaire, dans des zones représentatives des états de dégradation, par carottage ou forage. Une procédure AFREM donne des indications sur ce point.

Le forage est utilisé, par exemple, pour estimer la pénétration des chlorures. Dans ce cas, il concerne des profondeurs successives, de l'ordre du centimètre.



photo 2.5 : Prélèvements par carottage

2.5.2. Caractérisation chimique

Les caractéristiques chimiques du béton d'enrobage sont déterminées sur les prélèvements :

- *analyse chimique globale* : elle comprend l'analyse de la fraction soluble, du résidu insoluble. Elle a pour objet de déterminer les caractéristiques du béton, dont le dosage en ciment, l'absence d'anomalie,
- *dosage des chlorures* totaux et des chlorures libres (solubles dans l'eau). Les méthodes sont décrites dans les procédures AFREM (ou RILEM). Les teneurs en chlorures s'expriment par rapport au béton ou par rapport au dosage en ciment. Ce dernier peut être connu, ou évalué en laboratoire à partir de la mesure de la silice soluble du ciment préalablement identifié (dans le dossier chantier ou par examen microscopique). L'interprétation des résultats doit tenir compte non seulement des valeurs absolues mesurées, mais aussi de l'allure des profils de concentration,
- *dosage des sulfates*,
- *autres* déterminations particulières (par exemple, les sulfures).

2.5.3. Caractérisation minéralogique

Les caractéristiques minéralogiques du béton sont déterminées par :

- microscopie optique (lumière transmise ou réfléchie) pour la détermination de la nature du ciment, microscopie électronique MEB avec microanalyse élémentaire,
- diffraction des rayons X pour la recherche et la caractérisation des phases cristallines.

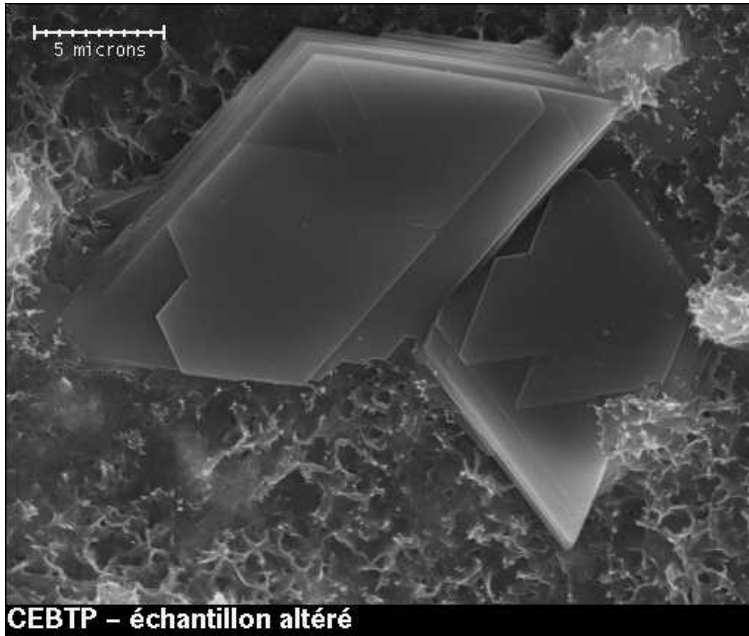


photo 2.6 : Cristal de chloroaluminate

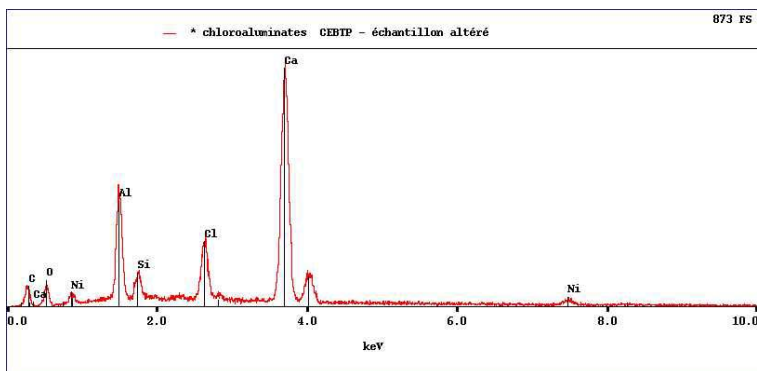


photo 2.7 : Spectre EDS associé

Un document AFREM-AFPC (« Application des méthodes microscopiques à la caractérisation microstructurale des bétons ») donne des indications sur ce point.

2.5.4. Caractérisation physique

Les caractéristiques physiques du béton d'enrobage sont surtout liées à leur résistance à la pénétration (transfert) des fluides :

- porosité à l'eau (éventuellement au mercure),
- perméabilité,
- diffusivité des corps tels que les chlorures,
- absorption capillaire,
- résistances mécaniques et éventuellement d'autres caractéristiques.

Nota . Le béton peut également être affecté par d'autres pathologies telles que l'alcali-réaction, les réactions sulfatiques, ou le gel. En cas de doute, des investigations supplémentaires sont nécessaires pour identifier l'origine de la pathologie.

2.6. RAPPORT DE DIAGNOSTIC

Le rapport de diagnostic présente l'ensemble des résultats et leur interprétation, mais doit être compréhensible par un non initié.

Il comprend :

- l'identification de la structure, le nom du demandeur,
- l'identification du laboratoire (ou de l'ingénieur) chargé de l'étude, la date,
- une brève description de la structure,
- le rappel des objectifs de l'étude,
- la liste des documents consultés,
- les résultats de l'inspection détaillée,
- les résultats des essais in situ et de laboratoire,
- une discussion sur l'origine des désordres, leur étendue, leur évolution probable, et leur incidence sur la sécurité,
- des conclusions claires sur les désordres constatés et des propositions éventuelles de complément d'étude,
- une liste des priorités des réparations et travaux à effectuer,
- des recommandations relatives aux méthodes de réparation les plus adaptées.

BIBLIOGRAPHIE

LCPC SETRA, Septembre 1990 « Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art. Deuxième partie. Fascicule 31 : Ponts en béton non armé et en béton armé »

RAHARINAIVO (A.), ARLIGUIE (G.), CHAUSSADENT (T.), GRIMALDI (G.), POLLET (V.), TACHÉ (G.) « La corrosion et la protection des aciers dans le béton ». Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1998, 167 p.

SETRA LCPC, 1996 « Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton » Guide technique

« Les défauts visibles du béton » Cercle des Partenaires du Patrimoine (LRMH) 1998

“Half Cell Potential Measurements – Potential Mapping to Locate Corroding Reinforcement in Concrete Structures” (Draft) RILEM Recommendation. RILEM TC 154

“Techniques électrochimiques pour mesurer la corrosion dans le béton” RILEM TC-154-EMC: Méthodes d'essai pour mesurer sur site la vitesse de corrosion des armatures en acier dans le béton au moyen de la résistance de polarisation.

3. CONTRAINTES ET EXIGENCES

Ce chapitre dresse une liste non exhaustive de critères pouvant guider l'ingénieur, qui doit préconiser une réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion. En effet, le choix de la méthode ou des produits de réparation est soumis à des contraintes et exigences qui sont liées au type de réhabilitation, ainsi qu'à la nature et à l'environnement de l'ouvrage à réparer.

3.1. CONTRAINTES STRUCTURELLES

L'une des conséquences de la corrosion des armatures du béton armé est un affaiblissement de la structure. L'ingénieur chargé d'étudier la réparation doit toujours avoir présent à l'esprit le respect de la sécurité de service de l'ouvrage, donc de sa stabilité. Il doit, avant même d'envisager des solutions de traitement de cette corrosion, estimer l'état général de la structure et en comprendre le fonctionnement.

Il doit prendre en compte, comme pour un projet nouveau, les contraintes de service d'exploitation, de charges et d'environnement de la structure.

Une visite approfondie de la structure, permettra de déceler les indices révélateurs de la perte de résistance de la structure, tels que les fissures, les écaillages et écrasements locaux de béton etc. Quelquefois cette inspection révélera que la corrosion est d'abord due à un dysfonctionnement de la structure et qu'elle n'est en fait qu'un facteur aggravant.

Les structures visitées sont en général en service et soumises à des chargements, leur âge et leur état général permettent à l'ingénieur d'apprécier les qualités de la conception d'origine et leur fonctionnement structurel. Il ne convient pas de modifier systématiquement les structures, quand leur comportement est satisfaisant. Mais le traitement de la corrosion qui sera envisagé respectera en général le projet, en lui redonnant ses caractéristiques originelles.

3.1.1. Respect du fonctionnement de la structure en l'état

La corrosion des armatures du béton armé peut entraîner un appauvrissement des capacités portantes de la structure. Cette perte de résistance se manifeste par des altérations des matériaux qui sont les suivantes.

3.1.1.1. Pertes de section du béton.

Le foisonnement des oxydes de fer développe des contraintes qui peuvent endommager le béton, allant jusqu'à l'éclater. Il en résulte que les sections résistantes de béton diminuent, les contraintes s'organisent, et transitent par les zones adjacentes. La simple reconstitution de ces sections par un produit de ragréage, n'est pas toujours suffisante pour retrouver le fonctionnement originel de la structure. Il faudra quelquefois avoir recours à des techniques de vérinage pour soulager la structure, avant de reconstituer la section altérée. Cela peut être le cas dans des zones comprimées, la nature des produits de reconstitution devront alors tenir compte de la composition du béton en place et de son module d'élasticité. La forme de la découpe pour curer les zones altérées devra

prendre en compte l'angle des joints de bétonnage de la zone à reconstituer, pour que les contraintes transitent correctement lors du rechargement.

3.1.1.2 . Pertes de section des armatures

La corrosion métallique est une dissolution, donc une perte de section des armatures. Le facteur de sécurité pris en compte dans les calculs de dimensionnement, s'en trouve réduit. L'ingénieur chargé de la réhabilitation de la structure devra estimer ces pertes.

Cette tâche n'est pas facile ; l'estimation se fait généralement de façon statistique après une série de mesures des diamètres résiduels effectuées dans des sondages. Pour les visites d'évaluation, il est très rare de disposer des moyens d'accès utilisés pour l'exécution du chantier. Les sondages d'évaluation sont généralement réalisés dans des zones d'accès faciles, où les sections ne sont pas toujours les plus sollicitées. Il faut donc se garder la possibilité financière de faire exécuter de nouveaux sondages dans les sections les plus sollicitées, et prévoir un éventuel renforcement d'armature.

Si la perte de section est supérieure à 10%, il convient de renforcer les armatures. Il faut, bien entendu, s'assurer que les charges de services n'ont pas évolué, et que réglementairement les armatures en place correspondent aux sollicitations. L'apport de nouvelles armatures peut alors se faire dans la masse, après démolition des zones et reconstitution du béton, soit par un apport externe enrobé dans un béton projeté connecté à la structure, soit par des armatures additionnelles collées sous forme de plaques de tôle ou de tissus de carbone.

3.1.1.3. Ancrage et entraînement des armatures

Les oxydes de fer forment autour des armatures une gaine qui, à partir d'une certaine importance, peut diminuer leur adhérence au béton. Cette perte d'entraînement des barres conduit alors à une perte générale de la résistance de la structure. La mobilisation des efforts par les barres en traction peut être modifiée par un glissement relatif de l'ancrage lors de sollicitations, la mobilisation des efforts se fait alors avec de plus grandes déformations.

Il faut alors quelquefois dégarnir les enrobages de béton altérés pour les reconstituer, ces opérations libèrent totalement les ancrages de barres. Quand ils ne sont pas accompagnés d'un étaieement soigné de la structure avant le repiquage, ces dégarnissages modifient profondément son fonctionnement, et peuvent présenter un réel danger lors de l'exécution.

3.1.2. Respect des matériaux en place

Les traitements de corrosion des armatures du béton armé sont réalisés soit par des apports de matériaux en surface, soit par des reconstitutions de forme après purge, soit par des procédés agissant en profondeur. Le choix des techniques doit être fait en considérant les matériaux constitutifs de la structure, tant sur un plan physique que chimique. Ainsi, le traitement de la corrosion des armatures ne doit pas entraîner une dégradation du béton en place, qui serait due à l'incompatibilité de deux produits en présence. L'action des produits de protection des armatures ne doit pas engendrer, vis-à-vis du béton, des actions secondaires préjudiciables au bon fonctionnement de la structure.

Avant la préconisation du traitement, l'ingénieur s'assurera que la solution choisie est en adéquation avec les conditions de fonctionnement et le milieu ambiant de la structure.

Les effets d'un traitement peuvent être de trois types.

3.1.2.1. Les actions irréversibles sur la nature des matériaux

L'application de produits peut changer de façon irréversible la structure interne ou superficielle des matériaux traités. Certains produits de surface bloquent totalement les porosité du béton et « piègent » l'humidité dans les structures, ils les rendent ainsi plus sensibles aux cycles gel / dégel. Des produits d'imprégnations qui créent des minéraux peuvent modifier l'équilibre chimique du béton en place ou le module d'élasticité des zones fortement imprégnées en surface. D'autres produits peuvent empêcher à jamais la pose de revêtements ultérieurs, etc.

3.1.2.2. Les effets secondaires après traitement

Certains traitements peuvent avoir des effets secondaires, après leur application sur certains bétons. Par exemple, les traitements électrochimiques qui augmentent le pH du béton d'enrobage, peuvent déclencher des réactions d'alcali-granulats. De même, l'utilisation de produit à effet gonflant (à long terme) peut créer des contraintes importantes, pouvant aller jusqu'à des fissurations ou des éclatements.

3.1.2.3. Les conséquence du choix des matériaux de remplacement

Le choix des matériaux de remplacement ou de substitution des zones dégradées doit donc tenir compte de l'état de vieillissement des matériaux en place. Si certaines parties doivent être partiellement reconstruites, on devra s'assurer de la bonne compatibilité des matériaux entre eux. Certains produits, utilisés en ragréages, faciles d'emploi, rapides, et compatibles avec les armatures, ne sont pas toujours compatibles avec les bétons adjacents. Cela peut être le cas des produits dont le liant est à base de ciment alumineux au contact avec des bétons à base de ciment Portland CEM I.

3.2. CONTRAINTES DE SITE ET D'EXPLOITATION

Le choix des produits et des procédés de réparation à préconiser influe fortement sur le caractère pérenne de la réparation. Il doit aussi tenir compte des contraintes d'exploitation et du respect de l'environnement pendant l'exécution.

Pour satisfaire aux exigences liées au site, l'ingénieur devra considérer au moins la localisation de la structure, ses caractéristiques et son ambiance.

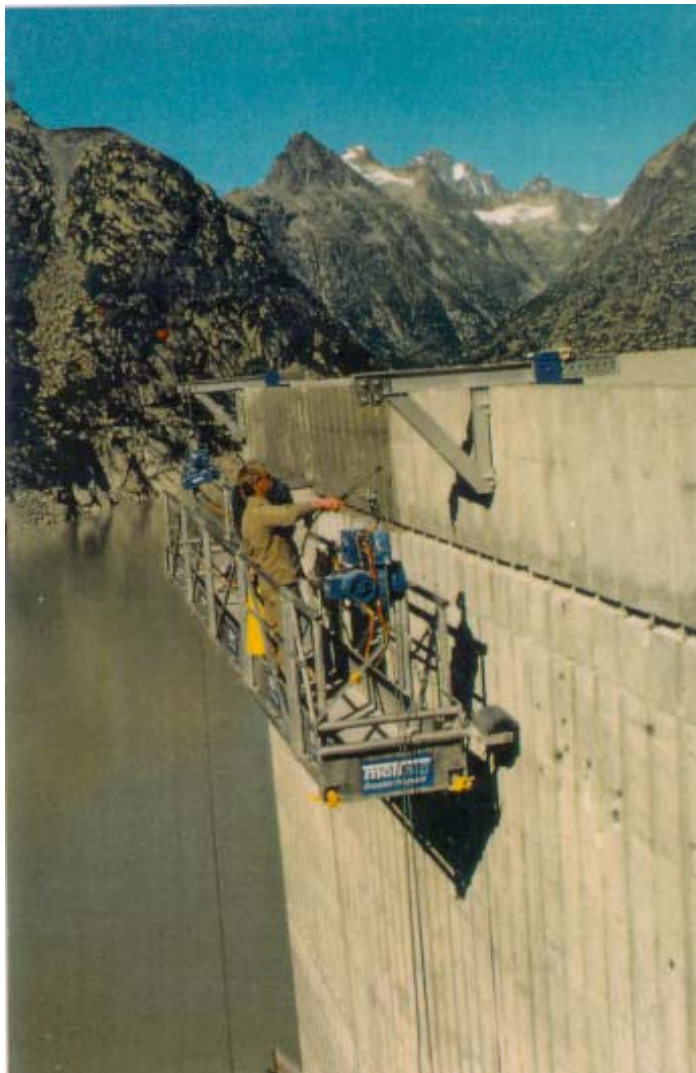


photo 3.1 : Contraintes de site

3.2.1. Localisation de l'ouvrage (agressivité du milieu, situation)

3.2.1.1. En site fluvial et maritime

Les sites maritimes et fluviaux sont caractérisés par la présence d'eaux plus ou moins salines et par une atmosphère humide, avec des embruns en bord de mer. La composition chimique de ces milieux les rend agressifs vis-à-vis du béton armé, surtout en présence de vent.

Par ailleurs, les chantiers de réparation ou réhabilitation doivent être conçus d'une façon telle que les eaux d'évacuation ne soient pas polluées.

3.2.1.2. En site industriel

Sur un site industriel, il est difficile de dresser la liste des polluants et de leurs interactions.

Outre le choix de la solution technique compatible avec les produits présents sur le site, il faut souvent considérer l'enchaînement des phases de travaux avec les contraintes de l'exploitant. Comme les pertes d'exploitation dues aux travaux sur des installations de production sont importantes, il est souvent préférable de prévoir des opérations courtes et partielles, se déroulant pendant des périodes d'arrêt de l'usine, plutôt que des traitements complets qui bloqueraient l'outil de production.

3.2.1.3. En site urbain

L'atmosphère urbaine contient des polluants qui sont principalement des gaz d'échappement ou d'origine industrielle. Les eaux de précipitation sont également agressives.

Par ailleurs, les sels de déverglaçage répandus sur les chaussées sont entraînés par les véhicules dans les parkings souterrains, ou pénètrent dans le sol et finissent par aggraver les canalisations enterrées.

Les réalisations des travaux sont plus contraignantes : elles prennent en compte les contraintes de circulation, la sécurité des usagers dans les endroits publics, etc.

3.2.1.4. En rase campagne

L'ambiance en rase campagne est relativement peu agressive. Il convient de considérer les difficultés d'approvisionnement en continu pour certains « fluides », tels que l'électricité.

3.2.2. Structures en service

Le traitement d'ouvrages en cours d'exploitation doit être choisi en fonction des nuisances temporaires qu'il peut générer lors de sa réalisation telles que :

- les vibrations,
- le bruit,
- les odeurs,
- les poussières.

