

Solutions béton

Les solutions techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton

La **durabilité d'un ouvrage** dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, des matériaux utilisés, de sa réalisation ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance. Le béton résiste au temps qu'il fait et au temps qui passe. Mais les ouvrages en béton peuvent nécessiter des opérations de réparation ou de renforcement pour augmenter leur durée d'utilisation ou offrir de nouvelles fonctionnalités.

De nombreuses solutions techniques sont disponibles et maîtrisées, elles ont fait la preuve de leur efficacité et répondent à l'ensemble des problèmes potentiels rencontrés sur les matériaux ou sur les structures. Il convient de choisir la solution technique adaptée à la pathologie à traiter, après un diagnostic complet et précis des désordres, de leurs causes et de leurs évolutions.

Texte : Patrick Guiraud

Quelques principes clés

La réussite des travaux de réparation et de renforcement des ouvrages en béton nécessite un travail en commun d'experts et le respect de quelques principes clés de base.

→ Les gestionnaires d'ouvrages doivent développer une **démarche rigoureuse**, selon une approche d'**ingénierie de la durabilité**, en trois étapes :

- connaissance précises du patrimoine d'ouvrage ;
- diagnostic de l'état des ouvrages, évaluation des opérations de maintenance et de réparations nécessaires ;
- hiérarchisation des priorités d'entretien et programmation des opérations.

→ Les **travaux** de réparation ou de renforcement des ouvrages sont **extrêmement exigeants**.

Ils nécessitent une grande expertise au niveau :

- du diagnostic de la structure : toute réparation sans un diagnostic préalable ou issue d'un diagnostic erroné est vouée à l'échec ;
- du choix de la solution technique mise en œuvre et des produits et matériaux utilisés ;
- de l'exécution et du contrôle des travaux.

→ Le maître d'ouvrage doit définir les **objectifs à atteindre** par la réparation et les **contraintes à respecter** lors de la réalisation des travaux.

Après réparation, en liaison avec son maître d'œuvre et l'entrepreneur, il doit fixer les consignes particulières de surveillance et d'entretien de la structure.

→ Les **projets** de réparation ou de renforcement d'ouvrage **réussis** présentent les caractéristiques communes suivantes :

- un **diagnostic*** scrupuleux et précis des causes de détérioration ;
- un **choix adapté** des techniques et des produits de réparation ou de renforcement ;
- une **préparation** complète et méticuleuse **du support** ;

- une application correcte des matériaux par des **entreprises compétentes et expérimentées** ;

- un respect des **consignes de sécurité** et de santé et des **exigences environnementales** pendant la réalisation des travaux.

→ Une structure ou une partie d'ouvrage en béton ne peut être parfaitement réparée ou renforcée que si son **état** a été **parfaitement évalué** et que les causes des désordres ou des dégradations ont été clairement et précisément identifiées par des experts qualifiés.

→ La réparation ou le renforcement d'une structure ou de parties d'ouvrage en béton font appel à des **techniques** et procédures **spécifiques** qui nécessitent le recours à des entreprises spécialisées et à du personnel compétent.

→ La détermination des risques de corrosion (chlorures, carbonatation) ou d'attaques (gel, dégel, actions chimiques) que va subir l'ouvrage ou la partie d'ouvrage au cours de sa durée d'utilisation, traduite par la notion de classes d'exposition, est essentielle pour anticiper et éviter des désordres potentiels et pour choisir la technique et les produits de réparation adaptés.

→ La gestion optimale d'un patrimoine d'ouvrage et la volonté de ne pas dégrader le niveau de service imposent désormais de passer d'une logique de maintenance curative à une **logique de maintenance préventive**.

En effet, la pérennité d'une structure en béton nécessite une maintenance adaptée au cours de l'ensemble de sa durée d'utilisation.