3.2.3. Ambiance (milieu ambiant, lors de l'application)

La qualité d'une réhabilitation dépend non seulement du produit ou du procédé de traitement, mais aussi des conditions de leur mise en œuvre. Des produits ou procédés performants, mais nécessitant des conditions de mise en œuvre délicates, risquent de mener à un échec, si toutes les spécifications ne sont pas respectées. Les procédés ou produits ont chacun leur limite d'application dans un milieu ambiant donné. Les notices techniques et recommandations pour la mise en œuvre doivent être minutieusement étudiées au préalable.

Il convient de vérifier en particulier, pour un site donné :

- l'hygrométrie,
- le point de rosée,
- la température,
- si l'espace est clos ou ouvert (gaz, ventilation, produit phase solvant, etc.).

Pour ce dernier point, les risques d'explosion et ceux pour la santé des applicateurs, doivent être pris en compte.



photo 3.2 : Projection en conditions difficiles

3.3. EXIGENCES A PRENDRE EN COMPTE POUR LES REPARATIONS

L'objet principal d'une réhabilitation est d'arrêter ou d'éviter la corrosion des armatures du béton armé. Mais le traitement choisi doit aussi répondre aux attentes du client qui peuvent être d'ordre fonctionnel ou esthétique, avec le respect du caractère original ou historique de la structure.

Ces exigences sont traitées au coup par coup. En général, le cahier des clauses techniques particulières fixera les critères de réalisation. Il est recommandé de demander à l'entreprise chargée du chantier, des planches d'essais pour valider les traitements à mettre en œuvre. Il peut aussi être demandé de réaliser in situ, une partie de structure qui servira d'essai de convenance. Cette dernière procédure offre l'avantage de pouvoir valider en une seule fois le matériel, les matériaux et la mise en œuvre de la « planche » de convenance. Ces validations peuvent concerner des exigences :

- de forme,
- de couleur,
- d'aspect,
- de respect de l'environnement.

3.4. DURABILITE

La durabilité d'une réhabilitation correspond au fait qu'elle ne doit pas être renouvelée avant un certain délai, qui est précisé dans une garantie. Cette durabilité dépend de la pertinence du choix de la technique retenue, de sa mise en œuvre et des sollicitations après traitement.

La pérennité de l'ouvrage correspond à son aptitude à remplir les fonctions prévues (mécaniques, esthétiques, etc.). Elle peut être allongée, après traitement de réhabilitation, quand les parements sont de plus revêtus d'un écran protecteur contre les agents agressifs.

La notion de garantie est une notion contractuelle, dont la durée est liée au traitement choisi, pour une structure dans des conditions d'exploitation données. La garantie prend effet après la réception des travaux. La réception des travaux est un acte de fin de travaux qui atteste que la réalisation est conforme au contrat. Avant cette réception l'efficacité du traitement doit être vérifiée.

3.4.1. Les contrôles du résultat des traitements

Certaines vérifications sont simples, comme par exemple les couleurs, les formes, la rugosité etc. D'autres demandent des analyses beaucoup plus fines qui sont précisées dans le chapitre 2. Il faut souvent faire appel à des laboratoires spécialisés pour effectuer ces contrôles.

3.4.2. Le contrôle des revêtements de protection des bétons

Les produits de protection du béton ne sont pas toujours exigés, bien qu'ils constituent une barrière contre les agents agressifs contenus dans le milieu environnant.

La vérification des revêtements se limite généralement à des contrôles de leur adhérence au support, de leur aspect et de leur épaisseur.

4. LES METHODES DE REHABILITATION

4.1. RECONSTITUTION DE L'ENROBAGE

Plusieurs méthodes sont disponibles pour réparer durablement un parement en béton, arrêter la progression des dégradations et éviter de nouveaux désordres. Elles supposent une mise en œuvre attentive, le contrôle des résultats et une surveillance adaptée.

4.1.1. Principes et définitions

La reconstitution du parement a pour objectif de restaurer l'apparence du béton, tout en arrêtant le processus de corrosion et en rendant à la structure son intégrité. Il s'agit de réparations à caractère discontinu, ponctuel et superficiel, pour lesquelles plusieurs précautions doivent être prises :

- si les zones dégradées sont visuellement identifiables (béton décollé, fissures, épaufrures, etc.), l'état des zones adjacentes n'est en général connu qu'après un diagnostic généralisé. Ainsi, les surfaces à dégarnir sont en général sous estimées lors de leur première évaluation ;
- si des zones présentent un risque de corrosion (béton carbonaté, ou pollué par les chlorures), celles-ci peuvent se déclarer après un délai de quelques années, à côté de la réparation, par l'apparition d'un couple galvanique entre la surface réparée et la surface adjacente (voir paragraphe 4.1.6).

Une attention particulière devra être apportée aux points suivants :

- l'apport de matériaux en surépaisseur peut modifier la section des éléments de la structure. Il est donc nécessaire de prendre en compte les charges qui en résultent ;
- l'enlèvement du béton dégradé ou pollué risque d'affaiblir ou de déséquilibrer la structure. L'entreprise doit mettre en œuvre un phasage précis. Le recours à un étalement peut s'avérer nécessaire ;
- des remplacements d'armatures seront à envisager, selon des critères de décision (diamètre résiduel, longueur), décrits plus loin. L'objectif sera de rétablir la section d'origine.

Des étapes essentielles sont à respecter, dont la préparation de la surface du support.

Nota : dans le cas d'un traitement général par inhibiteur, la méthodologie de purge et de préparation du support peut être différente (voir la partie 4.3).

4.1.2. Elimination des zones dégradées

Avant de réparer les zones dégradées (armatures apparentes, éclatements de béton, traces de rouille, etc.), les revêtements en place doivent être retirés, sur toute la surface, par un moyen mécanique ou chimique. Les produits de démolition doivent être mis en décharge ou recyclés, en conformité avec les textes réglementaires en vigueur sur la protection de l'environnement.

Pour traiter les armatures corrodées, il convient de les dégager par burinage, repiquage ou bouchardage, jet d'eau ou sablage. Le dégarnissage doit être effectué jusqu'à ce qu'un acier sain apparaisse et la longueur de cet acier doit être dégagée sur toute sa périphérie, selon la norme NF P 95.101 (un dégagement d'un minimum de 2 cm derrière l'armature, est conseillé). Lorsque les armatures qui ne sont pas parallèles au parement sont corrodées à leurs extrémités, le béton avoisinant doit être enlevé et ces extrémités doivent être amputées de 2 cm, pour rétablir un enrobage suffisant.

La phase d'élimination de la zone sous corrosion, constitue l'une des tâches les plus délicates à réaliser. La bonne tenue dans le temps des réfections de parement, dépend directement de la qualité d'exécution de ces travaux. Il est donc impératif d'éliminer l'intégralité de cette altération, qu'elle soit foisonnante ou de surface, et ceci sur toute la périphérie de l'acier, par décapage et brossage soigné ou par des moyens mécaniques (sablage, hydrosablage, etc.). Cette opération doit être plus particulièrement soignée en milieu marin, car la rouille y est chargée de chlorures acides. Les surfaces de bétons sont ensuite nettoyées, afin de faire disparaître toute poussière ou toute souillure, subsistant après l'élimination des bétons dégradés. Ce nettoyage peut être réalisé par voie humide ou sèche (brossage et soufflage), mais dans le cas du lavage à l'eau, celle-ci doit être éliminée par soufflage ou par aspiration.

4.1.3. Remplacement des armatures fortement corrodées

A cette étape des travaux, un contrôle du diamètre résiduel des armatures les plus fortement attaquées sera effectué (à l'aide d'un pied à coulisse par exemple).

Les armatures supplémentaires de même nature seront mises en place, par scellement ou soudure, afin de restituer la section initiale, avec une tolérance de 5%, en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement, et des armatures de couture. Dans le cas de soudures, celles-ci devront être effectuées, selon les normes en vigueur, après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée.

4.1.4. Protection des armatures



La protection des armatures consiste à appliquer sur toute la surface de celles qui sont dégagées (périphérie complète), un produit assurant une protection vis à vis de la corrosion. Ce traitement n'est réellement nécessaire que si, pour des raisons techniques ou esthétiques, l'enrobage final ne peut pas avoir la valeur prévue dans les règlements (BAEL 91, par exemple), pour un environnement donné. Il est également fonction de la nature du produit de reconstitution du parement. On devra également s'assurer de la compatibilité avec les traitements ultérieurs (électriques notamment).

Cette application doit suivre immédiatement le décapage, car l'oxydation des armatures risque de s'amorcer et de compromettre la bonne tenue de la réparation.

← photo 4.1 : Protection des armatures

4.1.5. Etape de la réfection des bétons

La réfection des bétons consiste à rétablir l'enrobage des armatures par la mise en œuvre de mortier. Ce dernier doit respecter les critères :

- de tenue verticale sans coffrage,
- de montée en résistance rapide et de résistance mécanique supérieure au béton support,
- d'adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support,
- d'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs,
- de coefficient de dilatation thermique et de module d'élasticité dynamique équivalent au béton support,
- de bonne protection des aciers.



photo 4.2 : Reconstitution de l'enrobage

Les produits de protection seront, de préférence, choisis dans la famille des produits à base de liants hydrauliques avec ajouts ou modifiés (Guide Technique : *“Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton”* LCPC SETRA). Ils doivent être conformes à la norme NF P 18-840 ou être admis à la marque *“NF Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydrauliques”*.

Cette marque définit notamment, pour les produits de réparation de surface, les caractères normalisés garantis (classe d'adhérence, tenue aux chocs, etc.).

Lorsque pour des raisons esthétiques, des produits pré formulés ne peuvent pas être appliqués, il conviendra d'étudier un mortier spécifique, de même texture, couleur et aspect de surface que le béton en place. Les mortiers doivent être peu sensibles au retrait, résister au gel et être durables. Une autre approche consiste à appliquer une première couche de produit certifié NF ou équivalent, afin d'assurer l'accrochage sur le béton support, et une couche de finition pour l'aspect.

Enfin, il faut noter qu'il est difficile de masquer totalement des zones réparées localement. Parfois, ces zones réapparaissent sous forme de fantômes, du fait des différences de comportements entre le béton support et le produit de réparation. Une solution peut consister à appliquer un produit de protection sur toute la surface.

4.1.6. Précautions particulières à prendre

D'une façon générale, une structure réparée se trouve de nouveau exposée aux conditions d'environnement, qui ont déjà créé la corrosion. Il faut donc s'assurer que les surfaces traitées ne vont pas engendrer de nouveaux désordres, notamment sur les zones adjacentes.

Il est malheureusement souvent constaté que des réparations locales sont responsables de nouvelles pathologies :

- la zone réparée éclate, et les armatures se corrodent de nouveau ;
- les zones adjacentes se fissurent, et ce sont les armatures non réparées qui se corrodent.

Ainsi à proximité d'une réparation locale, la corrosion se caractérise par l'apparition possible de zones anodiques (dissolution) à bas potentiel et de zones cathodiques (acier protégé). Le couplage entre ces surfaces se traduit par le passage d'un courant de corrosion sortant de la surface anodique. La préparation de surface et la reconstitution du parement ont pour effet de modifier les conditions électrochimiques des armatures.

D'une façon générale, les zones réparées sont protégées d'une future corrosion. Toutefois :

- leur potentiel croît (l'armature se trouve progressivement de nouveau dans un état de passivité),
- de nouvelles anodes se créent autour de cette zone.

Des courants de corrosion vont se créer. La densité de courant, qui correspond à la vitesse de corrosion, sera d'autant plus importante que :

- la différence de potentiel est importante,
- les surfaces anodiques sont plus petites,
- la résistance électrique est plus faible (dépendant fortement de l'humidité et de la présence de sels),
- les polarisations à la fois des zones anodiques et cathodiques sont plus faibles. Ces polarisations dépendent essentiellement des conditions électrochimiques régnant à l'interface acier/béton. Dans la zone anodique, plus le milieu sera pollué par les chlorures ou rendu voisin de la neutralité par la carbonatation, plus faible sera cette polarisation et plus grand sera le courant de corrosion.

L'étendue des surfaces touchées par ces courants de corrosion dépend principalement de l'état d'humidité du béton pollué. En général la surface de cette zone ne dépasse pas quelques centimètres carrés. Au delà, c'est la corrosion "naturelle" qui est le mécanisme principal de la dégradation.

En fait, plusieurs cas sont à considérer :

a- la réparation est effectuée correctement : les zones adjacentes sont passivées (absence totale de carbonatation, de chlorures). Les risques d'amorçage et d'évolution de corrosion localisée sont faibles. La corrosion était due à un défaut local (enrobage, ou béton défaillants).

b- la réparation est effectuée correctement : les surfaces adjacentes sont protégées (zone sans carbonatation ou à faible teneur en chlorures), mais ces deux agents agressifs atteindront les armatures dans un délai de quelques années.

c- la réparation est effectuée correctement : les armatures sont exemptes de produit de corrosion, et elles sont protégées par l'alcalinité du produit de réparation (s'il est à base de ciment), ou par la résine (par l'effet isolant de celle-ci), *mais les surfaces adjacentes sont en état de corrosion* (c'est à dire que le béton y est carbonaté ou pollué par les chlorures).

d- la réparation n'est pas effectuée correctement, c'est à dire que l'armature n'a pas été dégagée puis enrobée de produit de réparation.

Dans les cas b, c, et d, les risques de corrosion sont importants, dans un délai difficile à déterminer mais pouvant être inférieur à dix ans, après la réparation (voir la partie 4.3 : inhibiteurs).

e- la réparation est effectuée à l'aide d'un mortier de résine, par principe non conducteur. Les mécanismes anode cathode ne peuvent s'appliquer. Toutefois, il apparaît à l'interface mortier de résine/armature/ancien béton un interstice, en cas de manque de continuité, dans lequel, la corrosion s'amorce par aération différentielle, puis des modifications chimiques se créent, en l'absence d'alcalinité (béton carbonaté), ou en présence de chlorures. Dans l'interstice, le milieu devient rapidement acide du fait de l'hydrolyse des produits de corrosion, et l'attaque progresse rapidement.

Ainsi, il ne faut pas négliger plusieurs points essentiels dans les phases de la réparation :

- le diagnostic (cf. chapitre 2) ;
- la préparation de surface de l'armature qui, si des traces de produits de corrosion subsistent, risque de participer à l'amorçage de corrosions ;
- la liaison produit de réparation-béton ancien, qui risque d'engendrer des interstices responsables d'amorçage de corrosions localisées.

4.1.7. Normes

Les principales normes relatives aux produits de réparation sont les suivantes :

Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique			
N° de normes	Titre	Nature du liant	Année
NF P 18-800	Définitions, classification, conditionnement, marquage, conditions de réception	H – R	1989
NF P 18-802	Contrôle sur chantier	H – R	1992
Produits ou systèmes de produits destinés aux réparations de surface du béton durci			
NF P 18-840	Caractères normalisés garantis- Normes d'essais garantis – Normes		1993
NF P 18-852	Essais d'adhérence sur surfaces sciées	H – R	1993
NF P 18-853	Essai d'adhérence après cycles thermiques sur surfaces sciées	H – R	1993
NF P 18-854	Essai de tenue aux chocs répétés sur surfaces sciées	H – R	1993
NF P 18-855	Essai de perméabilité aux liquides avec surfaces sciées	H – R	1992
NF P 18-856	Essai de tenue aux rayonnements U.V.	R	1993
NF P 18-857	Essai de tenue aux chocs sur surfaces sciées après cycles	H – R	1993
NF P 18-858	Essai d'adhérence sur surfaces rugueuses	H	1993
NF P 18-859	Essai d'adhérence après cycles thermiques sur surfaces rugueuses	H	1993
NF P 18-860	Essai de tenue aux chocs répétés sur surfaces rugueuses	H	1993
NF P 18-861	Essai après cycles de gel-dégel, de tenue aux chocs répétés sur éprouvettes à surface rugueuse	H	1993
NF P 18-862	Essai de perméabilité aux liquides sur éprouvette à surface rugueuse	H	1993

H : produits hydrauliques

R : résines de synthèse

Ouvrages d'art, Normes sur les techniques de réparations		Année
NF P 95-101	Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Reprise du béton dégradé – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés	1990

4.1.8. Essais, contrôle et réception

4.1.8.1. Essai de convenueance

Une épreuve de convenueance est nécessaire, il faut définir ses modalités : la surface, la longueur, ou le type d'élément nécessaires.

4.1.8.2. Mortiers de réparation

Si les mortiers bénéficient du droit d'usage de la marque NF, aucun essai préalable n'est à effectuer. Dans le cas contraire, il y a lieu d'effectuer un ou plusieurs des essais prévus dans la norme (essais de convenueance), qui devront donc être planifiés avant le démarrage du chantier.

4.1.8.3. Contrôles et réception des produits.

Ces contrôles ont pour but de vérifier que les produits livrés sont conformes aux indications du Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) ou conformes aux normes, si elles existent, aux certificats de qualification et aux avis d'aptitude à l'emploi.

4.1.8.4. Contrôles de l'application

Ces contrôles ont pour but de vérifier qu'à tout instant du chantier, l'exécution est conforme au CCTP. Les étapes les plus importantes sont les suivantes :

a- réception du support après préparation de surface

A ce stade, il faut s'assurer que les caractéristiques du support préparé (4.1.2 et 4.1.3) sont conformes aux hypothèses prises en compte pour la réparation ou le renforcement.

La réception repose d'une part sur l'examen visuel de la surface traitée, sur un contrôle sonique (sondage au marteau), et enfin sur un contrôle du diamètre résiduel de l'acier.

Ce contrôle a pour objectif de vérifier :

- la bonne préparation de toutes les surfaces prévues ;
- l'absence d'amorces de décollement ou de fissuration ;
- la compatibilité de la texture de surface avec l'application du produit de réparation ;
- l'absence de traces de rouille sur les armatures ;
- l'absence de pollution du support par des agents agressifs vis à vis des armatures (chlorures) ;
- la nécessité ou non d'un renforcement.

Un essai de cohésion superficielle, par traction directe, est également souhaitable. Il peut s'avérer nécessaire, dans le cas d'une forte pollution du support par les sulfates et les chlorures (risque de réaction avec le ciment du produit de réparation).

b- réception et contrôle des armatures de remplacement

c- contrôle de réception après application du mortier de réparation

Ce contrôle se fait par examen visuel et essai de cohésion superficielle par traction directe. Les paramètres importants de cet essai sont : le mode de rupture (dans le produit de réparation, adhésif à l'interphase, ou dans le support), la valeur de résistance à la traction. Les conditions de l'essai et son interprétation sont contractuelles.

d- réception des supports avant mise en oeuvre des revêtements

Il s'agit d'un examen visuel.

4.1.8.5. Réception finale des travaux

Les essais de réception des travaux sont prévus dans les cahiers des charges, qui tiennent compte des normes ou de recommandations.

Leur objectif est de valider en fin d'exécution, le respect des cahiers des charges par l'entrepreneur : caractères géométriques, mécaniques, etc.

4.1.9. Références bibliographiques

- “ Exécution des ouvrages en béton armé ou en béton précontraint par post-tension ”, Fascicule N°65 A, 1992
- “ Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton ” Guide Technique LCPC SETRA, Août 1996.