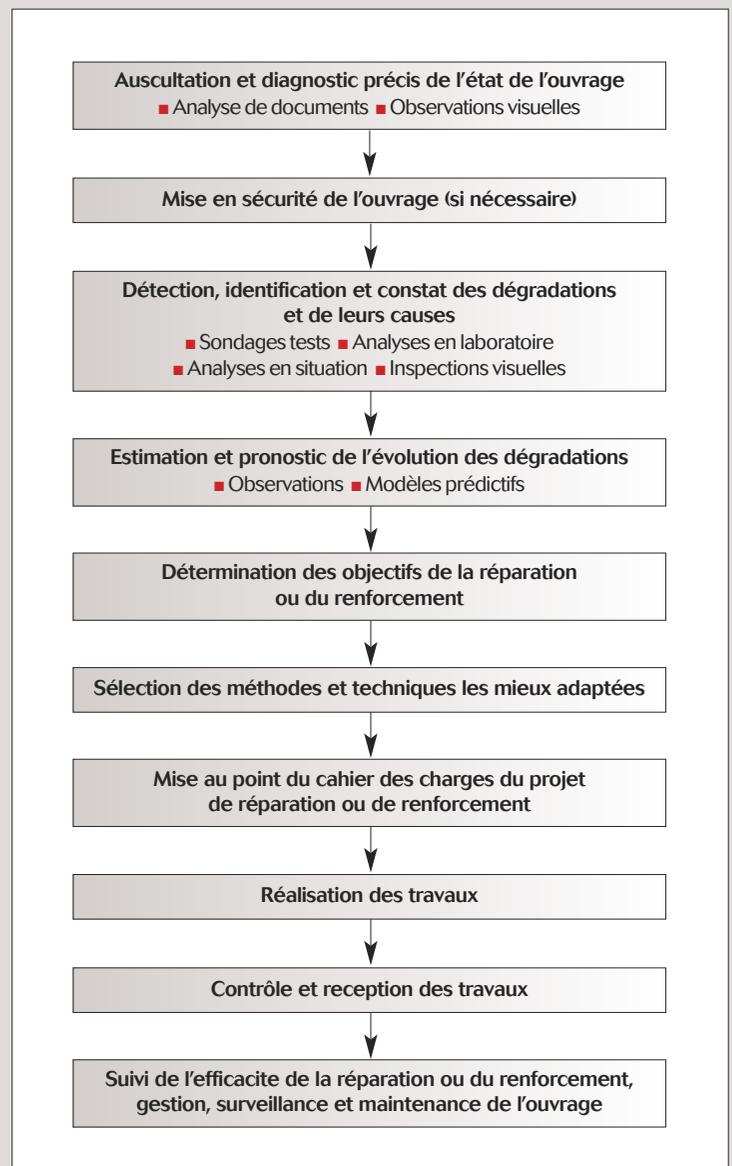
→ Le choix de la technique de réparation ou de renforcement ne peut se prendre qu'après un **diagnostic précis** de la structure et

une détermination des causes et de l'étendue des désordres. Il doit répondre à des objectifs précis préalablement définis résultant souvent d'un compromis visant à satisfaire de nombreuses exigences et contraintes : économiques, environnementales, esthétiques, d'exploitation de l'ouvrage, de gêne aux usagers... qu'il convient de hiérarchiser.

→ Il est toujours plus simple et plus économique **d'entretenir de manière préventive** les ouvrages et donc de protéger un ouvrage d'une agression, d'anticiper des risques de désordres et de pathologies que d'en traiter les conséquences. ■

* Un guide technique sur les méthodes de diagnostic des structures en béton est en cours d'élaboration (partenariat : CEFRACOR – OEILVIF – AFGC – STRRES).

Synoptique des étapes clés pour la réparation et le renforcement d'ouvrages en béton



Différentes solutions techniques de réparation et de renforcement des ouvrages en béton

Les diverses solutions techniques permettent :

- un traitement esthétique ;
- un renforcement ou une réparation non structurel ;
- un renforcement ou une réparation structurel.

		Esthétique	Non structurel	Structurel
P. 18	Réparation de désordres superficiels	X	X	
P. 18	Traitement des fissures		X	X
P. 19	Réparation et renforcement des structures par des armatures passives additionnelles		X	X
P. 19	Renforcement des structures par précontrainte additionnelle			X
P. 20	Réparation des ouvrages en béton armé dégradés par corrosion des armatures		X	X
Sous rabat	Protection des bétons par application de produits à la surface du parement	X	X	
Rabat	Béton projeté		X	
P. 22	Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites		X	X

Les guides du STRRES

Le Syndicat National des entrepreneurs spécialistes de Travaux de Réparation et de Renforcement de Structures (STRRES) met à disposition sur son site www.strres.org une collection de guides techniques (téléchargeables en ligne) qui synthétisent les règles de l'art en matière de réparation et de renforcement d'ouvrages en béton, en métal et en maçonnerie (12 guides sont disponibles sur le site du STRRES, 7 nouveaux guides le seront d'ici fin 2011). Chaque guide traite d'un domaine spécifique, relatif à la réparation des ouvrages et s'adresse systématiquement aux trois principaux acteurs : prescripteur, entrepreneur, contrôleur. Les guides sont regroupés en quatre grandes familles :

- FABEM : béton et maçonnerie ;
- FAFO : fondation ;
- FAME : métal ;
- FAEQ : équipements.

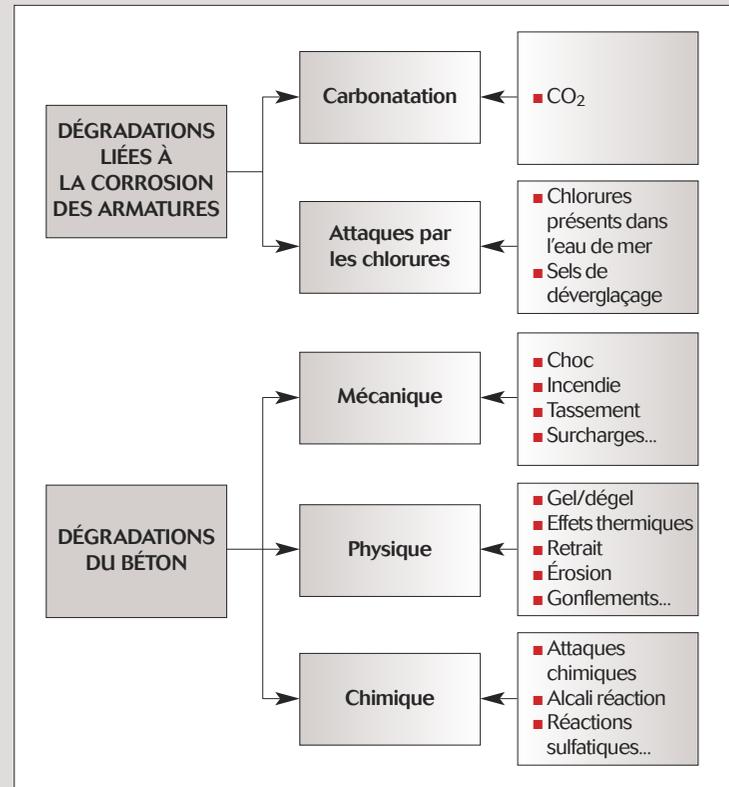
Chaque guide s'appuie sur les normes en vigueur et détaille, pour la technique

qui le concerne, les points suivants :

- les définitions des termes et des techniques ;
- les documents de référence ;
- la préparation de l'opération ;
- le choix des produits et matériaux ;
- le transport et le stockage des produits et matériaux ;
- les matériels à utiliser ;
- les modes opératoires ;
- les essais et contrôles à effectuer (épreuves de réception, d'étude, de convenue et de contrôle) ;
- les principales règles d'hygiène et de sécurité à respecter ;
- la gestion des déchets ;
- le plan d'assurance de la qualité (PAQ).

Nota : Le STRRES prépare la création d'un système de qualification des entreprises désigné sous le terme « certificat de spécialité » qui sera attribué par une commission paritaire extérieure au syndicat. Ce certificat va permettre de labéliser les acteurs de la réparation des

Principales causes de dégradations des bétons armés ou précontraints



ouvrages pour chaque famille de spécialité et offrira une assurance supplémentaire vis-à-vis de la qualité d'exécution des travaux.

Terminologie

■ **Contrôle de réception :** le but est de vérifier que les produits et matériaux livrés sont conformes et qu'ils sont transportés et stockés conformément aux exigences du marché.

■ **Épreuve de convenue :** le but est de vérifier la conformité de la mise en œuvre des matériaux et des produits de réparation ou de renforcement par l'entreprise dans les conditions de réalisation des travaux.

■ **Contrôle d'exécution :** le but est de vérifier qu'à tout instant du chantier l'exécution des travaux est conforme aux spécifications du marché, complétées par les enseignements tirés de l'épreuve de convenue. ■

Liste des guides relatifs aux ouvrages en béton

FABEM 1	Reprise des bétons dégradés
FABEM 2	Traitement des fissures par calfeutrement, pontage et protection localisée
FABEM 3	Traitement des fissures par injection
FABEM 4	Protection des bétons
FABEM 5	Béton projeté
FABEM 7	Réparation et renforcement par armatures passives additionnelles
FABEM 8	Réparation et renforcement par précontrainte additionnelle



Document de référence :
guide technique du STRRES
FABEM 1
Reprise des bétons dégradés

Réparation des désordres superficiels

Si les désordres de la partie d'ouvrage en béton sont superficiels et si les armatures ne sont pas corrodées, l'opération de réparation comprend :

- une préparation de surface avec élimination du béton dégradé et de toute trace de pollution ;
- le traitement éventuel des armatures contre les risques de corrosion ;
- la reconstitution de l'enrobage des armatures et de la géométrie de la

pièce par un ragréage manuel ou mécanisé avec du béton ou un mortier technique de réparation adapté ou par projection de béton ;

- la mise en œuvre d'un revêtement de protection ou à caractère esthétique sur les surfaces traitées.