4.2. IMPREGNATIONS

4.2.1. Principes et définitions

D'une façon générale, les produits appliqués par imprégnation sont des consolidants ou des hydrofuges. Ils se distinguent par leur fonction principale :

- un produit consolidant confère à une zone peu profonde altérée, une cohésion identique à celle du même matériau d'origine. Il ne s'agit donc pas d'une consolidation structurale à l'échelle d'un ouvrage.
- un hydrofuge constitue une barrière interne au matériau, vis-à-vis de la pénétration de l'eau liquide, sans trop affecter la perméabilité à la vapeur d'eau. Un hydrofuge est dit de surface, lorsqu'il est appliqué sur le béton durci.

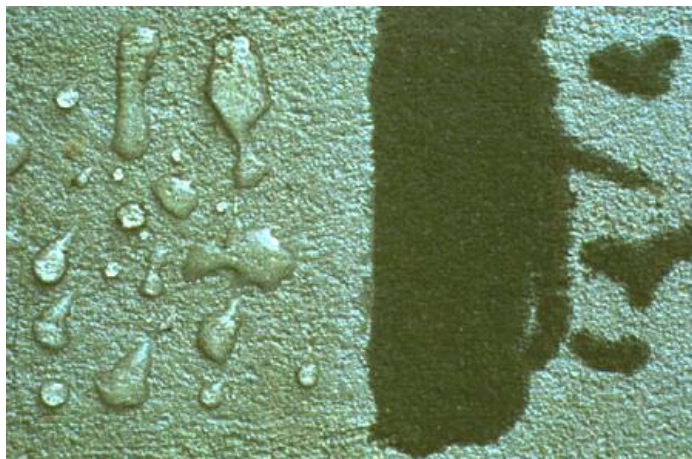


photo 4.3 : Action d'un produit hydrofuge

Par sa fonction principale, un produit hydrofuge n'est ni un imperméabilisant, ni un antigraffiti. Certains produits ont des fonctions secondaires (antisalissure, etc.). Les consolidants et les hydrofuges n'ont pas d'action directe sur la protection contre la corrosion des armatures. Mais ils peuvent être utilisés comme traitement complémentaire.

Par la suite, seuls les hydrofuges de surface seront traités dans ce document. Il est à noter que certains points ne sont donnés qu'à titre indicatif.

La mise en œuvre de ces produits est spécifiée dans des documents tels que le Guide pour la protection du béton armé par application de produit à la surface du parement (LCPC).

4.2.2. Domaine et limites d'emploi

Une hydrofugation se justifie, si le béton subit une altération liée à un contact avec de l'eau liquide provenant de l'atmosphère (et non pas du sol ou d'une fuite d'eau). Ce traitement est appliqué à titre préventif ou curatif.

L'altération du béton n'affecte généralement que les zones soumises aux pluies battantes, au ruissellement ou au rejaillissement. Il est donc inutile d'hydrofuger des zones qui sont, par exemple, à l'intérieur d'un bâtiment.

Les dégradations liées aux sels solubles s'intensifient après hydrofugation. Pour assurer une bonne durabilité au traitement, il est important de limiter les risques de pénétration d'eau et de sels par l'arrière de la surface traitée.

Les surfaces sur lesquelles l'eau stagne, ne peuvent pas non plus être traitées efficacement.

Enfin, les traitements hydrofuges s'insèrent dans une procédure globale de réparation. La compatibilité entre les diverses techniques de réparation doit être assurée et surtout les objectifs à long termes doivent être clairement définis (les possibilités de "retraitement", notamment pour les imprégnations d'inhibiteurs de corrosion ou d'application postérieure de tout autre produit destiné à migrer en phase liquide, etc.).

4.2.3. Etat de l'art, normalisation

4.2.3.1. Normalisation

Selon la norme P 84-403, un hydrofuge de classe D1 permet de maintenir l'aspect d'origine du parement de la façade ou de lui donner un aspect peu différent. Cette norme ne définit aucun critère ni spécification.

Selon le projet de norme européenne pr EN 1504-2, une imprégnation hydrophobe du béton est "destinée à produire une surface hydrofuge, caractérisée par le fait que les pores ne sont pas remplis mais seulement couverts. Aucun film ne se forme à la surface et l'aspect n'est pratiquement pas modifié". Cette norme définira des méthodes d'essai avec des spécifications auxquelles devront répondre les hydrofuges.

4.2.3.2. Produits hydrofuges

Les produits hydrofuges peuvent être classés en fonction de la nature chimique de leur constituant de base. Les produits les plus répandus sont les silicones et leurs dérivés (siliconates, silanes, siloxanes). Mais il existe aussi des hydrofuges acryliques, des résines fluorées et d'autres.

La classification des hydrofuges tient compte de la taille des molécules. Pour une application donnée, il convient de choisir le produit qui est adapté à la porosité du béton à traiter.

Il est à noter que de nombreux produits hydrofuges sont en "phase solvant", ce qui signifie qu'avec l'évolution de la législation européenne, certains de ces produits vont disparaître au profit de ceux en "phase aqueuse".

4.2.4. Procédure de choix et d'application

Le choix de produit, comme le choix de la procédure d'application ne pourront être réalisés qu'après un diagnostic et des essais préliminaires.

4.2.4.1. Diagnostic

Avant de traiter le béton par un hydrofuge, il est indispensable de définir si cette opération est utile et compatible aussi bien avec le matériau à traiter qu'avec son environnement. La première étape du traitement consiste à préciser dans le diagnostic :

- la nature et l'étendue des altérations qui affectent le matériau,
- l'absence de fissure ou de délamination du béton,
- l'origine des dégradations,
- les caractéristiques principales du béton à traiter (notamment sa porosité),
- et enfin si aucune contre-indication s'oppose au traitement.

4.2.4.2. Choix du produit et essais préliminaires

Le choix d'une famille d'hydrofuges est réalisé :

- seulement après une caractérisation préalable du support,
- mais aussi après avoir clairement défini les conditions de la mise en œuvre sur chantier (saison, traitements préliminaires envisagés, mise en peinture postérieure...).

L'efficacité et la durabilité du traitement hydrofuge sont optimisées, en sélectionnant un produit particulièrement adapté au support et à ses propriétés physiques (tailles de pores, couleur, etc.). L'optimisation est faite à partir d'essais de convenance. Elle concerne la concentration du produit et sa consommation, en tenant compte de la procédure d'application.

4.2.4.3. Procédure d'application

La durabilité du traitement est conditionnée par la profondeur de pénétration.

Les principales techniques d'application sont le pinceau, le rouleau et le pulvérisateur pour les silicones et le pulvérisateur ou le pistolet "airless".

En général, le produit doit avoir une bonne répartition dans le support, c'est pourquoi l'utilisation du pulvérisateur (ou de "l'airless") est souvent privilégiée.

Les conditions climatiques sont particulièrement importantes pour le processus de polymérisation. C'est pourquoi, il convient de respecter les notices techniques, afin d'éviter une polymérisation trop rapide par temps trop chaud ou trop lente par temps trop froid et humide (généralement, les températures limites conseillées se situent entre 5 et 30°C).

Enfin, le support doit être réparé et propre. Mais en plus, les indications de la fiche technique du produit, concernant l'humidité du support, doivent être respectées.

4.2.5. Contrôle du traitement

Le contrôle du traitement a pour objectif de vérifier :

- que les produits et les conditions de mise en œuvre, définis dans la procédure d'application, ont été respectés,
- et que le traitement a été efficace.

Par ailleurs, certains essais sont proposés pour caractériser un traitement d'hydrofugation, et se font soit sur site soit sur des prélèvements de béton (tableau ci-après).

Mais il est aussi important de vérifier que ce traitement ne modifie pas trop d'autres propriétés du béton, telles que :

- des propriétés structurelles (porosité, etc.),
- des propriétés de transfert (perméabilité à la vapeur d'eau, etc.),
- ou des propriétés esthétiques (couleur, brillance).

Exemples d'essais de convenance pour caractériser un traitement par imprégnation d'hydrofuge

<i>Essai sur site</i>	Profondeur de pénétration	Effet hydrofuge
Effet perlant	oui	oui
Essai de perméabilité	non	oui

<i>Essais sur prélèvements</i>	Profondeur de pénétration	Effet hydrofuge
Frange d'imbibition	oui	non
Mouillage ou microgoutte	oui	oui
Attaque acide	oui	non
Angle de contact	oui	oui
Test d'imbibition capillaire	non	oui

4.2.6. Essais de réception

Les essais de réception des travaux sont prévus dans les cahiers des charges.

Le seul essai non destructif, qui peut être effectué pour la réception d'une imprégnation, est la mesure de la perméabilité du béton traité. Il s'agit soit de la perméabilité à l'eau, soit de la perméabilité à l'air.

4.2.7. Durée et efficacité du traitement

L'efficacité d'un traitement par imprégnation est, en général, de deux ans. Elle porte à la fois sur la tenue à la pénétration d'agents agressifs dans le béton et sur l'aspect du parement.

4.2.8. Références bibliographiques

- Guide technique LCPC : "Protection des bétons par application de produit à la surface du parement" – Décembre 2002.

4.3. INHIBITEURS DE CORROSION

4.3.1. Principes et définitions

Par définition, un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui, ajouté en faible concentration au milieu corrosif, ralentit ou arrête le processus de corrosion d'un métal placé dans ce milieu.

Ses fonctions essentielles sont les suivantes :

- de pénétrer une couche de béton très hétérogène par nature (variations de compacité notamment) ,
- d'abaisser la vitesse de corrosion du métal, sans en affecter ses propriétés (ni celles du milieu environnant),
- d'être stable dans le milieu considéré et compatible avec celui-ci, à la température d'utilisation,
- d'être efficace à la concentration recommandée,
- de ne pas être toxique.

Par ailleurs, la teneur en inhibiteur doit être réglée, en tenant compte de divers paramètres tels que les facteurs géométriques ou la forme des matériaux, leur état de surface, etc.

La corrosion étant un processus électrochimique, l'action de l'inhibiteur se fait au niveau de l'une des réactions élémentaires du mécanisme de cette corrosion, et plus particulièrement au voisinage immédiat de la surface : transport des espèces réactives, formation d'intermédiaire, adsorption, etc.

Le mécanisme d'action d'un inhibiteur peut être divers. L'inhibiteur recouvre (adsorption) la surface du métal, et réduit les surfaces de réactions élémentaires. Il peut former également des composés avec le métal et le liquide environnant et modifier les réactions d'interface. Dans les deux cas, la vitesse de corrosion peut être ralentie, voire annulée.



photo 4.4 : Application d'inhibiteur



photo 4.5 : Application d'inhibiteur

Les inhibiteurs de corrosion sont classés selon leur mode d'action :

- a- *Les inhibiteurs anodiques* ont une action sur la diminution du courant sur la partie anodique de la surface du métal. Si ce blocage n'est que partiel, il peut entraîner localement une augmentation de la densité de courant sur ces surfaces. Il peut conduire à un processus de corrosion localisé, plus intense qu'en l'absence d'inhibiteur, d'où l'importance de la teneur en élément actif au droit de l'acier.
- b- *Les inhibiteurs cathodiques* induisent une augmentation de la surtension cathodique, et réduisent donc le courant de corrosion. Si ces inhibiteurs ne stoppent jamais complètement la réaction de corrosion, ils ne présentent pas par contre le danger de corrosion localisée. Ces inhibiteurs précipitent souvent des sels ou hydroxydes, du fait de l'accumulation d'ions OH^- sur les cathodes.
- c- *Les inhibiteurs mixtes* ont à la fois les propriétés des inhibiteurs anodiques et cathodiques.

4.3.2. Etat de l'art

Plusieurs inhibiteurs à bases chimiques, organiques et inorganiques, ont été employés depuis une dizaine d'années, dans la réhabilitation de divers ouvrages en béton armé.

Le système de maîtrise de l'efficacité du traitement est propre à chacun des composants chimiques de base.

Lors de l'utilisation pour le béton armé d'un inhibiteur appliqué sur le parement, il est demandé au produit :

- d'avoir une action rapide et vérifiable ;
- d'être performant pendant de nombreuses années ;
- d'être efficace en milieu basique, neutre (carbonatation), voire acide (en présence de chlorures, la surface métallique en voie de corrosion dans les cellules occluses, est au contact d'acide chlorhydrique).

4.3.3. Domaine et limites d'emploi

La délimitation précise du champ d'application dépend de l'inhibiteur considéré.

Les paramètres d'efficacité à prendre en compte lors d'une étude sont les suivants :

- a- *l'influence de l'état de surface de l'acier* (absence de discontinuité acier/béton) : l'utilisation des inhibiteurs de corrosion permet de protéger l'ensemble des aciers en situation de risque de corrosion, sans avoir à purger le béton contaminé ou carbonaté, à condition qu'aucun phénomène d'épaufrure ou décollement acier / béton n'ait débuté.
- b- *la pénétration du produit* : la pénétration des inhibiteurs à l'intérieur d'un béton dépend de nombreux paramètres : porosité du béton, humidité, degré de carbonatation, type de ciment utilisé, teneur en chlorures, traitements préalables, etc.. Ainsi, cette pénétration ne peut pas, à ce stade des connaissances, faire l'objet d'une modélisation précise. Par conséquent, il est toujours nécessaire de vérifier la pénétration de l'inhibiteur par des tests de validation *in situ*.
- c- *la concentration minimale efficace* au droit des armatures. Celle-ci doit être précisée par le fabricant, sur la base de résultats d'essais représentatifs, en tenant compte notamment de la teneur en chlorures dans le béton au droit des armatures (limite d'efficacité).

Le recours aux inhibiteurs permet de conserver au maximum l'aspect initial de l'ouvrage et de réduire les zones à dégarnir.

4.3.4. Procédure d'application

Avant d'appliquer un inhibiteur, la surface du béton doit être préparée. Il s'agit d'éliminer la peinture ou autre revêtement par sablage ou hydrosablage. Il est à noter qu'un traitement par inhibiteur n'est pas possible si la surface a été préalablement traitée avec un hydrofuge.

Un inhibiteur qui est sous forme liquide, s'applique directement à la surface du béton. Afin de respecter les consommations prescrites par l'applicateur, ou par les procédures définies pendant la phase de validation, l'application s'effectue en plusieurs passes.

Les solutions gélifiées s'appliquent en une fois.

Plusieurs méthodes d'application peuvent être testées, afin de valider la mise en œuvre la plus adaptée.

4.3.5. Contrôle de la mise oeuvre

4.3.5.1. Mise en œuvre

Le système qualité de l'applicateur doit permettre, tout au long de la mise en œuvre du traitement, de contrôler le respect :

- des consommations,
- de la procédure d'application retenue lors des tests de validation.

Dans l'état actuel des connaissances, il apparaît indispensable de procéder à l'évaluation de la quantité de produit dans le béton et à la détermination de sa concentration au droit de l'armature, à des échéances définies contractuellement, sur la base des essais de convenue (validation de la procédure). Cette concentration doit être conforme aux spécifications du fabricant, concernant la concentration minimale efficace (voir 4.3.3 c).

4.3.5.2. Essais de réception

L'application est considérée comme acceptable lorsque la quantité minimale d'inhibiteur au niveau des armatures à traiter est atteinte, et démontrée par l'analyse d'échantillons représentatifs de l'ouvrage.

En outre, les documents de suivi qualité de la mise en œuvre du traitement doivent être remis au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

4.3.6. Durée et efficacité. Normalisation

Le retour d'expérience sur des ouvrages traités par inhibiteur d'imprégnation est actuellement d'une dizaine d'années. La durabilité du traitement peut être vérifiée :

- par des mesures de teneur en inhibiteur au niveau de l'acier après quelques années
- par le suivi dans le temps des mesures de potentiels (cartographie) ou de courants de corrosion (résistance de polarisation).

Aucune norme ne définit les classes d'inhibiteur permettant de juger de leur efficacité intrinsèque. Il n'existe pas non plus pour l'instant de procédure de qualification des produits.

4.4. REVÊTEMENTS DE SURFACE

4.4.1. Revêtements pour le génie civil

La mise en peinture des ouvrages de génie civil en béton a, en général, pour principaux objectifs :

- d'améliorer l'esthétique de l'ouvrage, par la mise en couleur ou la création de motifs décoratifs, en vue de lui donner un aspect particulier, ou d'homogénéiser, lorsque nécessaire, la teinte de ses parements,
- d'augmenter le confort et la sécurité des usagers, tout en facilitant le nettoyage (exemple : revêtement des tunnels),
- de participer à la sécurité de l'ouvrage (exemple : balisage des pylônes),
- de contribuer à la protection du béton : la mise en place d'un système de peinture en couche mince, dans la mesure où il apporte une amélioration de l'imperméabilité du support peut permettre de ralentir la pénétration de l'humidité extérieure et d'améliorer ainsi la durabilité du béton.

Ainsi les ouvrages concernés sont essentiellement les tunnels, les murs de soutènement, les écrans antibruit et dans certains cas les ponts.



photo 4.6 : Application de la finition

Il existe une procédure de qualification concernant les systèmes de peinture pour béton de génie civil. Elle porte sur des critères d'adhérence, d'aspect et plus généralement sur des considérations d'ordre esthétique, et non pas sur des critères visant à apprécier la capacité effective des systèmes testés à remplir une fonction de protection. L'ensemble de cette procédure est décrit dans le guide " Mise en peinture des bétons de génie civil " (LCPC, Juin 1999) qui apporte aussi toutes les informations utiles sur la mise en œuvre des systèmes de peinture et le contrôle de la qualité de leur application.

Lorsque c'est principalement une fonction de protection qui est recherchée (protection contre la pénétration des chlorures, protection contre la pénétration du gaz carbonique laquelle entraîne une carbonatation progressive de la peau du béton, etc.) d'autres types de revêtements peuvent être envisagés. Ils seront désignés ci-après par revêtements minces. Il convient de préciser toutefois qu'il n'existe actuellement aucun référentiel technique permettant de qualifier ces produits et d'orienter le choix d'un produit en fonction du problème. La mise au point d'un tel référentiel est en cours, ainsi que la rédaction d'un guide sur la protection des bétons armés par application de produits à la surface du béton.

4.4.1.1. Principes. Définitions. Etat de l'art

4.4.1.1.1. Les peintures

La " mise en peinture " désigne la protection par système de peintures ou lasure dans des épaisseurs sèches comprises entre 20 et 600 μm .

Les systèmes de peinture s'appliquent dans des quantités humides totales allant de 300 à 1500 g/m^2 , selon la densité et l'extrait sec, les lasures dans des quantités restant inférieures à 300 g/m^2 , mais pouvant varier selon l'absorption du support.

Un système de peinture est constitué d'une succession de couches, qui ont chacune un rôle spécifique, en vue d'obtenir un revêtement final présentant les caractéristiques escomptées.

Une peinture est constituée :

- d'un liant (aussi appelé résine ou polymère) : la nature chimique du liant permet de désigner la peinture ; il s'agit, par exemple, de peinture époxydique, polyuréthane, vinylique, acrylique ou hydraulique modifiée par des résines,
- de matières de charge : elles confèrent à la peinture des caractéristiques physiques particulières (rhéologie, aspect, ...),
- de pigments : ils apportent la couleur, l'opacité, ...
- d'additifs : il peut s'agir d'agents mouillants, thixotropes, fongicides, ...
- d'un véhicule : eau (peinture dite en phase aqueuse), ou solvant (peinture en phase solvant). Il existe aussi des peintures avec très peu, voire sans véhicule.

Le plus souvent un système type de peinture comporte 3 couches :

- la couche primaire qui assure l'adhérence du système sur le support,
- la couche intermédiaire qui assure la compatibilité entre la couche primaire et la couche de finition et donne au système une épaisseur suffisante,
- la couche de finition qui apporte la fonction esthétique et assure la résistance du système aux agressions extérieures.

La performance d'un système de peinture dépend de l'épaisseur de chaque couche et du respect de ces épaisseurs.

Il est à signaler que l'évolution de la réglementation en matière de protection de l'environnement favorise actuellement le développement des peintures en phase aqueuse.

Les peintures peuvent être mono ou bi-composants ; dans ce dernier cas, la peinture est obtenue à partir d'un mélange base - durcisseur ou ciment et latex.

4.4.1.1.2. *Les lasures*

Les lasures sont utilisées pour conserver ou mettre en valeur la texture superficielle d'un parement en béton. Elles sont incolores ou colorées et contrairement à une peinture, elles ne sont pas opacifiantes.

Une lasure est composée :

- de liant (généralement de type acrylique ou polyuréthane),
- d'un véhicule (eau, solvant),
- de pigments ou colorants,
- éventuellement de matières de charge.

Une lasure est généralement appliquée en deux couches, la première étant diluée.

4.4.1.1.3. *Les revêtements minces*

Les revêtements minces peuvent être :

- des revêtements plastiques épais contenant généralement des charges grossières et à base de résines acryliques ou polyuréthanes,
- des revêtements d'imperméabilité à base de résine acrylique,
- des revêtements divers à base de polyuréthane ou LMH.

Selon leur nature, ces produits sont appliqués à l'aide de spatules ou de machines spéciales.

4.4.1.2. *Procédure d'application - acteurs de la mise en œuvre et matériel*

4.4.1.2.1. *Procédure*

Différentes conditions doivent être nécessairement réunies pour obtenir un bon accrochage des produits et une durabilité suffisante des revêtements :

- qualité de préparation des supports,
- choix de la nature du revêtement et de ses composants,
- application réalisée dans de bonnes conditions,
- épaisseur sèche globale déposée et régularité,
- âge du support béton (2 mois minimum).

Le fascicule 65A du Cahier des Clauses Techniques Générales (CCTG) prévoit que les systèmes utilisés doivent être des systèmes qualifiés. L'entreprise doit définir les produits utilisés, dans son plan d'assurance qualité (PAQ).

4.4.1.2.2. *Matériels*

Les matériels utilisés pour la préparation du support doivent être identiques à ceux utilisés lors de l'épreuve de convenance. Selon l'état et le type du support, et en fonction du but final recherché, les modes de préparation du support sont multiples :

- brossage, dépoussiérage,
- ponçage,
- lessivage,
- projection d'abrasifs : la récupération et le traitement de l'abrasif avant mise en décharge doivent être prévus,
- projection d'eau sous pression : le respect de la valeur de pression retenue pour les essais de convenance est fondamental.

Les matériels utilisés pour l'application des produits sont conformes à ceux de l'épreuve de convenance et aux éléments indiqués dans les fiches techniques produits. Ces fiches techniques précisent le cas échéant pour chaque moyen d'application possible, un taux de dilution et une quantité de produit déposable

Pour les applications au pistolet, une attention particulière est portée aux buses de projection.

4.4.1.3. *Processus d'exécution et contrôles*

4.4.1.3.1. *Essai préalable*

Dans le cas particulier d'un béton avec des défauts de surface apparents et pour lequel l'application d'un système de peinture risque de ne pas être suffisant pour masquer l'ensemble des défauts, un essai préalable doit être réalisé avant la rédaction de l'appel d'offres. Cet essai préalable permet de vérifier, avant le lancement du dossier de consultation, que le choix technique envisagé répond bien aux résultats attendus.

4.4.1.3.2. *Mise en œuvre*

La mise en œuvre d'un revêtement s'effectue selon un processus d'exécution auquel sont attachées différentes étapes de contrôle. Il s'agit des étapes suivantes :

a) les opérations préalables au chantier

Avant le démarrage des travaux doit être organisée une réunion regroupant l'ensemble des acteurs concernés, à savoir : le maître d'œuvre, le chef de chantier, le contrôle externe de l'entreprise et l'agent de l'organisme chargé des contrôles extérieurs.

Cette réunion a pour principaux objectifs :

- d'examiner en commun la consistance des travaux, leur mode d'exécution et les contrôles prévus,
- d'examiner les solutions aux difficultés particulières (zones à ragréer, zones difficiles d'accès, etc.),
- d'organiser l'épreuve de convenance,
- de définir le programme des travaux liés en particulier au déplacement de l'échafaudage et aux conditions d'application et de séchage des couches ainsi que le programme des contrôles.

b) l'épreuve de convenance

L'épreuve de convenance, à ne pas confondre avec l'essai préalable, et rendue obligatoire par le fascicule 65A du CCTG permet de vérifier, après passation du marché, que dans les

conditions du chantier, sur une surface représentative de l'ouvrage les modalités retenues répondent bien aux objectifs. Réalisée avec les moyens, le personnel et les produits du chantier, elle porte à la fois sur la préparation du support et sur l'application. Elle permet de vérifier que les moyens de l'entreprise sont bien adaptés pour réaliser le travail prévu et de juger de l'aspect du revêtement appliqué sur le béton de l'ouvrage.

c) le contrôle de la préparation du support

Il porte sur :

- la liste des produits utilisés (les abrasifs par exemple),
- la conformité du matériel,
- la réception des surfaces,
- l'adéquation du revêtement à la fonction exigée,
- la cohésion superficielle du support (supérieure ou égale à 0,5 MPa),
- la conformité de l'abrasif.

d) le contrôle des produits

Les principaux points à vérifier concernent :

- l'identité des produits utilisés sur le chantier, il s'agit de vérifier par échantillonnage (selon la norme NF EN 21512) la conformité des produits. Ces tests sont basés sur les Caractéristiques d'Identification Rapide du produit (données CIR),
- l'étiquetage des récipients qui doit comporter le nom du produit, le numéro de lot de fabrication, la dénomination base ou durcisseur, le poids, la date limite d'utilisation, l'étiquetage de sécurité, etc.,
- les conditions de stockage (température et hygrométrie convenables),
- le suivi des quantités livrées.

e) les contrôles juste avant l'application

Il y a lieu, avant de procéder à l'application, de vérifier :

- l'humidité du béton,
- la température et l'hygrométrie de l'air (adéquation de tous ces critères par rapport aux produits à appliquer),
- la température du support (elle doit être de 3°C supérieure au point de rosée).

En ce qui concerne les produits, le contrôle avant application porte sur :

- l'identification et l'étiquetage des produits,
- les proportions et mélanges des constituants,
- la nature et la quantité de diluant utilisé,
- l'homogénéisation,
- le respect du temps de malaxage, de mûrissement et de la durée pratique d'utilisation du mélange.

Il faut également vérifier :

- la conformité des techniques et matériels utilisés aux solutions retenues,
- pour les nouvelles couches, le respect des phases de séchage minimal et délais de recouvrements entre couches.

f) les contrôles lors de l'application

Ces contrôles consistent essentiellement à mesurer les consommations de produit pour chaque couche du système. Ces mesures peuvent être réalisées :

- par pesée de la quantité de produit en pot avant et après son application sur une surface connue et délimitée de l'ouvrage,
- par comptage des récipients qui contiennent le produit et qui sont préalablement marqués et utilisés pour une surface définie de l'ouvrage,
- par mesure de l'épaisseur humide.

4.4.1.4. Domaines d'application et limites d'emploi

Dans le cas d'une recherche de l'amélioration sur le plan esthétique, l'aspect du support béton avant revêtement est essentiel pour la qualité du résultat final : un revêtement de 20 à 600 μm ne peut pas masquer toutes les imperfections de surface.

Un revêtement par peinture permet de masquer des différences de couleur, voire de texture, dans la mesure où les défauts restent limités.

Si les défauts sont plus importants (bullage, nids de cailloux ou éclats), il faut préalablement utiliser des produits de réparation de surface qui permettent de faire disparaître ces irrégularités, la peinture étant ensuite destinée à ré-uniformiser la teinte de l'ensemble du parement.

4.4.1.5. Essais de réception

Les contrôles de réception portent sur :

- l'épaisseur du film sec : elle peut être évaluée à partir de l'épaisseur humide mesurée lors des applications et de la valeur de l'extrait sec de la peinture ; elle peut être également mesurée à l'aide d'un microscope (incision à 45 ° dont on mesure la largeur selon la norme NF T 30 123) ou par examen à la loupe micrométrique sur un carottage en surface,
- l'aspect : il s'agit de détecter des défauts tels que coulures importantes, surépaisseurs, faiencage, cloquages,
- l'adhérence : le contrôle de l'adhérence sur chantier est réalisé par un essai d'arrachement conformément à la norme NF T 30 062 ; cet essai est délicat, et doit être répété en un nombre suffisant de points représentatifs,
- la couleur : le contrôle de la couleur s'effectue selon la norme NF T 34 554-2 ; les caractéristiques colorimétriques mesurées à la réception servent à vérifier ultérieurement que leur variation éventuelle dans le temps reste conforme aux exigences du marché.

4.4.1.6. *Durée et efficacité du procédé*

La mise en peinture réalisée selon les règles de l'art, permet d'obtenir, pour la plupart des ouvrages (ponts, tunnels), des durabilités de revêtement de l'ordre de 15 ans.

Cette durabilité est variable selon les épaisseurs sèches du revêtement, la nature des peintures (mono ou bi-composante) et leur aptitude ou non à être lessivées (cas des tunnels).

Il convient de distinguer divers types de garantie :

- celle relative aux fonctions principales attendues en terme de protection du béton,
- celle relative au décollement ou au cloquage du revêtement,
- celle relative à la couleur,
- celle relative à la fissuration, si cette caractéristique est spécifiée. L'attention est attirée sur le fait que dans la pratique, cette dernière exigence complémentaire ne peut généralement être satisfaite que par des systèmes dont l'épaisseur est supérieure à 600 μm .

Le tableau ci-dessous précise les durées de garantie contractuelles à mentionner dans le marché, pour les différentes fonctions visées, selon la gamme d'épaisseur du revêtement :

Epaisseur du film sec	Fonction(s) principale(s)	Décollement, cloquage	Fissuration	Uniformité et constance de la couleur
50 μm à 300 μm	2 ans	2 ans (*)	-	2 ans
300 μm à 3 mm	10 ans	10 ans (**)	10 ans	2 ans

(*) Dans le cas des systèmes de protection par peinture, cette valeur de 2 ans, réduite par rapport aux valeurs qui figurent dans l'additif au fascicule 65 A du CCTG – août 2000 (respectivement 4 ans pour les peintures monocomposants et 5 ans pour les peintures bicomposants) est significative d'une bonne tenue du système, sans décollement, ni cloquage - condition essentielle pour que la fonction principale de protection visée puisse être assurée en plus de l'aspect esthétique.

(**) La garantie de 10 ans pour la fonction principale de protection implique une bonne tenue du système, sans décollement ni cloquage pendant une durée de 10 ans, supérieure aux 6 ans minimum prévus par l'additif au fascicule 65 A du CCTG – août 2000 pour les systèmes de protection à base de peinture monocomposant, et aux 8 ans minimum s'ils sont à base de peinture bicomposant.

4.4.2. **Revêtements pour le bâtiment**

4.4.2.1. *Principes et définitions*

Les fonctions d'un revêtement pour le bâtiment diffèrent sensiblement de celles d'un revêtement pour le génie civil. Il s'agit de :

- la fonction esthétique, sur les surfaces nues ou vieilles (couleur, aspect de brillance, etc.) ;
- la correction des défauts de surface (porosité, fissures) ;
- la fonction technique, par la protection du support vis-à-vis de l'environnement. Les produits de revêtement sur béton doivent en effet empêcher l'eau et ses éléments agressifs de pénétrer dans le béton et assurer des fonctions d'étanchéité à l'eau, à la vapeur d'eau ou au gaz carbonique.

Il n'existe pas de procédure de qualification, mais des Documents Techniques Unifiés (DTU), maintenant normalisés, qui définissent le contenu des travaux à effectuer, au travers des Cahiers des Clauses Techniques.

Les produits doivent être conformes aux normes qui les concernent.

4.4.2.2. Classification des revêtements

La finition est destinée à augmenter la protection des réparations et des surfaces non réparées. Elle peut être constituée de plusieurs produits, classés selon leurs performances attendues, pour le Bâtiment :

- *Revêtements à vocation essentiellement décorative* : entrent dans cette catégorie, trois classes de revêtements D1, D2, D3 ;
- *Revêtements d'imperméabilité, appliqués à titre curatif* pour pallier les désordres susceptibles d'affecter le clos (fissures infiltrantes), classés en fonction de leur aptitude à résister au support : I1, I2, I3, I4.

4.4.2.2.1. Revêtements à vocation décorative

- Revêtements de classe D1 : ce sont pour la plupart des produits incolores, qui maintiennent l'aspect d'origine du parement, mais améliorent le comportement à l'eau et aux salissures du support. Ce sont les hydrofuges et les lasures.
- Revêtements de classe D2 : ce sont les peintures. Elles sont toutes constituées de liant (composant filmogène), de pigments (fonction à la fois protectrice, couvrante), de charges (pouvoir opacifiant), et d'un solvant. Plusieurs classes de peinture existent, selon leur nature chimique ou celle de leur solvant :
 - *phase solvant* : ce dernier est en général constitué d'hydrocarbures, de dérivés chlorés, d'alcools, d'esters, de cétones, d'aldéhydes ;
 - *phase aqueuse* : le solvant est l'eau, ce qui est favorable vis à vis de l'environnement, mais ces peintures sèchent difficilement par temps froid. Les peintures siloxanes qui ont un caractère hydrofuge et une forte perméance à la vapeur sont des peintures en phase aqueuse.
 - *peintures minérales* : elles sont à base de silicates ou de chaux éteinte, et de colorants. Intéressantes par l'aspect décoratif final obtenu, et leur forte perméance à la vapeur d'eau, elles sont plus vulnérables à l'eau de pluie.

Les peintures microporeuses pour façades doivent être conformes à la norme NF T 30-804. Leur application doit être conforme au DTU 59.1 (norme NF P 74-102-1).

La norme NF T 36-005 donne la classification des vernis, peintures et préparations assimilées.

- Revêtements de classe D3 : les revêtements plastiques épais (RPE) en font partie. Ils ont une fonction de correction de l'état de surface, soit en améliorant la planéité, soit en créant un aspect structuré, et une fonction de complément d'imperméabilisation. Ils sont constitués d'une résine de copolymère vinylique ou acrylique en dispersion aqueuse, de charges de pigments et d'adjuvants. Ils sont appliqués en forte épaisseur (2 à 3 kg/m²). Toutefois, ils n'ont pas d'élasticité suffisante pour résister à une fissuration du support. Les spécifications sont données dans la norme NF T 30-700, et leur application doit être conforme au DTU 59.2.

Les revêtements semi-épais (700 g/m²), destinés à masquer le faïençage, sont décrits dans la norme NF T 34-720.

4.4.2.2. *Revêtement d'imperméabilité*

Ce sont des systèmes multi couches (sauf la classe I1), appliqués à titre curatif, pour pallier des désordres affectant le clos. Ils possèdent une réelle fonction technique d'imperméabilité à l'eau liquide. Ils sont constitués d'une couche d'impression, et d'une ou plusieurs couches de produit de peinture (copolymères en dispersion aqueuse), présentant une élasticité suffisante pour résister à la fissuration du support existante (I1 et I2) ou à venir (I3 et I4). Le système I4 comprend en plus une armature incorporée dans la couche de finition.

Le DTU 42.1 (norme NF P 84-404-1) définit l'exécution des travaux de ces revêtements, les produits étant choisis en fonction des défauts de surface constatés, selon la norme NF P 84-401-3. Les produits doivent satisfaire à la norme NF 84-403 quant à leurs caractéristiques (maintien de l'aspect, imperméabilité, isolation thermique). Une étude préalable de reconnaissance est nécessaire pour sélectionner la nature des travaux préliminaires à effectuer (décapage ou conservation des anciens revêtements).

4.4.2.3. *Enduits de façade*

Les enduits de façade sont à base de liants hydrauliques, et/ou de chaux aérienne. Ils appartiennent à deux catégories :

- les enduits traditionnels, exécutés en trois couches distinctes (DTU 26.1) ;
- les enduits mono couches prêts à l'emploi. Ils font l'objet d'un classement MERUC, fournissant des indications sur leurs caractéristiques mécaniques.

4.4.2.3- *Garanties*

Des garanties contractuelles peuvent être proposées par le fabricant (pour un chantier donné avec des conditions particulières), mais les garanties légales sont :

- La garantie biennale dite de bon fonctionnement, qui s'applique aux revêtements de classe D (D1, D2, D3). La bonne tenue (norme NF T 36-001) est l'absence de cloquage, de craquelage, d'écaillage, de décollement au-delà de 5% de la surface de l'élément de référence.

- La garantie décennale qui s'applique aux revêtements de classe I. Elle porte uniquement sur la fonction imperméabilité (le cloquage, l'encrassement, le farinage ne sont pas pris en compte, car ils ne portent pas préjudice au clos).

Enfin, la fonction décorative sera appréciée par rapport à une *surface de référence*, qui devra comporter toutes les opérations prévues au descriptif.

4.4.3. Références bibliographiques

- “ Mise en peinture des bétons de génie civil ” Guide technique LCPC, Juin 1999
- “ Les systèmes de peinture pour les bétons de génie civil ” Guide LCPC, 1999
- “ Protection des bétons armés ” Guide Technique LCPC (à paraître)
- “ Exécution des ouvrages en béton armé ou en béton précontraint ” Fascicule 65A du Cahier des Clauses Techniques Générales (CCTG)

4.5. BETON PROJETÉ

4.5.1. Principes et définitions

4.5.1.1. Définition

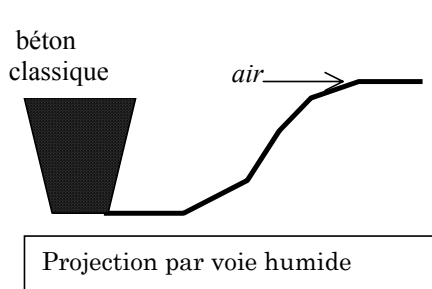
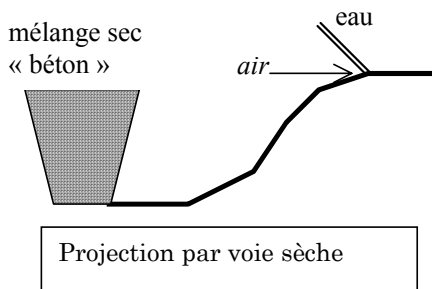
Un béton projeté est constitué d'un mélange de granulats, de ciment et d'eau avec parfois des ajouts, projeté grâce à de l'air comprimé, sur une paroi.



photo 4.7 : Projection de béton

Il faut distinguer deux techniques de projection, suivant le moment d'introduction de l'eau dans la chaîne :

- par voie sèche avec ou sans pré-mouillage : l'eau est introduite au niveau de la lance,
- par voie mouillée : l'eau est introduite au malaxage du béton.