Les produits utilisés pour la réparation des bétons dégradés sont classés en 3 catégories :

- produits et systèmes à base de

liants hydrauliques classiques ou modifiés par ajout de polymères ;

- produits et systèmes à base de résines synthétiques ;

- produits et systèmes mixtes dont le liant actif est constitué à la fois de liant hydraulique et de résines synthétiques.

Ils doivent être compatibles avec le béton de la structure et adaptés aux conditions d'environnement. ■

Traitement des fissures

Il existe 5 principales techniques de traitement des fissures. Le choix de la technique adaptée est fonction des caractéristiques de la fissuration : ouverture (microfissures, fissures fines, fissures moyennes...), profondeur, activité (fissures ouvertes, fermées, mortes, actives...), tracé, géométrie, exposition aux intempéries (fissures sèches, humides, saturées, ruisselantes...), présence d'eau libre ou sous pression... de l'état et du type de support et du délai imposé pour la remise en service de l'ouvrage.

INJECTION : elle consiste à faire pénétrer dans la fissure un produit qui va créer une continuité mécanique et/ou une étanchéité entre les parties disjointes. Elle s'applique à des fissures dont l'ouverture est au moins comprise entre 0.1 et 0.2 mm. L'injection par un produit souple permet son adaptation aux mouvements générés par les variations thermiques et hygrothermiques. L'injection par un produit rigide permet d'assurer la continuité de la matière.

CACHETAGE : il a pour but d'obturer provisoirement une fissure pendant l'injection afin de contenir le liquide injecté dans la fissure jusqu'à sa prise.

CALFEUTREMENT : il a pour objectif de colmater définitivement et en profondeur une fissure au moyen

d'un produit souple (mastic ou mortier déposé dans une engravure créée le long de la fissure) afin de rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau ou d'empêcher la pénétration de matières solides, mais sans bloquer les mouvements de la fissure.

PONTAGE : il est destiné à recouvrir une fissure au moyen d'un produit souple adhérent à la surface du support (revêtement, feuille préfabriquée...) afin de rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau ou empêcher la pénétration de matières solides en laissant libres les mouvements de la fissure.

PROTECTION GÉNÉRALISÉE : ce traitement consiste à mettre en œuvre sur la surface de la structure fissurée un revêtement qui ferme les fissures. Il est applicable lorsque la fissuration est anarchique et concerne l'ensemble du support.

Les guides **FABEM 2** et **FABEM 3** précisent les diverses recommandations pour procéder à la préparation et la réalisation de chaque technique d'injection.

Le choix des produits à utiliser est fonction de l'ouverture des fissures, de la présence éventuelle d'eau et de l'activité des fissures.

- Produits à base de liants hydrauliques avec ajouts ou modifiés par des polymères organiques.



Document de référence :
guide technique du STRRES
FABEM 2
Traitement des fissures
par calfeutrement ou pontage
et protection localisée

- Mastics à base de liants de synthèse : silicone, polyuréthane...
- Coulis à base de silicate, de polyuréthane...
- Feuilles autoadhésives ou collées.
- Résines époxydes, résines polyuréthanes...
- Gels de silice, gels en solution aqueuse...
- Joints préformés...

Les techniques de traitement de fissures comportent une étape primordiale qui est la préparation et le net-



Document de référence :
guide technique du STRRES
FABEM 3
Traitement des fissures par injection

toyage du support et des fissures : brossage, décapage thermique, aspiration, lavage à l'eau sous pression, à l'air comprimé... afin d'éliminer toute trace de laitance, de poussières, de mousses qui pourrait perturber l'efficacité de l'injection.