4.5.1.2. Rôle des adjuvants, des fibres et des fumées de silice

Un béton projeté peut aussi contenir des adjuvants, des fibres ou des fumées de silice.

a- L'utilisation des adjuvants confère au béton des propriétés spécifiques lors de la mise en œuvre :

- obtention et maintien de la fluidité, grâce à des stabilisateurs de prise introduits à la sortie de la centrale pour une optimisation des conditions de transport,
- obtention de la consistance initiale, grâce à des activateurs introduits quelques mètres avant la lance,
- mise en œuvre efficace grâce à des accélérateurs de prise (raidisseurs) introduits en bout de lance, mais entraînant parfois une baisse des résistances mécaniques à long terme.

b- L'adjonction de fibres confère au béton projeté des propriétés complémentaires qui dépendent de la quantité et du type de fibres :

- cohésion améliorée du béton frais,
- limitation des effets du retrait,
- amélioration possible des caractéristiques mécaniques (résistance accrue au cisaillement et à la flexion).

Le comportement de post-fissuration confère au matériau une ductilité (recommandations AFTES sur le Béton Projeté Renforcé de Fibres – BPRF, conclusions du projet national BEFIM).

c- L'utilisation de fumée de silice améliore l'aptitude à la projection (béton plus collant) ainsi que la durabilité (béton plus dense).

Nota : L'adjonction d'armatures permet les renforcements ou les réparations de structure.

4.5.2. Etat de l'art. Normes

La réalisation des travaux de béton projeté doit se faire conformément à des normes (NF P 95 102, NF EN 934-2) et à des recommandations, telles que le Fascicule n°3 du STRRES (Syndicat des entrepreneurs spécialistes des travaux de réparation et de renforcement des structures) et la recommandation de l'ASQUAPRO (Association pour la qualité de la projection des mortiers et bétons) sur la prévention, l'hygiène et la sécurité lors des projections de béton.

4.5.3. Procédure d'application du béton projeté

La procédure d'application doit justifier les matériaux et les moyens choisis pour leur mise en œuvre.

4.5.3.1- Préparation du chantier : études

Les études portent sur la formulation du béton en regard des exigences du Dossier de Consultation des Entreprises (DCE), avec notamment la technique de projection et le choix des constituants ainsi que les caractéristiques attendues.

a- Pour les renforcements structurels, la voie sèche ou éventuellement la voie mouillée à flux dilué est préférable, et les dosages en ciment doivent être minimaux.

b- Les études prennent en compte, le plus en amont possible, les sujétions de chantier liées :

- à l'environnement (bruit – pollution),
- à l'accès (aménagement et plate-forme de travail suffisante pour que le porte-lance puisse effectuer le travail convenablement – distance entre lance et surface de 0,50 m à 1,50 m environ),
- à la signalisation (sécurité), à la circulation (vibration du support).

Le Plan Assurance Qualité (PAQ) de l'entreprise doit détailler les dispositions qui s'y rapportent.

Les études précisent :

- la conception des travaux (phasage, type d'échafaudages, matériel de projection, mode de transport et distance maximum, etc.),
- les caractéristiques du béton projeté (durée pratique d'utilisation, épaisseur à projeter, nombre de passes, délai entre passes),
- la qualité du support de projection (degré de propreté, humidité, etc.),
- la cure du béton projeté,
- le délai nécessaire de travaux hors circulation....

4.5.3.2. Exécution du chantier

La commande du béton tient compte des résultats de l'étude et de la convenance en intégrant les sujétions de transport et de mise en œuvre (cadences, programmes). Les adjuvants utilisés doivent être admis à la marque NF lorsqu'elle existe ou équivalent.

L'approvisionnement est fonction du mode de projection choisi. Dans le cas d'un Béton Prêt à l'Emploi(BPE), le PAQ (Plan Assurance Qualité) de la centrale BPE s'applique.

Dans le cas d'une fabrication de chantier, l'approvisionnement des matières premières se fait soit en vrac, soit en sac (mélange sec prêt à l'emploi). L'identification et le contrôle de qualité s'effectuent dans le cadre du contrôle interne en procédant par lots (liés le plus souvent aux phases du chantier).

Le stockage doit permettre d'avoir la quantité suffisante pour éviter une rupture de bétonnage et de conserver les matières premières sans détérioration de leur qualité (pollution...).

En voie sèche, le contrôle de l'humidité des matériaux est un point important à contrôler.

La qualité d'une réparation par béton projeté est fortement liée aux conditions d'exécution et notamment à la qualification du porte-lance. L'essai de convenance réalisé, conformément à la norme NFP 95102, permet de s'assurer que toutes les conditions (personnel, moyen, choix des matériaux) sont réunies pour une bonne exécution des travaux.

4.5.3.3. Choix des matériels

Les machines sont identifiées : elles doivent correspondre à l'utilisation attendue (capacité, puissance, débit (air, eau) résistance). Leurs caractéristiques sont définies au PAQ en regard des objectifs fixés au cahier des charges, avec une attention particulière

pour le choix des équipements et notamment sur les adaptations qui conditionnent le bon déroulement de la projection.

Toutes les bascules ou balances nécessaires au dosage pondéral doivent être étalonnées. Les doseurs en adjuvants doivent être asservis au débit de la machine à projeter et agréés par un essai de convenance.

Certains matériels doivent être prévus en réserve, pour éviter l'interruption de chantier qui serait de nature à nuire à la qualité finale de l'ouvrage.

4.5.3.4. Qualification du personnel

L'équipe (porte-lance, aide porte-lance et machiniste) doit être qualifiée, c'est-à-dire ayant des références certifiées pour des travaux similaires ou ayant suivi une formation sanctionnée par un certificat de qualification obtenu après contrôle des connaissances théoriques ou pratiques. Le nombre de personnes est adapté à l'importance du chantier.

Le PAQ entreprise précise les fonctions et les responsabilités de chaque membre de l'équipe ainsi que les références de ces personnes.

4.5.3.5. Procédure opératoire

L'opération de bétonnage respecte la chronologie suivante :

- préparation du support,
- scellements éventuels de connecteurs,
- mise en place éventuelle du ferrailage et des piges de contrôle d'épaisseur (non oxydables),
- projection du béton en respectant le phasage (de bas en haut sur des bandes de largeur déterminée),
- passes successives (respect du nombre et délai entre passes),
- arrêt de bétonnage en fin de lot ou de journée, suivant les règles de l'art,
- couche de finition éventuelle (toujours distincte de la couche structurelle).
- protection par cure, si nécessaire.

4.5.4. Contrôle de la mise en œuvre

4.5.4.1. Contrôle intérieur

Il porte sur :

- les épreuves d'étude et de convenance,
- la vérification de la conformité de la livraison à la commande pour le béton (cas du Béton Prêt à l'Emploi (BPE)), les matériaux (ciment/granulats, adjuvants/ajouts/eau ou les sacs prédosés, dans le cas du béton fabriqué sur place), les armatures, les produits de cure,
- les prélèvements conservatoires des matériaux, en vue d'analyses éventuelles,
- la vérification de l'état du support et des surfaces de reprises entre couches,
- la vérification de la mise en place du ferrailage,
- le contrôle d'exécution et de la qualité du béton projeté,

- le contrôle d'épaisseur du béton projeté,
- le contrôle de cure,
- le contrôle d'adhérence au support.

4.5.4.2. *Contrôle extérieur*

Il porte sur les points d'arrêt suivants :

- la validation de l'épreuve d'étude,
- la validation de l'épreuve de convenance,
- la vérification de l'état du support, de la mise en place du ferrailage et des piges de profondeur,
- le contrôle d'adhérence au support,
- la vérification de la qualité du béton projeté (épaisseur, texture, résistance).

4.5.5. **Domaine et limites d'emploi**

4.5.5.1. *Béton projeté par voie sèche*

Avantages

Les avantages du béton projeté par voie sèche sont les suivants :

- grande souplesse d'utilisation : il est facile d'arrêter le travail et de redémarrer sans avoir à se livrer à des nettoyages fastidieux,
- grandes distances de transport : il est possible d'installer la machine à projeter à quelques centaines de mètres du lieu de travail. Dans des cas précis - par exemple, réparations de tunnels SNCF - des installations spécialement étudiées permettent un transport sur plus d'un kilomètre, sans reprise,
- possibilité de projeter de fortes épaisseurs en une seule couche même sans accélérateur,
- résistances élevées : l'effet de compaction exercé par les graviers projetés à grande vitesse et le faible E/C tendent à améliorer les résistances,
- obtention aisée de béton à hautes performances,
- robotisation possible pour augmenter les cadences et les conditions de travail.

Domaines d'emploi privilégiés

Ils sont les suivants :

- réparation et renforcement de structure,
- réalisation de voiles minces avec armatures,
- projection immédiate de terrain avec activité discontinue et volume restreint,
- projection en falaise,
- rénovation d'ouvrages souterrains, etc.

Limites d'emploi et inconvénients

Ce sont :

- une capacité de production limitée,
- un dégagement de poussière, à la machine et à la lance (pouvant être réduit en humidifiant le granulat),
- une appréciation visuelle de la teneur en eau par le porte-lance,
- une perte par rebond importante,
- dans le cas de béton fibré, un appauvrissement en fibres dans le béton placé,
- un risque de détérioration des supports fragiles, etc.

4.5.5.2. Béton projeté par voie mouillée

Avantages

Les avantages du béton projeté par voie mouillée sont les suivants :

- capacité de production élevée, atteignant le double ou le triple de la voie sèche,
- diminution des poussières, améliorant les conditions de travail,
- diminution des pertes par rebond,
- meilleur contrôle de la qualité du béton,
- composition du béton en place homogène dans l'épaisseur de la couche,
- dans le cas de béton fibré, dosage en fibres du béton en place proche du dosage initial,
- robotisation, améliorant les conditions de travail.

Domaines d'emploi privilégiés

Ils sont les suivants :

- travaux en espace confiné,
- soutènement en tunnel nécessitant des cadences importantes de projection,
- projection sur support fragile, etc.,

Limites d'emploi et inconvénients

Ce sont :

- moins de souplesse ; formulation exigeant une mise au point rigoureuse (fluidité, stabilisation, etc) et une régularité de la consistance,
- un transfert sur de grandes distances difficile,
- des adjuvants raidisseurs ou accélérateurs obligatoires pour compenser la fluidité et la stabilisation du béton projeté,
- l'usage recommandé d'un stabilisateur pour permettre un temps d'utilisation suffisant du béton gâché pour minimiser les nettoyages lors des arrêts ponctuels de la machine à projeter,
- un compactage et une adhérence plus faible,
- la nécessité d'un dosage initial en ciment élevé (minimum 400kg/m³) pouvant entraîner des retraits importants.

4.5.6. Essais de réception

Les essais de réception sont définis dans les normes, les recommandations, ou les procédures contradictoires.

Leur objectif est de valider en fin d'exécution, les engagements de l'entrepreneur qui a accepté de satisfaire aux exigences du marché : caractères géométriques (forme, finition, etc.), caractères esthétiques (teintes, texture, etc.), caractéristiques mécaniques (résistance à la compression, adhérence, etc.), caractères physico-chimiques, etc.

4.5.7. Durée et efficacité du procédé

La projection du matériau sur un support lui confère des caractéristiques mécaniques et physico-chimiques intéressantes, surtout par voie sèche, du fait de la très grande vitesse :

- richesse élevée en ciment du mélange projeté, au voisinage de la surface réceptrice, du fait des rebonds des plus gros granulats,
- compaction dans l'épaisseur de la couche.

Les propriétés attendues sont les suivantes :

- adhérence au support,
- résistances mécaniques précoces élevées,
- module élastique voisin de celui du support,
- fissuration maîtrisée : l'ajout de fibres améliore encore cette propriété,
- protection du support vis à vis des agents agressifs et des actions du gel-dégel avec des précautions particulières : (formulation, mise en œuvre),
- possibilité de projeter des couches épaisses en une seule passe.

4.5.8. Normes et références bibliographiques

Normes

- NF P 95.102 “ Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – béton projeté ”
- NF EN 934-2 “ Adjuvants pour bétons. Définitions, exigences ”

Recommandations

- Fascicule n° 3 “ Béton projeté ” du STRRES (Syndicat national des entrepreneurs spécialistes des travaux de réparation et de renforcement de structures), 1987
- “ Recommandations pour la prévention, l'hygiène et la sécurité lors des projections des mortiers et bétons ” de l' ASQUAPRO.
- “ Marché pour la réparation et les modifications d'Ouvrages d'Art ” Recommandations du SETRA.

Livres

- Resse (C.), Venuat (P.) “ Projection des mortiers, bétons et plâtres ” Techniques et applications Bâtiment et T.P 1981
- Calgaro (J. A.), Lacroix (R.) “ Maintenance et réparation des ponts ”, chapitre 6 - Presses de l’E.N.P.C., 1997

Documents en cours d’élaboration

- Guide technologique ASQUAPRO pour l'exécution des travaux de projection des mortiers et bétons
- Groupe de travail AFTES n° 6 - Recommandations relatives à la technologie et à la mise en œuvre du béton projeté renforcé de fibres.

4.6. TRAITEMENTS ELECTROCHIMIQUES

4.6.1. Traitements électrochimiques de ré-alkalinisation et d'extraction des chlorures

4.6.1.1. Principe

Le principe de ces traitements consiste à polariser l'armature la plus proche du parement, à l'aide d'une anode placée sur ce parement et enrobée d'une pâte saturée d'un liquide convenablement choisi (électrolyte). Le courant de polarisation circule de l'anode vers l'armature (cathode). Les armatures plus profondes doivent être reliées électriquement à celle qui est directement polarisée.

Ces traitements électrochimiques sont dits temporaires, parce qu'ils durent généralement entre une et six semaines.

Deux techniques de traitements temporaires sont distinguées :

- une technique pour laquelle un générateur électrique (technique du courant imposé) est placé entre l'anode et l'armature,
- une technique pour laquelle l'anode, en alliage judicieusement choisi, est directement reliée à l'armature (courant galvanique).

Leur objectif est de redonner au béton d'enrobage, sa capacité à protéger les armatures. Il s'agit soit d'augmenter le pH du béton qui a été carbonaté (ré-alkalinisation), soit d'extraire les ions chlorures qui ont pénétré cet enrobage (déchloration). L'aspect du béton traité est respecté.

4.6.1.2. Expertise et travaux avant application

4.6.1.2.1. Expertises

Avant de mettre en œuvre ces traitements, il est nécessaire d'effectuer un diagnostic complet des désordres (cf chapitre 2 Diagnostic), pour :

- rechercher les causes des désordres,
- déterminer les susceptibilités éventuelles à l'alcali-réaction, liée à la teneur en alcalin (équivalent en Na_2O) du béton contenant des granulats réactifs,
- effectuer l'analyse quantitative des paramètres permettant de contrôler ensuite l'efficacité du traitement.

4.6.1.2.2. Travaux avant traitement

Il s'agit de :

- vérifier la continuité électrique des armatures. Au besoin, relier électriquement (pontages) les armatures isolées.
- reconstruire éventuellement les parements, en utilisant un mortier à base de ciment aussi proche que possible du ciment d'origine, sans passer les aciers : les traitements de passivation sont une source d'hétérogénéité et isolent électriquement les armatures.

4.6.1.3. Conception

Les expertises préalables permettent de délimiter les zones à traiter. Les groupes d'armatures qui ne sont pas reliées électriquement, sont considérés comme étant des zones distinctes.

Les dimensions des anodes et la capacité du générateur de courant sont définies en fonction des dimensions des armatures (diamètres, longueurs) et des surfaces à traiter.

4.6.1.4. Procédure d'application

Un traitement s'applique en plusieurs étapes.

Système à courant imposé :

- projection d'une première couche de pâte (cellulose ou laine de roche) avec une solution électrolytique adaptée (carbonate alcalin pour la ré-alcalinisation ou eau de chaux pour la déchloration),
- mise en place du treillis anodique métallique (acier ou titane) sur des baguettes isolantes, fixées au parement,
- connexion des fils d'anode sur le treillis,
- projection d'une deuxième couche de pâte,
- raccordements électriques au générateur de courant continu ayant une tension réglable de 10 à 48 volts,
- humidification périodique de la pâte par l'électrolyte, ou par de l'eau,
- suivi des tensions et courants, prélèvement d'échantillons de béton en cours de traitement pour analyses (alcalinité, taux de chlorures),
- dépose de l'ensemble de l'installation,
- rinçage à l'eau basse pression.

Système à courant galvanique :

- projection ou extrusion d'une couche de pâte saturée d'électrolyte et déposée sur le béton,
- mise en place de l'anode (grille) métallique qui est, d'une part, fixée sur une baguette qui l'isole du parement béton et, d'autre part, au contact de la pâte,
- connexion de l'anode au circuit électrique, à partir de ce moment le traitement est actif,
- humidification périodique de la pâte avec de l'eau,
- suivi des tensions et courants, prélèvement d'échantillons de béton en cours de traitement pour analyses (alcalinité, taux de chlorures),
- dépose de l'ensemble de l'installation,
- rinçage à l'eau basse pression.

Dans ce cas, l'électrolyte choisi permet de réaliser en même temps une déchloration et ré-alcalinisation.



photo 4.8 : Application de la pâte sur le treillis



photo 4.9 : Traitement en cours

4.6.1.5. Contrôle de la mise en œuvre

Les applicateurs des traitements ont la responsabilité globale de la mise en œuvre et du résultat.

4.6.1.6. Limites d'emploi et domaines

Les procédés de traitements électrochimiques temporaires s'appliquent aux seuls cas de bétons armés dégradés :

- par carbonatation jusqu'à une profondeur au plus égale à l'épaisseur d'enrobage,
- ou par chloruration d'origine externe, limitée entre le parement et le premier lit d'armature.

Ils ne sont pas adaptés pour les autres pathologies, telles les attaques sulfatiques, l'alcali-réaction, etc. Dans le cas d'un béton potentiellement réactif à cette dernière altération, des essais préalables doivent être effectués.

4.6.1.7. Essais de réception

Les résultats des traitements électrochimiques temporaires s'évaluent quantitativement.

Pour la ré-alcalinisation, l'application d'un réactif coloré (généralement, la phénolphtaléine) permet de déterminer les parties du béton de pH assez élevé.

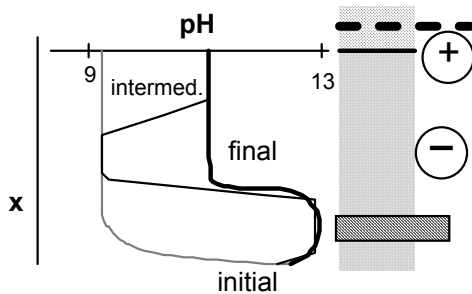
Pour la déchloruration, des dosages en chlorures, effectués avant et après traitement, permettent de quantifier le résultat.