Différentes normes précisent les caractéristiques (mécaniques, comportement à la température, aux agents agressifs...) que doivent respecter les produits en fonction de chaque technique d'injection. ■

Réparation et renforcement des structures par des armatures passives additionnelles

Les techniques de réparation et de renforcement de structures par des armatures passives additionnelles concernent la mise en œuvre :

- d'armatures de béton armé (treillis ou cages d'armatures en acier au carbone ou en inox) ou en matériaux composites au sein de l'ouvrage après enlèvement local du béton par réalisation d'une saignée qui est ensuite rebouchée ;
- d'armatures de béton armé en métal ou en matériaux composites en surface du béton autour de la partie d'ouvrage existante et liées à celle-ci puis enrobées par un ajout de béton coulé, projeté ou contrecollé ;
- de plaques (bandes, lamelles) ou de tissus en matériaux composites collés à la surface du béton ;
- de tôles et plats collés de faibles épaisseurs (3 à 5 mm) découpées en bande de faible largeur (300 à 500 mm) et collées sur le béton par une résine époxydique (technique quasiment plus utilisée).

La réparation d'armatures passives intérieures au béton consiste à enlever le béton endommagé ou pollué et à dégager les armatures longitudinales ou transversales corrodées. Après préparation du support (nettoyage, aspiration soufflage, repiquage du béton, élimination des poussières et morceaux de béton et ragréage éventuel) et des armatures (décapage complet des armatures corrodées, par brossage métallique, repiquage, sablage, grenailage ou à l'eau sous pression, le dégagement des armatures doit se faire sur une longueur suffisante pour assurer le recouvrement des barres), les nouvelles armatures sont mises en place en respectant les dispositions constructives habituelles. Le raccordement des armatures est assuré par recouvrement, par soudure ou aboutage.

Les caractéristiques du mortier ou du béton de ré-enrobage des armatures remplacées doivent être com-

patibles avec celles du béton existant et l'agressivité de l'environnement de l'ouvrage.

Le mortier ou le béton mis en place permet de reconstituer la géométrie initiale de la partie d'ouvrage concernée et enrober les nouvelles armatures. Il est mis en œuvre manuellement ou mécaniquement dans des coffrages ou projetés, selon le volume et la géométrie de la cavité à combler. Après durcissement du mortier ou du béton, la mise en place d'un produit ou d'un système de protection est souvent nécessaire pour améliorer la durabilité de la réparation.

Nota : si l'épaisseur de la pièce n'a pas besoin d'être augmentée, les armatures de renfort peuvent être positionnées dans des encoches réalisées dans le béton de la partie d'ouvrage concernée. Un mortier ou un microbéton est ensuite mis en place dans l'encoche pour enrober les nouvelles armatures. ■



Document de référence : guide technique du STRRES

FABEM 7

Réparation et renforcement de structures par des armatures passives additionnelles

Renforcement des structures par précontrainte additionnelle

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés graissés généralement disposés à l'extérieur du béton.

La précontrainte additionnelle va introduire dans la structure des sollicitations complémentaires, qui vont compenser les défauts de dimensionnement ou de conception ou des efforts supplémentaires, que doit supporter la structure suite à des modifications des conditions de chargement ou d'utilisation.

Les nouveaux câbles ou torons doivent, en apportant de la compres-

sion, recomprimer les zones tendues, sans ajouter d'excès de contraintes dans les zones comprimées.

Cette technique permet :

- soit d'améliorer la pérennité des ouvrages ;
- soit de renforcer des ouvrages en béton (en particulier des ouvrages en béton précontraint dont les câbles présentent des problèmes de corrosion ou de ruptures de torons ou d'ancrages ou qui ont fait l'objet lors de leur dimensionnement de prise en compte de lois de fluage mal adaptées) ;
- Soit d'augmenter la capacité structurale des ouvrages (augmentation des

charges ou des trafics, modification des fonctionnalités, passage de tramways ou de convois exceptionnels).

Elle peut s'appliquer à tous types de structures existantes en béton armé ou en béton précontraint.

La précontrainte extérieure est le plus souvent constituée de câbles fixés à des bossages ancrés à la structure par des barres de précontrainte. Les câbles sont protégés par une gaine en polyéthylène injectée à la cire pétrolière.

La technique des torons graissés est beaucoup plus simple d'utilisation car elle permet la mise en tension toron par toron à l'aide de petits vérins. ■



Document de référence : guide technique du STRRES

FABEM 8

Réparation et renforcement par précontrainte additionnelle.

Protection des bétons par application de produits à la surface du parement



Document de référence

Guide technique

LCPC Décembre 2002

Protection des bétons par application de produits à la surface du parement

La protection des bétons vis-à-vis des agressions ou des attaques extérieures par application de produits à la surface du parement permet :

- soit de prolonger la durée d'utilisation d'ouvrages anciens pour lesquels les désordres par corrosion sont apparents mais qui ne présentent pas de dégradation structurelle ;
- soit de protéger de manière préventive des parties d'ouvrages neufs particulièrement exposées aux agents agressifs ou aux intempéries.