4.6.1.8. Durée et efficacité du procédé

Ré-alcalinisation :

Les effets de ré-alcalinisation persistent après 10 ans, si l'épaisseur de béton ré-alcalinisé autour de l'armature est supérieure à 10 mm.

Il est possible d'appliquer après traitement, un revêtement pelliculaire, sur la surface du béton.

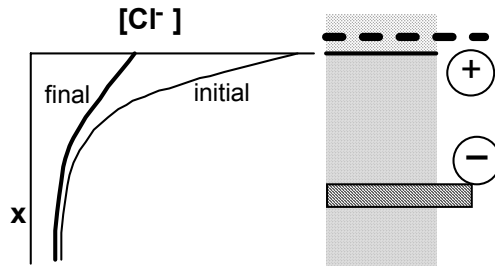


Zones où le béton est ré-alcalinisé après traitement.

La polarisation permet de ré-alcaliniser le béton qui est au contact de l'armature.

Déchloruration :

Une extraction est efficace, si la teneur en chlorure au voisinage d'une armature est inférieure au seuil habituellement admis pour éviter la corrosion métallique. Ceci correspond souvent à un rendement de 80 à 90 % pour l'extraction des ions chlorures.



Profils de concentration en chlorure avant et après traitement d'extraction

Il est recommandé de protéger la surface du béton pour éviter une nouvelle arrivée de ces ions. Tout système de protection classique est applicable.

4.6.2. Traitement de protection cathodique

4.6.2.1. Principe de la protection cathodique

La protection cathodique des armatures métalliques dans un béton est un traitement appliqué de façon permanente qui permet de ralentir, voire d'arrêter leur corrosion. Elle consiste à abaisser le potentiel électrochimique de l'armature jusqu'à une valeur seuil appelée potentiel de protection qui est telle que la vitesse de corrosion de l'acier devient négligeable.

Le principe de la protection cathodique consiste à polariser l'armature dans le béton, à l'aide d'une anode placée de façon permanente sur le parement ou parfois dans l'enrobage. Le courant de polarisation, qui circule de l'anode vers l'armature, se situe entre 2 et 50 mA par mètre-carré de surface d'armature.

Il existe deux techniques de protection cathodique :

- par courant imposé : un générateur électrique est placé entre l'anode et l'armature,
- par anode sacrificielle (courant galvanique) : l'anode, en alliage correctement sélectionné, est directement reliée à l'armature.



photo 4.10 : Mise en place du treillis anodique



photo 4.11 : Armoire de connexions

La protection cathodique de l'acier dans le béton fait l'objet de la norme européenne NF-EN 12 696 "Protection cathodique de l'acier dans le béton". Elle doit être étudiée, mise en œuvre et appliquée par du personnel compétent.

4.6.2.2. Expertises et travaux avant application

La protection cathodique est nécessaire, lorsque les armatures du béton armé se corrodent ou sont susceptibles de se corroder. Un diagnostic de l'état du béton et des armatures de la structure permet de préciser la nécessité d'un renforcement ou d'une réparation, avant la mise en place d'un système de protection cathodique.

L'état de la structure, son intégrité structurelle et la nécessité de certaines réparations, font l'objet d'une évaluation par un spécialiste.

Toutes les informations disponibles, doivent être exploitées et complétées par un examen du site et éventuellement par des essais, pour déterminer la nature et l'ampleur des désordres et des réparations à effectuer :

- examen visuel et recherche des délaminages,
- épaisseur d'enrobage et localisation des armatures,
- analyse des chlorures (profil des teneurs),
- profondeur de carbonatation,
- continuité électrique des armatures,
- potentiel d'armatures,
- résistivité électrique du béton.

Des analyses complémentaires sont utiles, comme la résistivité de surface et la vérification de l'absence de risque d'alcali-réaction.

Des travaux préalables peuvent être nécessaires, avant application de la protection cathodique :

- élimination du béton dégradé ainsi que du béton de réparations antérieures, présentant une résistivité significativement différente,
- préparation des armatures : enlever la rouille non adhérente et rétablir la continuité électrique (si besoin),
- reconstitution de l'enrobage pour avoir une distance minimale de 20 mm entre l'armature et le parement extérieur,
- reconstitution du parement avec un matériau à base de ciment.

4.6.2.3. Conception

Les expertises préalables permettent de délimiter les zones à traiter. Les groupes d'armatures qui ne sont pas reliées électriquement sont considérés comme étant des zones distinctes.

Les dimensions des anodes et la capacité du générateur de courant sont définies en fonction des dimensions des armatures (diamètres, longueurs) à traiter.

Le calcul de dimensionnement a pour but de définir les caractéristiques de l'installation (type et quantité d'anodes à mettre en place, courant total nécessaire et tension correspondante, nombre de zones de contrôle et par conséquent, nombre d'électrodes de référence à implanter, connexions cathodes (sur armatures) ainsi que chemin de câblage).

L'étude détaillée de l'installation de la protection cathodique conduit à l'établissement d'un plan qualité comportant :

Une **note de calcul** détaillée indiquant notamment :

- le nombre et l'emplacement des zones anodiques,
- la consommation en courant [$\text{mA/m}^2(\text{acier})$] pour chaque zone,
- le type d'anode choisi,
- le nombre et l'emplacement des capteurs de surveillance et de contrôle.

Des **plans d'installation** détaillés portant sur :

- l'emplacement des anodes et des connexions anodiques,
- le câblage (boîtiers de raccordement et câbles positifs et négatifs)
- et le positionnement du transformateur-redresseur (courant imposé),
- le détail des connexions (aux anodes, capteurs, etc.),
- l'emplacement et le câblage des capteurs.

Les **spécifications** détaillées relatives aux *matériaux* d'installations

Les **déclarations** ou spécifications détaillées relatives :

- à la méthode d'installation,
- aux essais,
- à la mise sous tension,
- à la mise en service
- à l'exploitation.

4.6.2.4. Procédure d'application

Une installation de protection cathodique se met en place en plusieurs étapes.

4.6.2.4.1. Installation des anodes

Des trous sont forés dans le parement de béton pour mettre à nu les armatures et les connecter au réseau électrique. Ces trous sont ensuite bouchés.

Les anodes sont généralement plaquées à la surface du parement, mais elles peuvent aussi être enfouies dans le béton. Chaque type d'anode a son mode d'installation particulier, comme l'indique la norme européenne NF EN 12.696.

Toutes les surfaces en béton destinées à recevoir les anodes superficielles doivent être préparées.

Ces anodes sont généralement en titane (activé), en zinc, des peintures conductrices, etc. Après leur mise en place, les anodes en titane sont enrobées de mortier (d'une épaisseur supérieure à 20 mm). Les anodes superficielles en zinc peuvent être peintes.

Les anodes sous forme de peintures peuvent être recouvertes d'une autre couche (de finition) pour des raisons d'esthétique et pour améliorer leur tenue à l'atmosphère.

Les anodes placées à l'intérieur du béton sont enrobées de matériau à base de ciment.

4.6.2.4.2. Installation des capteurs

Des capteurs sont à placer dans le béton pour permettre le suivi de l'installation. Ils sont installés dans les zones les plus fortement soumises à la corrosion. Il s'agit d'électrodes de référence et de sonde de température. Mais d'autres types de capteurs peuvent être installés (sonde pour caractériser le courant de polarisation, etc.)

4.6.2.4.3. *Mise en service*

La mise en service comporte les étapes suivantes :

Avant la mise sous tension

a- Inspection visuelle :

- des circuits électriques (polarisation et mesures) pour confirmer que tous les composants et câbles sont correctement installés, étiquetés et si nécessaire, protégés des possibilités de dommages dus à l'environnement, à l'homme ou aux animaux.
- du recouvrement des anodes et sondage au marteau pour vérifier que l'adhérence est correcte en tout point.

b- Vérification :

- de la polarité de tous les circuits,
- de la continuité de tous les circuits,
- de l'isolation de tous les circuits électriques,
- du matériel de mesure centralisée électronique et/ou de transmission des données faisant partie du système de surveillance.

c- Mesure des grandeurs suivantes :

- potentiel de l'acier par rapport aux électrodes de référence installées de manière permanente et aux capteurs de dépolarisation,
- potentiel de l'acier par rapport à des électrodes de référence portables,
- différence de potentiel entre l'armature et l'anode,
- toutes les données de base des autres capteurs faisant partie du système de surveillance.

Mise sous tension initiale

a- La première mise sous tension comporte de préférence les étapes suivantes :

- une polarisation appliquée progressivement et par palier pour chaque zone individuelle (courant imposé),
- enregistrement à chaque palier de l'intensité I de l'alimentation et du potentiel de structure E_c pour déterminer le courant de protection I_0 ,
- maintien du courant de protection I_0 sur une durée suffisante pouvant aller jusqu'à 28 jours ou plus.

b- La performance initiale s'évalue en mesurant :

- la tension de sortie,
- l'intensité du courant dans chaque zone avec calcul de la résistance du circuit,
- les potentiels instantanés à courant coupé au niveau de toutes les électrodes de référence installées de manière permanente,
- la dépolarisation après coupure permanente de l'alimentation,
- les paramètres de tous les autres capteurs installés comme éléments de surveillance.

Mise sous tension définitive

Le réglage définitif du courant de polarisation I_0 est effectué après un délai de l'ordre de 28 jours ou plus.

4.6.2.4.4. Exploitation et maintenance

Le fonctionnement d'une installation de protection cathodique se contrôle en continu, surtout par mesure du courant de polarisation pour chaque zone d'anode. Les données des autres capteurs sont relevées suivant une périodicité qui est indiquée dans le plan qualité.

Le contrôle du fonctionnement de cette installation est consigné dans un procès-verbal, pour les actions suivantes :

- les inspections de routine (avec enregistrement) qui permettent de vérifier le bon fonctionnement de la protection cathodique et d'évaluer la performance des éléments et analyse des résultats,
- le suivi de l'installation qui reprend toutes les données des anciennes inspections de routine et englobe un examen visuel de l'installation, une nouvelle inspection de routine. Il est à noter que si l'installation est équipée d'un système de gestion à distance, le déplacement sur le site n'est nécessaire que pour le suivi de l'installation, sauf si des événements anormaux ont été détectés,
- le contrôle de l'efficacité à 5 ans par observation visuelle d'armatures dégagées pour la circonstance, ainsi qu'un essai de coupure de courant.

4.6.2.5. Contrôle de la mise en œuvre

Le contrôle interne à l'entreprise, qui est défini dans le plan d'assurance qualité, porte sur l'ensemble des phases énumérées ci - avant.

4.6.2.6. Limites d'emploi et domaines

La protection cathodique s'applique aux structures béton armé, exposées à l'atmosphère, dont les armatures se corrodent ou risquent de se corroder. Elle s'applique aux armatures en acier non revêtu et aux armatures en acier recouvert par un revêtement organique.

Elle peut s'appliquer aux armatures de précontrainte du béton, si le potentiel des aciers n'est pas plus négatif que $-1100 \text{ mV}_{\text{Ag-AgCl}}$, seuil au-dessous duquel l'hydrogène peut fragiliser les aciers à haute résistance mécanique. Dans ce cas, les armatures de précontrainte doivent obligatoirement être reliées aux cages d'armatures passives.

Il ne faut pas appliquer une protection cathodique lorsque le béton risque des dégradations par alcali-réaction, principalement lorsque les armatures sont fortement polarisées.

4.6.2.7. Essais de réception

Les essais de réception sont ceux qui sont faits lors de l'installation du système et lors de la première mise sous tension de l'installation

Tous les essais font, conformément au plan qualité, l'objet d'un rapport d'essais qui est inséré au dossier de l'ouvrage.

4.6.2.8. *Durée et efficacité du procédé*

Une installation de protection cathodique est efficace, tant que les critères (potentiel sous courant coupé, etc.) sont vérifiés. Parmi tous les composants des circuits électriques, les composants les moins durables sont les électrodes de référence, qui sont facilement remplaçables, et les anodes. Une anode en titane est donnée pour une durée de 20 ans minimum. Certains compléments permettent de rallonger la durée de vie des anodes.

4.6.3. **Références bibliographiques**

- “Corrosion and protection of metals in contact with concrete” Final report COST 509, European Commission report EUR 17608 EN, Part 3, 1997
- A. RAHARINAIVO, G. ARLIGIE, Th. CHAUSSADENT, G. GRIMALDI, V. POLLET, G. TACHE “La corrosion et la protection des aciers dans le béton”. Presse Ecole Nationale Ponts et Chaussées - 1998
- A. RAHARINAIVO, J. C. LENGLET, C. TOURNEUR, H. MAHOUCHE, V. POLLET, “Chloride extraction and realkalisation of concrete by using sacrificial anodes”. In: “Controlling Concrete Degradation”, Ed. R. K. Dhir, M. D. Newlands. Proc. of International Congress. University of Dundee, UK, September 1999, pp. 189 - 197
- Projet de norme pr EN 14038-1 “Réalkalinisation électrochimique et traitements d’extraction des chlorures applicables au béton armé – Partie 1 : Réalkalinisation ”
- Norme Européenne NF EN 12696 (indice de classement A 05-668) “ Protection cathodique de l’acier dans le béton ” Juillet 2000

4.7. RECAPITULATIF

Plusieurs procédés existent pour réhabiliter le béton armé dégradé par la corrosion.

Aucun d'eux n'est applicable dans tous les cas. Leurs caractéristiques sont résumées dans les tableaux ci-dessous.

Il est rappelé que chaque procédé ou traitement doit comporter les étapes suivantes :

- Evaluation de la structure
- Nature et causes des éventuelles dégradations
- Choix entre les solutions possibles sur le plan technique
- Compatibilité entre les procédés et les exigences diverses. En effet, la plupart du temps, plusieurs options différentes sont possibles : la solution retenue doit être compatible avec les exigences diverses, les choix techniques et le coût supportable.

Reconstitution de l'enrobage

Domaine d'action	Restauration de l'apparence du parement
Mise en œuvre	Enlèvement du béton dégradé. Brossage, remplacement d'armatures Protection éventuelle. Application de produit NF ou assimilé
Limites et précautions d'emploi	Phasage précis des opérations (risques de déséquilibre de la structure)
Efficacité. Contrôle et durée	Réception des armatures de renforcement Contrôle des renforcements, Réception des supports
Effets secondaires. Incidences sur l'ouvrage. Commentaires	Risques de récurrence si la partie corrodée n'est pas parfaitement enlevée, Attention aux effets cathodiques adjacents

Béton projeté

Domaine d'action	Réparations, renforcements structurels
Mise en œuvre	Projection sur la paroi à l'aide d'air comprimé selon deux techniques : voie sèche et voie mouillée
Limites et précautions d'emploi	Respecter la norme NF 95102 pour la composition comme pour les épaisseurs
Efficacité. Contrôle et durée	Réception des armatures, Contrôle d'adhérence, Confection des caisses de convenue avec carottage pour le contrôle des caractéristiques
Effets secondaires. Incidences sur l'ouvrage. Commentaires	Surcharges

Produits protecteurs : Hydrofuges de surface

Domaine d'action	Action hydrophobe sur le parement
Mise en œuvre	Application sur la surface par rouleau ou pulvérisateur. La préparation du support est fondamentale
Limites et précautions d'emploi	Emploi lorsque l'altération est due à un contact avec de l'eau liquide provenant de l'atmosphère Ne pas appliquer sur des surfaces horizontales
Efficacité. Contrôle et durée	Contrôle de l'efficacité par l'essai perlant (qualitatif)
Effets secondaires. Incidences sur l'ouvrage. Commentaires	Mauvaise compatibilité des hydrofuges avec les sels solubles et certains produits de traitement

Produits protecteurs : Inhibiteurs de corrosion

Domaine d'action	Ralentissement du processus de corrosion des armatures
Mise en œuvre	Par pulvérisation en plusieurs passes (forme liquide) sur la surface du béton ou application directe sur la surface (forme gélifiée) ou sur l'acier
Limites et précautions d'emploi	Incompatibilité avec les éléments déjà traités par hydrofuges Limites liées à des teneurs en chlorures trop élevées
Efficacité. Contrôle et durée	Efficacité dépendante de la nature du produit et de la quantité disponible au niveau des aciers (dosage de l'inhibiteur) Contrôle par mesures de potentiels ou de courants de corrosion
Effets secondaires. Incidences sur l'ouvrage. Commentaires	Certains inhibiteurs minéraux interagissent avec le béton Risque d'apparition d'efflorescences devant être nettoyées

Revêtements de surface : Peintures, lasures et autres revêtements

Domaine d'action	Amélioration du parement : action esthétique, limitation de l'encrassement, action protectrice du béton.
Mise en œuvre	Application en plusieurs couches sur un support ne présentant pas d'imperfections trop importantes
Limites et précautions d'emploi	Protection superficielle, non curative L'état du support au moment de l'application a un rôle déterminant
Efficacité. Contrôle et durée	L'efficacité est liée à la qualité de l'adhérence entre le support et le revêtement, Risques de cloquage, craquelage, écaillage. Contrôle de la perméabilité de surface
Effets secondaires. Incidences sur l'ouvrage. Commentaires	Attention à la tenue aux rayons UV dans le choix des produits Risque d'incompatibilité avec certains traitements du béton

Revêtements de surface : Enduits pour le bâtiment

Domaine d'action	Amélioration de la surface du béton : esthétique, correction des irrégularités de surface (porosité, fissures), protection vis à vis de l'environnement
Mise en œuvre	Selon la nature du produit
Limites et précautions d'emploi	Protection superficielle, non curative
Efficacité. Contrôle et durée	L'efficacité est liée à la qualité de l'adhérence entre le support et le revêtement, Risques de cloquage, craquelage, écaillage.
Effets secondaires. Incidences sur l'ouvrage. Commentaires	

Traitements électrochimiques : Ré-alkalinisation des bétons, extraction des chlorures

Domaine d'action	Ré-alkalinisation pour les bétons carbonatés Extraction des chlorures pour les bétons pollués en chlorures
Mise en œuvre	Polarisation des armatures à l'aide d'une électrode placée sur le parement et enrobée d'une pâte saturée d'un électrolyte Durée : quelques semaines
Limites et précautions d'emploi	Continuité électrique des armatures Béton non susceptible à l'alcali-réaction Incompatibilité avec les armatures revêtues Incompatibilité avec les revêtements
Efficacité. Contrôle et durée	Vérification par indicateurs de pH (ré-alkalinisation) ou détermination de la teneur en chlorures (déchloruration). Traitement éventuellement à renouveler, à terme.
Effets secondaires. Incidences sur l'ouvrage. Commentaires	Déséquilibre de la solution interstitielle du béton Risque d'apparition d'efflorescences devant être nettoyées

Traitements électrochimiques : Protection cathodique

Domaine d'action	Protection des aciers par abaissement de leur potentiel électrochimique
Mise en œuvre	Polarisation des aciers à l'aide d'une électrode placée de façon permanente sur le parement ou dans l'enrobage
Limites et précautions d'emploi	Continuité électrique des armatures Réparation éventuelle de la surface, Béton non susceptible à l'alcali-réaction Incompatibilité avec les armatures revêtues Incompatibilité avec les revêtements imperméabilisants.
Efficacité. Contrôle et durée	Efficace si le potentiel de l'acier est maintenu à la valeur exigée Remplacement des électrodes de référence
Effets secondaires. Incidences sur l'ouvrage. Commentaires	Déséquilibre de la solution interstitielle du béton Risque de fragilisation dans le cas des aciers de précontrainte. Modification de l'apparence du parement, Suivi électrique indispensable durant la durée de vie de l'ouvrage.