La protection permet de ralentir le vieillissement du béton ou d'arrêter l'évolution de la dégradation, empêchant la pénétration des agents agressifs sous forme liquide ou gazeuse.

DIFFÉRENTS TYPES DE PRODUITS

Les produits sont appliqués sur le béton durci. Ils sont de nature organique, minérale ou mixte à base de ciment et de résine organique.

Ils peuvent être appliqués en une ou plusieurs couches et constituent un revêtement dont l'épaisseur est inférieure à 3 mm.

La protection du béton peut être assurée par différentes familles de produits et systèmes de produits.

On distingue 5 familles :

- inhibiteurs de corrosion ;
- produits d'imprégnation : produits hydrofuges (qui constituent une barrière en surface vis-à-vis de la pénétration de l'eau) ou minéralisateurs à base de silicates, de siloxanes ou de résines acryliques.
- lasures ;
- peintures ;
- produits et systèmes de revêtement : revêtements plastiques épais, revêtements d'imperméabilisation à bases de résine acrylique.

PRÉPARATION DU SUPPORT

Le système de protection doit être appliqué sur un support possédant des caractéristiques mécaniques suffisantes et des propriétés adaptées : porosité, taux d'humidité, alcalinité, propreté, texture superficielle.

La caractérisation du support peut être réalisée par des mesures non destructives ou des analyses d'échantillons en laboratoire.

Les produits de réparation doivent être compatibles avec le support en particulier en terme de retrait, d'adhérence et de résistances mécaniques. La préparation du support revêt une importance primordiale.

Le support doit être propre, sain et avoir subi une préparation de surface permettant en particulier de restituer sa planéité, d'éliminer tous défauts géométriques, d'enlever tout élément susceptible de nuire à l'adhérence (poussières, huiles, produits de cure, microorganismes...) : brossage, ponçage, projection d'abrasif, projection d'eau sous pression. Il doit présenter une cohésion d'au moins 1 MPa en traction directe.

FONCTIONS DE LA PROTECTION

Les diverses familles de système de protection assurent une ou plusieurs des fonctions de protection suivantes :

- contre la pénétration de l'eau ;
- contre la pénétration des chlorures ;
- contre la pénétration du gaz carbonique ;
- contre les réactions de gonflement interne ;
- contre l'écaillage dû au gel.

Le choix de la méthode de protection du support impose impérativement :

- une caractérisation précise de l'état et des défauts de surface ;

- une définition claire de la fonction de protection recherchée.

Lors de l'application des produits il convient de tenir compte de l'humidité du support, des conditions climatiques et des caractéristiques d'application (temps de séchage, délais entre couches...).

La tenue de la protection dépend en dehors des caractéristiques intrinsèques du système de protection appliqué, de l'état du support, des contraintes lors de la mise en œuvre, du soin apporté à l'exécution des travaux et des contraintes liées à l'utilisation de l'ouvrage. ■

Les différents essais de diagnostic

Essais physiques non destructifs

- contrôle visuel : recherche des fissures, taches de rouille...
- essais au marteau et sondages sonores ;
- essais au phacomètre : emplacement de l'enrobage de l'armature et détermination de sa valeur ;
- cartographie du potentiel : prévision relative à l'état de l'armature ;
- mesure du courant de corrosion ;
- jauges de fissures : mesure de l'état et de la stabilité des fissures.

Essais chimiques

- analyse de la profondeur de carbonatation ;
- mesure du taux d'ions chlorures ;
- analyse au microscope : détermination de l'activité de la réaction alcali-agrégats.

Essais destructifs

- carottage permettant d'identifier la résistance du béton.

Les objectifs du diagnostic

- identification de l'origine des désordres ;
- évaluation de leur étendue dans l'espace ;
- prédiction de leur évolution probable, dans l'espace et dans le temps en cas de non intervention ;
- estimation des conséquences des désordres sur la portance et la sécurité de l'ouvrage et des personnes ;
- détection de produits nocifs éventuellement présents dans l'ouvrage : amiante, plomb...
- définition des suites à donner et des solutions de réparation ou de renforcement envisageables.

Béton projeté

Le béton projeté est un béton mis en œuvre à l'aide d'une lance, par projection sur une paroi sous l'impulsion d'un jet d'air comprimé.