5. CONTROLES DE LA MISE EN ŒUVRE

La réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion des armatures fait appel à différentes techniques, qui ne sont pas encore toutes codifiées, ni du point de vue des méthodes, ni du point de vue du contrôle.

L'objet de ce chapitre est de préciser ce qu'il y a lieu de faire (c'est-à-dire faire figurer dans les pièces contractuelles et exiger de l'entrepreneur), en matière de contrôle interne, et préciser la nature du contrôle extérieur, qui reste une prérogative du Maître d'œuvre.

Il convient de rappeler les définitions suivantes :

- Point sensible : c'est un point de l'exécution, qui doit particulièrement retenir l'attention.
- Point critique : c'est un point de l'exécution, qui nécessite une matérialisation du contrôle interne sur un document de suivi, ainsi qu'une information préalable du contrôle extérieur pour que celui-ci puisse se faire, le cas échéant. L'intervention du contrôle extérieur n'est pas nécessaire à la poursuite de l'exécution.
- Point d'arrêt : c'est un point critique, pour lequel un accord formel du maître d'œuvre ou d'un organisme mandaté par lui, est nécessaire à la poursuite de l'exécution. Les délais de préavis et les délais de réponse du maître d'œuvre sont fixés dans le Cahier des Clauses Administratives Particulières (CCAP), qui doit préciser les dispositions à prendre par l'entreprise, à l'issue du délai de réponse, en l'absence de réaction du maître d'œuvre.

5.1. PREPARATION DES TRAVAUX

5.1.1. Dossier de consultation des entreprises

Lors de la *rédaction* du Dossier de Consultation des Entreprises (DCE), il faut :

- indiquer que l'entrepreneur qui propose une variante devra définir les contrôles internes correspondants,
- inclure une clause dans le Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) portant sur l'Assurance de la Qualité. Il est rappelé que "l'entrepreneur établit le Plan d'Assurance Qualité (PAQ) dans lequel il décrit l'organisation générale du chantier, les principaux moyens qu'il compte y affecter et les dispositions de contrôle interne associés à ces moyens". Le PAQ est soumis au visa du Maître d'œuvre, ainsi que le cadre des documents de suivi,
- indiquer, dans le CCTP, les sujétions que le contrôle extérieur impliquera, à l'égard de l'entreprise ; en particulier, cette pièce du marché devra contenir la liste des points d'arrêt ainsi que les délais qui s'attachent à la levée de ces derniers.

L'entrepreneur fait des essais et contrôles, au titre du contrôle interne et les conserve à sa charge.

Le Maître d'œuvre fait des essais et contrôles au titre du contrôle extérieur et les rémunère sur crédits du Maître d'ouvrage, qu'ils soient prévus ou non au marché.

5.1.2. Mise au point du marché

Lors de la mise au point du marché il y a lieu de :

- modifier le CCTP pour ce qui est relatif au contrôle interne, en fonction des variantes (compléter si il y a lieu la liste des contrôles internes prévus par l'entrepreneur),
- mettre au point le cadre du PAQ qui comprendra les principales dispositions du document d'organisation générale et la liste des procédures d'exécution, et l'annexer au CCTP.

5.1.3. Plan assurance qualité (PAQ)

Au cours de la période de la préparation et lors de l'exécution, l'entrepreneur établit le PAQ qui traite :

- des *facteurs* contribuant à l'obtention de la qualité :
 - affection des tâches, moyens en personnel
 - matériels et fournitures
 - méthodes et points sensibles de l'exécution
- du *contrôle interne*.

Lors de l'examen du PAQ, le maître d'œuvre devra s'assurer que l'entrepreneur n'aura à se livrer à aucune improvisation sur le chantier.

5.2 . CONTROLE INTERIEUR DE L'ENTREPRISE

Le contrôle intérieur de l'entreprise porte sur des épreuves, des réceptions et le contrôle des travaux finis.

5.2.1. Epreuves

5.2.1.1. Epreuve d'étude

L'épreuve d'étude est un *point critique*.

Lorsque le produit est un composite soumis à une formulation explicite (par exemple, cas du béton projeté), un dossier d'étude est fourni par l'entreprise. Ce document comporte les résultats d'une épreuve d'étude.

5.2.1.2. Epreuve de convenance

L'épreuve de convenance est un *point d'arrêt*.

Elle a pour but de tester, dans les conditions de chantier, l'aptitude de l'entreprise à réaliser les travaux avec les matériaux et les moyens matériels et humains indiqués au PAQ. A cette occasion, les points particuliers sont examinés. Pour toutes les techniques, une attention particulière est portée sur la préparation du support, pour qu'il soit compatible avec la technique proposée.

La planche de convenance est généralement une zone (de l'ordre du mètre-carré) de l'ouvrage à réhabiliter. Elle doit être représentative de l'ensemble de la réhabilitation, sur les plans techniques, difficulté d'accès, sécurité etc.

Les matériaux, les moyens en matériel et la compétence du personnel sont évalués, lors de l'épreuve. Pour certaines techniques, la qualification de l'équipe (exemples : porte lance, aide porte lance et machiniste en béton projeté, ou électricien pour la composante électrique de la protection cathodique) sera exigée.

5.2.2. Réceptions

5.2.2.1. La réception des matériaux

La réception des matériaux est un *point critique*.

La vérification de la conformité de la livraison à la commande porte sur :

- le béton (cas du béton prêt à l'emploi),
- les matériaux (ciment/granulats, adjuvants/ajouts/eau ou les sacs pré-dosés dans le cas du béton fabriqué sur place),
- les produits de ragréage et autres produits de protection,
- les armatures et les produits de cure,
- les anodes, les autres fournitures électriques et les capteurs de suivi des systèmes pour les traitements électriques.

Des prélèvements conservatoires de matériaux sont réalisés en vue d'analyses éventuelles.

5.2.2.2. La réception du support

La réception du support comprend :

- la vérification de la délimitation des zones à réhabiliter,
- la vérification de l'état du support et des surfaces de reprise entre couches (béton projeté (*point d'arrêt*)),
- la vérification de la mise en place du ferrailage (*point critique*),
- la vérification de la mise en place du système de traitement électrique (*point critique*).

5.2.2.3. La réception des produits

La réception des produits comprend :

- la vérification du respect des dosages (*point critique*).
- la caractérisation de l'ouvrabilité du produit.

5.2.3. Contrôle de la mise en oeuvre

Le contrôle de la mise en oeuvre comprend les points suivants :

- contrôle du respect du phasage de la réhabilitation (nombre de couches, délai d'application entre les couches, épaisseur totale) (*point critique*),
- suivi de la consommation des produits,
- contrôle d'exécution et de la qualité des produits mis en oeuvre (*point critique*),
- contrôle d'épaisseur du béton projeté, des revêtements de surface (*point critique*),
- contrôle de finition (aspect, planéité) (*point critique*),
- contrôle de cure (*point critique*),
- contrôle de l'adhérence au support (*point d'arrêt*),
- contrôle de mise en service (traitements électriques) (*point d'arrêt*).

5.2.4. Contrôle des travaux finis

Le contrôle des travaux finis est un *point d'arrêt*. Il porte sur la vérification des caractéristiques requises et de l'efficacité de la protection et/ou de la réparation.

5.3. CONTROLE EXTERIEUR DU MAITRE D'OEUVRE

Le « Contrôle extérieur » du Maître d'œuvre est un contrôle de conformité aux exigences du CCTP, en ce qui concerne :

- le matériel de fabrication,
- la réception, le transport et la mise en œuvre des matériaux et matériels,
- le personnel d'exécution et de support pour l'application des méthodes de réhabilitation.

L'entité "Contrôle extérieur" à partir du Dossier de Consultation des Entreprises (DCE), du Schéma Directeur de la Qualité (SDQ), du Plan d'Assurance Qualité (PAQ) et des procédures des divers intervenants a les tâches suivantes :

a- examiner et formuler un avis sur les propositions de l'entreprise en matière de :

- moyens et qualification en personnel, moyens en matériel de fabrication et mise en œuvre,
- consistance des études,
- matériaux,
- contenu du contrôle intérieur.

b- proposer au Maître d'œuvre un programme de contrôle extérieur, en fonction du contrôle intérieur.

c- réaliser le contrôle extérieur qui porte sur :

- la vérification du PAQ Entreprise et des sous-traitants et/ou fournisseurs,
- la validation de l'épreuve d'étude (point d'arrêt),
- la validation de l'épreuve de convenance (point d'arrêt),
- la vérification de l'application du PAQ Entreprise concernant le contrôle interne lié à l'exécution des travaux,
- le contrôle de réception du support (point d'arrêt),
- le contrôle de qualité des matériaux et matériels mis en œuvre,
- le contrôle d'adhérence au support (point d'arrêt),
- le contrôle de réception de l'ouvrage (ou de l'élément d'ouvrage) (point d'arrêt).



ANNEXES

La démarche du gestionnaire

A1 - SUR LA GESTION DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ

La démarche qui est proposée ici, est surtout celle d'un gestionnaire d'ouvrages relevant de l'État ou de collectivités territoriales (murs de soutènement, ponts...) mais elle peut être adaptée à d'autres gestionnaires qui ont à gérer d'autres parcs d'ouvrages (bâtiments, réservoirs...).

Il faut tout d'abord rappeler :

- qu'il faut s'attendre dans les années à venir à un développement des désordres dus à la corrosion car de nombreux ouvrages ont été construits à partir des années 50 et le parc des plus anciens (ceux âgés de 40 à 50 ans) présente déjà de nombreuses traces de corrosion voire des corrosions avancées (les ponts en béton armé sont très exposés aux agressions d'autant qu'un grand nombre d'entre eux sont soumis aux fondants...);
- que les désordres et défauts du matériau "béton armé" peuvent avoir plusieurs causes (gel-dégel, alcali-réaction, réaction sulfatique...) même si, la corrosion est la plus fréquente. Il est donc nécessaire d'identifier les origines des désordres avant d'envisager toute intervention sur un ouvrage;
- que les gestionnaires et les maîtres d'ouvrages souhaitent minimiser au maximum la gêne aux usagers, qu'ils ont beaucoup de mal à accepter qu'un ouvrage soit fermé pour travaux et qu'ils imposent parfois des contraintes telles que les réparations ne sont pas durables car les travaux ne peuvent être exécutés correctement.

L'expérience tirée du contrôle réglementaire des dossiers d'études de réparations élaborés par les gestionnaires montre que :

- actuellement, la gestion est du type "curatif". Il n'y a intervention qu'à partir du moment où les désordres deviennent nettement visibles et que les morceaux de béton qui se détachent mettent en jeu la sécurité des usagers et des tiers. Les réparations à effectuer sont donc lourdes et coûteuses (élimination du béton pollué et reconstitution de l'enrobage des armatures...);
- les gestionnaires maîtrisent mal "la commande du diagnostic-pronostic" indispensable pour évaluer les causes et l'importance des désordres;
- les gestionnaires maîtrisent mal "la commande et le suivi des études de réparation". En particulier, le contrôle extérieur pendant l'élaboration du projet est souvent insuffisant. La maîtrise du contrôle du projet est pourtant indispensable pour obtenir des solutions adaptées aux désordres et aux contraintes imposées au chantier et donc des réparations durables;
- les gestionnaires semblent souvent ignorer :
 - que l'on peut détecter le moment où les agents agressifs vont atteindre les armatures et amorcer la corrosion grâce aux méthodes d'investigation actuelles sous réserve d'effectuer périodiquement quelques campagnes de mesures durant la vie de l'ouvrage et surtout avant sa mise en service pour avoir "l'état de référence";
 - qu'il est possible d'intervenir pour éliminer les agents agressifs (extraction des chlorures...) ou pour "stopper" leur progression (mise en œuvre d'une protection...) et, ce le plus souvent, avec un minimum de gêne dans l'utilisation de l'ouvrage;

- que ces mesures préventives et curatives sont souvent nettement moins coûteuses voire plus durables que les réparations traditionnelles lourdes visées ci-devant ;
- qu'à budget identique, "**la démarche préventive**" permet de maintenir en état de service un plus grand nombre d'ouvrages que "**la démarche curative actuelle**".

A2 - DÉMARCHE GÉNÉRALE

Il convient de suivre la démarche développée ci-après lorsqu'un ouvrage en béton armé est dégradé par corrosion.

La méthodologie à appliquer pour déterminer la ou les techniques de réhabilitation est celle qui est décrite dans ce guide. Elle comprend les quatre phases suivantes.

1. Le diagnostic : il a pour but de déterminer la nature des désordres et, en cas de corrosion, l'origine de celle-ci et son étendue. Il permet de savoir si la corrosion est localisée ou généralisée ce qui a une très grande importance dans le choix des techniques de réparation.

2. Les exigences et les contraintes : le maître de l'ouvrage doit préciser dans "son programme" ses exigences (simple remise en état de l'ouvrage (réparation) ou remise en état avec modification de son état de service (renforcement, élargissement), en tenant compte de son état de conservation (force portante, etc.). Le maître d'œuvre devra respecter le programme à la lettre sauf impossibilité technique avérée.

Il doit aussi recenser ou faire recenser les contraintes imposées durant les travaux (maintien en service partiel ou total de l'ouvrage etc.), d'environnement (pollution, bruit, hygiène, sécurité etc. et techniques pour la mise en œuvre de la méthode de réhabilitation (conditions de température et d'hygrométrie à respecter, prise en compte des chocs et vibrations dus au trafic, aux engins de démolition et incidence sur la tenue des produits de réparation en cours d'application, détermination des matériels nécessaires pour accéder à l'ouvrage et pour effectuer les travaux etc.).

3. L'étude technico-économique : cette étude comparative concerne le choix des actions à entreprendre (fermeture définitive, réparation, remplacement, maintien en état...) avec leur incidence économique. La décision finale étant du ressort du maître de l'ouvrage.

Si cette étude aboutit à la décision d'une réhabilitation elle doit alors permettre de choisir la ou les techniques les mieux adaptées.

4. La mise au point du marché de réparation : le maître d'œuvre doit préciser les hypothèses sur l'état de l'ouvrage si cela est nécessaire (contractualisation partielle ou totale des résultats des études effectuées pendant les phases précédentes, visite contradictoire de l'ouvrage avec chacun des candidats de la consultation, état des lieux avec le candidat désigné...), les différentes contraintes imposées, les règles de sélection des offres, les variantes et les propositions techniques autorisées.

En outre, le maître d'œuvre doit indiquer quelles garanties ou responsabilités seront demandées à l'entrepreneur (par exemple, responsabilité civile en cours de travaux contre les dommages causés à l'ouvrage à réparer, à d'autres ouvrages, aux usagers et aux tiers etc.), garanties particulières de durée fixée sur certains des travaux de réparation (par exemple, revêtement de protection, inhibiteur de corrosion etc.).

Il y a lieu de rappeler qu'après réception des travaux de réparation, outre la mise en œuvre de la responsabilité contractuelle (en cas d'application défectueuse du contrat), de la garantie de parfait achèvement (article 44.1 du CCAG) ou des garanties particulières

(article 44-3 du CCAG), peuvent s'appliquer également les principes de la responsabilité décennale (article 45 du CCAG qui vise les articles 1792 et 2270 du code civil).

Les principes de la responsabilité décennale s'appliquent aux travaux de réparation (travaux neufs sur existant) mais normalement pas aux désordres que pourrait subir l'ouvrage du fait des travaux de réparation. Ces désordres relèvent de la responsabilité de droit commun (dite responsabilité délictuelle ou quasi-délictuelle visée par les articles 1382, 1383... du chapitre II du code civil dont la durée de prescription de 30 ans à compter de la réalisation du dommage ou de son aggravation a été réduite à 10 ans par la loi n°85-677 du 5 juillet 1985 se reporter à l'article 2270-1 du code civil qui vise les actions en responsabilité civile extra-contractuelle).

A ceci s'ajoute aussi la responsabilité en matière de produits défectueux visée par les articles 1386-1 à 1386-18 du code civil.

A3 - LA COMMANDE D'UN DIAGNOSTIC

La compétence technique du gestionnaire est à considérer ; deux cas se présentent :

- si le gestionnaire a les compétences techniques suffisantes, il assure lui-même la coordination des différents intervenants ;
- dans le cas contraire, il a besoin "**d'un expert" (ou d'un groupe d'experts dans les cas complexes)** qui lui apporte assistance et conseil pour coordonner les intervenants, passer les commandes et conclure.

Pour passer une commande de diagnostic, après qu'un **pré-diagnostic** ait été effectué, il convient de distinguer les cas suivants :

- **Cas d'une commande à un laboratoire** : il convient de préciser les contraintes à prendre en compte pour effectuer les relevés et les mesures (moyens d'accès, etc.), les parties à examiner, les relevés à faire, les mesures à effectuer (leur nombre et leurs emplacements), la présentation attendue pour les résultats des mesures et quelle interprétation est souhaitée. Il faut aussi préciser les délais. Il est à noter que si l'ouvrage, en plus des problèmes de corrosion, présente un problème structurel il convient de prévoir la possibilité de demander au laboratoire de participer au diagnostic en collaboration avec le bureau d'études et vice et versa.
- **Cas d'une commande à un bureau d'études** : le recours à un bureau d'études est à prévoir dans le cas de problème structurel, notamment pour un ouvrage ancien (par exemple, à cause modifications des règlements de calculs, des règles de charges etc.), ou lorsque les désordres ont des causes multiples.

Avant de passer commande d'un diagnostic, il convient par exemple :

- de rassembler les plans, les documents d'exécution (se reporter au dossier de l'ouvrage) ;
- de fournir au bureau d'étude les éléments nécessaires au recalcul (plans, notes de calculs, résultats des essais de résistance des bétons etc.) ;
- de définir les hypothèses et les règlement à prendre en compte (avec l'appui éventuel de l'expert)...

Il est à noter :

- qu'il est utile d'associer un bureau d'études et un laboratoire pendant la phase de diagnostic ;
- qu'il faut interdire que le diagnostic soit assuré par celui qui exécutera la réparation (on ne peut être juge et partie).

La démarche générale qui vient d'être décrite pour la commande d'un diagnostic se simplifie ou se diversifie dans les situations suivantes :

- en l'absence de problème structurel, le recours à un bureau d'études n'est pas indispensable ;

- dans le cas, où le pré-diagnostic est suffisamment fiable la commande de diagnostic peut être intégrée à la commande d'études ;
- dans le cas où des moyens d'accès lourds sont nécessaires, il faut prévoir que les mesures in situ nécessaires soient réalisées lors d'une inspection détaillée périodique (IDP) ce qui entraîne un gain de temps et d'argent...