La technique consiste à :

- malaxer et homogénéiser les constituants (ciment, granulats, adjuvants, fibres...) à l'état sec ou en incorporant l'eau de gâchage ;
- transporter le mélange par des canalisations avec l'aide d'une pompe ;
- projeter le matériau sur le support à revêtir grâce à un jet d'air comprimé.

Il existe deux techniques de projection : par voie sèche ou par voie mouillée. La différence entre les deux techniques est liée à la manière dont l'eau de gâchage du béton est introduite (soit lors du malaxage du béton, soit lors de l'application du béton).

PROJECTION PAR VOIE SÈCHE

Le mélange sec (granulats, ciment et éventuellement accélérateur de prise et adjuvants) est fabriqué dans un malaxeur puis propulsé par de

l'air comprimé vers la lance de projection. Cette lance est associée à une lance de projection d'eau (et éventuellement d'accélérateur de prise sous forme liquide). (Voir fig. 1).

PROJECTION PAR VOIE MOUILLÉE

Le mélange comprenant l'eau est stocké après malaxage dans une trémie. Il est ensuite pompé jusqu'à la lance de projection et projeté grâce à l'air comprimé. (Voir fig. 2).

Intérêt de la technique

La technique du béton projeté permet de réaliser des couches de béton de faible épaisseur qui épousent le support et y adhèrent parfaitement. Elle est utilisée en travaux neufs ou en réparation d'ouvrages anciens (réparations locales, confortements d'ouvrages, renforcements de structures...).

Le choix de la technique de projection est fonction :

- de l'importance du chantier. La technique par voie sèche qui offre

une grande souplesse d'utilisation est privilégiée pour des chantiers de faible importance ou nécessitant des arrêts fréquents ;

- de la nature des travaux à effectuer ;
- des cadences de réalisation souhaitées : la technique par voie humide permet des capacités de production élevées ;
- des performances mécaniques à obtenir : la technique par voie sèche permet d'obtenir des résistances élevées.

L'adjonction de fibres (dosage 35 à 50 kg/m³) offre au béton projeté des propriétés complémentaires, fonc-

tion du type de fibres : limitation des effets du retrait, amélioration des résistances mécaniques, meilleure cohésion du béton à l'état frais.

Réalisation

Les opérations de bétonnage comprennent la succession des étapes suivantes :

- préparation du support ;
- mise en place des armatures : treillis soudés, barres ;
- projection du béton par passes successives ;
- mise en œuvre d'une couche de finition éventuelle et protection par cure. ■

Info pratique

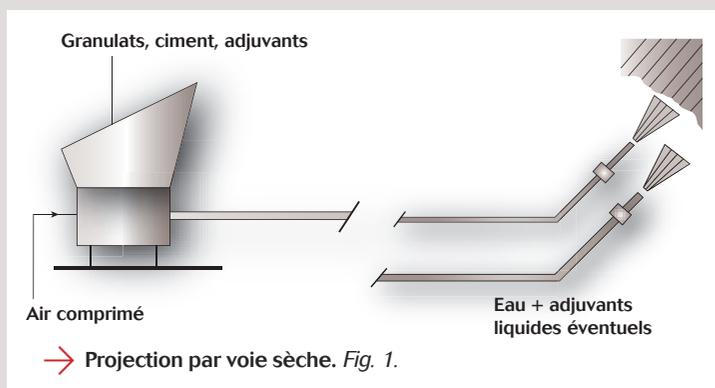
→ Fascicules de l'ASsociation pour la QUALité de la PROjection des mortiers et des bétons (ASQUAPRO) www.asquapro.com

Les fascicules ASQUAPRO sont des compléments aux normes pour tout ce qui concerne la formulation, le dimensionnement, la pratique de la projection du béton et les opérations à réaliser sur les chantiers pour le contrôle de sa qualité.

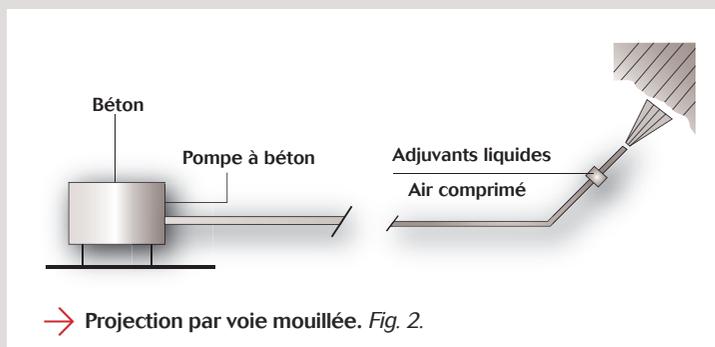
6 fascicules téléchargeables :

- Présentation
- Formulation
- Contrôle partie A
- Contrôle partie B
- État des connaissances sur le dimensionnement
- Mise en œuvre.