A4 - LA COMMANDE DE L'ÉTUDE TECHNIQUE

L'étude technique est à lancer dès que le diagnostic a été effectué, son objectif est d'aboutir au choix d'une solution technique (démolition-reconstruction, réhabilitation etc.), sachant que la décision finale appartient au maître d'ouvrage.

Le gestionnaire, seul s'il est compétent ou assisté d'un expert, fait appel à :

- un laboratoire, s'il s'agit d'un problème de matériaux, sans conséquence structurelle (attention, aux ouvrages anciens qui, même s'ils n'ont pas de désordres apparents importants, peuvent masquer des problèmes de force portante délicats) ;
- un laboratoire et un bureau d'études, si les désordres ont (ou pourraient avoir) des conséquences structurelles (d'où l'importance des conseils de l'expert).

Cette étude technique se déroule en trois phases : la première est consacrée au choix de la solution à adopter (démolition-reconstruction, réparation...), la seconde, après la première prise de décision du maître de l'ouvrage, à l'étude détaillée de la solution de réparation (si cette dernière a été choisie) et la troisième au montage du dossier de consultation des entreprises (DCE).

Remarque : la première phase n'est pas strictement indispensable lorsque le diagnostic montre que les travaux de réparation sont possibles, seront d'un montant raisonnable et devront pouvoir rendre à l'ouvrage son "état de service et ce pour de nombreuses années.

Première phase : le choix de la solution

L'étude comparative doit permettre au maître d'ouvrage de savoir quelle solution présente le meilleur coût-efficacité à moyen et à long terme. En effet, l'expérience montre que "l'acharnement thérapeutique", sauf cas particulier, conduit à engager des réparations multiples au fur et à mesure que les années passent parce que l'ouvrage continue à se dégrader par tous les bouts ce qui aboutit à terme à des dépenses rédhibitoires !

Il faut donc faire ressortir pour chaque solution :

- ses avantages et ses inconvénients ;
- les contraintes qu'elle impose pendant la phase travaux ;
- sa durée de vie estimée (en admettant que les travaux seront bien exécutés) ;
- la durée des travaux ;
- son coût.

Deuxième phase : approfondissement de la solution retenue (est détaillé dans ce qui suit le cas d'une réparation)

Remarque : si après cette première phase, la solution de réparation est retenue, comme elle fait souvent appel à différentes techniques pour combattre la corrosion du béton armé, c'est au cours de cette seconde phase que ces différentes techniques sont à étudier en détail et à comparer.

- l'étude fournie doit comprendre la description de la réparation ou des réparations et les précautions à prendre dans toutes les phases des travaux (température et hygrométrie qui influent sur les conditions de préparation et de mise en œuvre des produits - hygiène et sécurité du personnel et des tiers car certains produits peuvent être toxiques ou inflammables...);
- les moyens à mettre en œuvre (étalement de l'ouvrage existant, moyens d'accès, matériel nécessaire à la préparation des surfaces à traiter, matériel de mise en œuvre des produits et matériaux compte tenu des conditions d'accès et de travail, dispositifs de protection adaptés aux conditions climatiques prévisibles etc.);
- la préparation de surface à effectuer ;
- les raisons du choix du type ou des types de produit retenus (nature spécifications à respecter) et leurs conditions de mise en œuvre ;
- les produits de protection à appliquer après la réparation si cela est nécessaire (c'est souvent le cas pour masquer l'effet peau de léopard) ;
- les divers contrôles (internes et extérieurs) à effectuer durant les différentes phases des travaux pour s'assurer de la bonne réalisation des travaux (nature et intensité) ;
- la durée de vie probable de la réparation ;
- le coût initial et le coût d'entretien (ne pas négliger les conditions d'enlèvement ou de recouvrement des produits),
- le suivi qui devra être effectué.

Troisième phase : le montage du dossier de consultation des entreprises (DCE)

Il convient de rendre contractuelles les conclusions de la phase précédente à partir du moment où la solution a été choisie et préciser dans les différentes pièces du marché les exigences du maître d'œuvre :

Le règlement de la consultation (RC)

- le contenu des deux premières phases du PAQ que doit fournir l'entrepreneur. Elles sont détaillées le cadre de PAQ auquel le RC doit renvoyer (la première phase a lieu lors de la remise des offres et la seconde avant la signature du marché qui "contractualise" et complète les propositions initiales) ;
- le contenu du mémoire technique réparations que doit remettre l'entrepreneur (moyens à mettre en œuvre, fiches techniques des produits, conditions de préparation et de mise en œuvre des produits, précautions à prendre...);
- les propositions techniques que doit fournir l'entrepreneur (une proposition technique n'a aucune incidence sur les quantités et les prix) et quelles sont les variantes de conception ou d'exécution autorisées (les variantes ont une incidence sur les quantités et les prix) et les compléments à apporter au CCAP et au CCTP (pour simplifier le jugement des offres prévoir que l'entrepreneur remette une proposition conforme à la solution de base et pas plus d'une variante) ;
- la nécessité de prendre en compte les exigences d'hygiène et de sécurité détaillées dans le dossier hygiène et sécurité ;
- les conditions de jugement des offres.

Le cahier des clauses administratives particulières (CCAP)

- les dispositions en matières de responsabilités et garanties auxquelles devra souscrire l'entrepreneur (responsabilité civile, garanties contractuelles...);
- le cadre du PAQ ;
- la liste des pièces constitutives du marché (cadre du PAQ...) et liste des documents contractuels (normes ¹...);
- la liste des documents d'exécution et le calendrier prévisionnel de fourniture et de visa ;
- l'équipement du laboratoire de chantier (cas des grosses réparations) ou le matériel de mesure et de contrôle nécessaire sur du chantier ;
- les dérogations éventuelles aux documents généraux.

Le cadre du plan d'assurance de la qualité (PAQ)

Première phase du PAQ (lors de la remise des offres)

- la liste des sous-traitants potentiels (références, moyens en personnel et matériel, extraits du Manuel d'Assurance Qualité (MAQ)...);
- la liste des fournisseurs potentiels (références, moyens de fabrication, fiches techniques, homologations, extraits de MAQ);
- la liste des bureaux d'études potentiels (références, organisation, équipements, qualification du personnel...);
- la liste des laboratoires chargés de certaines études et des mesures sur le chantier (références, organisation, équipements, qualification des personnels...);
- liste minimale des procédures et des documents de suivi qui devra être complétée par l'entrepreneur.

Deuxième phase du PAQ (avant la signature du marché)

- l'organigramme du chantier et la note d'organisation générale relative au contrôle de la qualité ;
- la liste des sous-traitants et fournisseurs qui doivent être choisis avant la signature du marché² ;
- le bureau d'étude et l'organigramme de l'équipe qui sera chargée des études.

¹ Attention, souvent les normes produits comportent des choix et des classes de performance. Il faut donc dans le CCTP préciser les niveaux de qualité requis et ne pas se contenter de citer la norme. Ceci impose de lire les normes avant de les viser dans une pièce de marché.

Le statut de la normalisation impose d'admettre les principes d'équivalence en ce qui concerne les normes (norme NF ou équivalent) et les certifications de produits (marque NF ou équivalent). Ne pas oublier de préciser que l'entrepreneur doit apporter les preuves de cette équivalence.

² Certains fournisseurs et sous-traitants doivent être connus avant la signature du marché (c'est le cas pour le fournisseur des produits de réparation ...).

Troisième phase du PAQ (pendant la période de préparation des travaux³)

- la mise au point finale de la note d'organisation générale ;
- l'établissement des procédures et des documents de suivi y compris les fiches de non-conformité (sauf pour les travaux prévus en fin de chantier et de faible importance) ;
- l'établissement du plan d'organisation des contrôles et du bordereau récapitulatif.

Quatrième phase du PAQ (pendant les travaux)

- la mise à jour des procédures et des documents de suivi ;
- le renseignement des fiches de suivi ;
- la gestion du plan de contrôle et du bordereau récapitulatif ;
- les conditions d'exercice du contrôle extérieur (points d'arrêt prévus et contrôles inopinés).

Cinquième phase du PAQ (après achèvement des travaux)

- le regroupement des documents qualité pour le maître d'œuvre ⁴.

Le cahier des clauses techniques particulières (CCTP)

Chapitre 1, dispositions générales et description de l'ouvrage

- la description des conditions climatiques (incidence sur les travaux et les dispositifs de protection pendant la mise en place des produits...) ;
- les exigences de durabilité (incidences sur la reconstitution de l'enrobage des armatures, la mise en place de produits de protection...) ;
- les exigences d'aspect de l'ouvrage après réparation (mise en peinture, teinte, texture...) ;
- les contraintes particulières imposées au chantier (mise sur étaieage de l'ouvrage à réparer pour assurer sa stabilité, évacuation et traitement des déchets...).

Chapitre 2, préparation et organisation du chantier

- les hypothèses de calcul à respecter dans les études ;
- l'état des lieux contradictoire au début de la période de préparation des travaux (les travaux de réparation pouvant causer des dommages à l'ouvrage existant) ;
- les documents à fournir par l'entrepreneur (dispositions générales, liste des documents sans oublier la réunion préalable de validation et de coordination du programme d'exécution des travaux, des procédures, des documents de suivi... sous la présidence du maître d'œuvre, qui fait l'objet d'un point d'arrêt) ;
- les conditions de tenue du journal de chantier et les renseignements que doit y apporter l'entrepreneur ;

³ Toujours prévoir une phase de préparation des travaux qui doit permettre de mettre au point du PAQ et de réaliser la majeure partie des études.

⁴ Attention, pour se garantir contre toute perte de données (incendie, acte de malveillance...) il est vivement recommandé d'imposer dans le CCAP la remise au maître d'œuvre d'un double (photocopie) des différents documents de suivi et ce au fur et à mesure du déroulement des travaux.

- la liste des points critiques et des points d'arrêt (prévoir d'annexer le cadre de PAQ au CCTP) ;
- les procédures d'exécution à fournir par l'entrepreneur (fixer le contenu minimal des différentes procédures. Se reporter au logiciel CAPTDCE du SETRA).

Chapitre 3, provenance, qualité et préparation des matériaux

- le tableau récapitulatif des produits et matériaux à mettre en œuvre ;
- les généralités sur la conformité aux normes et le principe de l'équivalence (pour mémoire) ;
- les produits de réparation (fixer les exigences en matière de performances, l'organisation des épreuves d'études [si besoin est par exemple, si le produit n'est pas homologué ou conforme à une norme...], les conditions de réception des produits [type de conditionnement, conditions de transport, le délai d'information préalable du maître d'œuvre des livraisons qui doit figurer au CCAP, la remise d'un double du bordereau de livraison, les prélèvements conservatoires, les essais à effectuer...]⁵, l'organisation de l'épreuve de convenance qui est un point d'arrêt [réalisation d'un béton témoin, test de préparation de surface, préparation et mise en œuvre des produits, test de réparation d'une réparation volontairement ratée, contrôles internes et extérieurs prévus...]).

Chapitre 4, exécution des travaux

- les travaux préparatoires (liste des instruments de mesure [thermomètre, hygromètre, duromètre Shore...] et récapitulation des mesures à effectuer avec leur périodicité...);
- les ouvrages provisoires imposés [étalement partiel ou total de l'ouvrage existant, moyens d'accès nécessaires pour effectuer les travaux et les contrôles, abris de protection contre les intempéries...] ⁶ ;
- les contraintes à respecter pendant l'exécution des travaux (maintien du trafic, conditions climatiques, ordre des opérations délais entre phases de réparation...);
- la mise en œuvre des produits de réparation (les exigences de résultats [texture et résistance du support, dureté et adhérence des produits...], les exigences de moyens [matériel nécessaire à l'élimination du béton souillé, des parties rouillées...], la consistance du contrôle interne sur le matériel, la préparation des surfaces, la préparation et la mise en œuvre des produits, les conditions d'intervention du contrôle extérieur [points d'arrêt et types de contrôles...];
- les conditions de stockage et d'évacuation des déchets ;
- les conditions de réception de l'ouvrage réparé (essais, mesures...) ⁷.

⁵ Prévoir d'imposer la remise au maître d'œuvre du double de la partie technique de la commande passée par l'entrepreneur aux fournisseurs dans le but d'assurer la traçabilité des produits !

⁶ Privilégier, dans la mesure du possible, les moyens d'accès fixes qui sont les plus confortables et les mieux sécurisés.

⁷ Les délais prévus par le CCAP sont souvent trop courts pour effectuer une inspection détaillée (ID). Il est possible soit de déroger au Cahier des Clauses Administratives Générales (CCAG) soit d'assortir la réception de la réserve d'exécution favorable de l'inspection détaillée



Le bordereau des prix unitaires (BPU)

Le bordereau des prix doit définir avec précision le contenu des prestations (s'inspirer des définitions des prix du fascicule 65A et du logiciel "CAPTDCE" du SETRA).

A 5 - EXÉCUTION DES TRAVAUX

Lors de l'exécution des travaux, il faut :

Nota : ne figurent ci-après que les points essentiels à la bonne exécution d'une réparation.

- veiller à bien anticiper les différents délais administratifs et les contraintes de dernière minute (intervention des lobbies au dernier moment...) ;
- essayer de lancer le marché au bon moment (par exemple, lorsque les conditions climatiques, de circulation permettent de mettre en œuvre la technique prévue. Dans le cas où c'est impossible, il faut avoir prévu dans le marché la mise en œuvre d'abris de protection) ;
- appliquer pour le jugement des offres les règles du RC de façon que la dévolution du marché aille au "mieux-disant" ⁸ ;
- prévoir aussi pour le maître d'œuvre un plan d'assurance de la qualité (PAQ) et veiller à le gérer sans retard et avec efficacité ;
- veiller tout particulièrement à ce que les travaux de purge du béton dégradé ne mettent pas en jeu la stabilité de l'ouvrage à réparer. La mise sur cintre est parfois nécessaire ;
- faire respecter le contenu des pièces du marché (sauf erreur manifeste dans les prescriptions du marché, il ne faut pas céder aux propositions de modifications en cours de travaux), gérer sans retard les problèmes techniques qui peuvent se poser (faire appel au réseau technique, faire des relevés contradictoires, remplir le journal de chantier...)... ;
- veiller à ce que l'entrepreneur gère avec efficacité et sans retard les différents documents du PAQ ;
- assurer le suivi de l'ouvrage réparé en prévoyant la remise de l'ouvrage au gestionnaire avec un procès-verbal (PV) donnant la périodicité des inspections détaillées périodiques (IDP), les dates des fins de garanties et responsabilités, la périodicité des essais de contrôle de l'efficacité des réparations (mesure de la profondeur de carbonatation, des profils des chlorures...)...

⁸ c'est ce que prévoient les textes, mais souvent les maîtres d'œuvre, faute d'avoir bien hiérarchisé les informations et documents que les entrepreneurs doivent remettre avec leur offre, retombent dans le travers du moins disant. Une certaine frilosité des décideurs est également perceptible depuis quelques années !

DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

Normes, par exemple :

NF P 18-800 à 880 produits spéciaux destinés aux réparations d'ouvrages en béton ;
NF P 18-802 produits spéciaux destinés aux réparations d'ouvrages en béton...contrôles sur chantier ;
NF P 95-101 Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Reprise du béton dégradé superficiellement – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés ;
NF P 95-102 Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Béton projeté - Spécifications relatives à la technique et aux matériaux ;
NF EN 12696 Protection cathodique de l'acier dans le béton ;

Nota : se reporter aux différents chapitres du présent guide ; aux différents guides visés par le présent texte, aux fascicules du C.C.T.G... qui donnent des listes de normes et aussi au répertoire des textes et documents techniques essentiels édité par le SETRA et remis à jour tous les ans, au Cd-rom "Noémie" qui donne les textes des normes relatives au génie civil (consulter le SETRA), aux publications de l'AFNOR...

Avertissement :

- **un marché public doit faire référence aux normes** qui doivent être visées mais seulement lorsqu'elles sont réellement applicables **aux besoins** du marché considéré. En outre, il est nécessaire de faire des choix (classe, niveau...) voire de compléter la norme par des exigences spécifiques. Il est donc indispensable de lire le contenu d'une norme avant de la viser dans un marché quelconque ;
- attention à bien respecter les principes de l'équivalence entre les normes fixés dans les décrets relatifs au statut de la normalisation. Se reporter au rappel du bas de la page 9 dans le préambule du fascicule 65 A du CCTG. Cette clause est intégrée également dans "CAPTDCE" (voir le paragraphe "logiciels" ci-après).

C.C.T.G. :

- le fascicule 65 A et son additif ;
- le fascicule 67 titre 1 étanchéité des ponts routes – support en béton de ciment ;
- le fascicule 67 titre 3 étanchéité des ouvrages souterrains – support en béton de ciment (voir en particulier les étanchéités en film mince adhérent au support à base de résines synthétiques) ;
- le fascicule 74 relatif aux réservoirs en béton ;
- le fascicule 56 protection des ouvrages métalliques contre la corrosion (à adapter)...

Nota : le chapitre 8 de l'additif au fascicule 65A relatif aux peintures sur béton et les différents chapitres du fascicule 67 titre 3 et ses annexes (CCTP type), en particulier l'annexe 5 sur les étanchéités par produits coulés ou projetés, polymérisés ou polymérisables en place, donnent des cadres de rédaction des pièces écrites qui peuvent être utilisés pour les produits de protection.

Guides :

- défauts apparents des parements de béton (LCPC 1975) ;
- mise en œuvre des plans d'assurance de la qualité (SETRA - SNCF - TP de France - SNBATI décembre 1991) (1) ;
- guide pour une démarche d'assurance qualité -- Étude de conceptions et d'exécution ouvrages de génie civil (SETRA - SNCF - SNTP - MFQ 1997) ;
- choix et applications des produits de réparation de protection des ouvrages en béton (LCPC - SETRA août 1996) ;
- protection des bétons armés (LCPC décembre 2002) ;
- méthodologie du contrôle de réparation d'ouvrages d'art - recueil des fiches techniques (consulter les laboratoires membres du réseau technique) ;
- mise en peinture des bétons de génie civil (LCPC 1999) ;
- les systèmes de peinture pour les bétons de génie civil - partie 1 : qualification - partie 2 : liste des systèmes de peinture qualifiés pour les bétons de génie civil (LCPC) ;
- guide d'utilisation du fascicule 56 (SETRA - CETE de Normandie - FIPEC - UNPVF 1989) ;
- STER 81 surfacage, étanchéité et couche de roulement et mise à jour (SETRA 1981) voir en particulier le surfacage et les plaquettes étalons ;
- sous-dossier STER 81 réfection des étanchéités et des couches de roulement des tabliers d'ouvrages d'art ;

Remarque : (1) ce guide aurait besoin d'un rafraîchissement : suppression des classes de PAQ, calendrier de fourniture des documents à revoir, remise des documents de suivi au fur et à mesure du déroulement du chantier...

Avis techniques :

étanchéité des ponts routes - avis techniques (SETRA).

Marque N F :

liste des produits spéciaux destinés aux réparations des ouvrages en béton hydraulique.

Publications :

maintenance et réparation des ponts (presse ENPC 1997).

Logiciels :

CAPTDCE logiciels de rédaction des pièces de marché (CCTP, BPU...) (consulter le SETRA).