→ Guide technique du STRRES :
■ FABEM 5 Béton projeté.



→ Projection par voie sèche. Fig. 1.



→ Projection par voie mouillée. Fig. 2.

Principales normes

SÉRIE DE NORMES NF EN 1504

Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton-Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité.

- Partie 1 : définition.
- Partie 2 : système de protection de surface pour le béton.
- Partie 3 : réparations structurales et non structurales.
- Partie 4 : collage structural.
- Partie 5 : produits et systèmes d'injection du béton.
- Partie 6 : ancrages de barres d'acier et d'armatures.
- Partie 7 : protection contre la corrosion des armatures.
- Partie 8 : maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité.
- Partie 9 : principes généraux d'utilisation des produits et systèmes.
- Partie 10 : application sur site des produits et systèmes et contrôle de la qualité des travaux.

Réparation des ouvrages en béton armé dégradés par corrosion des armatures



Document de référence
AFGC : documents scientifiques et techniques
Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion.
 Novembre 2003

Le béton est généralement associé à des armatures (en acier au carbone), ce qui permet d'augmenter sa résistance en traction et en flexion, d'où le terme de béton armé. Dans un béton sain offrant un environnement basique les armatures sont naturellement passivées.

Les armatures proches de la surface protégées par le béton d'enrobage peuvent être soumises, au cours de la vie de l'ouvrage, à un phénomène de corrosion :

- dès que le front de carbonatation les atteint ;
- ou dès que la quantité de chlorure dans le béton d'enrobage dépasse un seuil critique.

Lorsque les armatures s'oxydent, les produits de corrosion qui se forment occupent un volume plus important ce qui déclenche une fissuration du béton, voire un éclatement et à terme une mise à nu puis une perte de section des armatures.

De nombreuses solutions de réparation du béton armé dégradé par corrosion des armatures sont dispo-

nibles. Elles permettent de réparer durablement le parement en béton et évitent de nouveaux désordres. Pour chaque ouvrage, le choix de la solution adoptée sera fonction en particulier du processus de dégradation (carbonatation, chlorure...), du niveau de propagation de la corrosion, des caractéristiques du béton et des agressions du milieu environnant. La pérennité de la réparation suppose une réalisation soignée et des contrôles réguliers tout au long de la vie de l'ouvrage.

Il existe 3 familles de techniques :

- la réparation traditionnelle : remplacement du béton carbonaté ou pollué par les chlorures et des armatures corrodées ;
- les traitements électrochimiques : protection cathodique, protection galvanique, réalcalinisation, déchloration ;
- la mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion depuis la surface du béton.

RÉPARATION TRADITIONNELLE

Cette réparation est la plus classique. Elle consiste à :

- enlever dans la zone dégradée, le béton d'enrobage non adhérent et dégager les armatures corrodées à traiter, par un moyen mécanique ou chimique. Le dégarnissage doit être effectué jusqu'à ce que l'acier sain soit mis à nu sur une longueur d'au moins 50 mm. Les armatures doivent être dégagées sur la totalité de leur circonférence.

De nombreuses techniques permettent l'enlèvement du béton dégradé : burinage, repiquage, bouchardage, décapage à l'eau à haute pression, sablage à sec ou humide, ponçage, décapage thermique, décapage chimique.

L'importance de cette préparation est fonction de la profondeur de car-

Les méthodes de réparation des bétons armés dégradés par la corrosion des armatures

RÉPARATION TRADITIONNELLE	Remplacement du béton Remplacement des armatures Protection des armatures
TRAITEMENTS ELECTROCHIMIQUES	Protection cathodique Déchloration, réalcalinisation Protection galvanique
INHIBITEURS DE CORROSION	—

Nota : Lors d'un traitement électrochimique (protection cathodique, déchloration et réalcalinisation) des ions hydroxyde (OH^-) sont générés par l'hydrolyse de l'eau autour des armatures. Le champ électrique créé provoque la migration des cations de l'anode vers l'armature et des anions dans le sens inverse.

bonatation du béton ou des profils de concentration des chlorures.

- éliminer l'intégralité des parties corrodées sur toute la surface des armatures par brossage métallique, repiquage, sablage ou grenailage et toutes poussières résiduelles ou souillures, soit par lavage à l'eau, soit par brossage, aspiration ou soufflage à l'air.

- remplacer les armatures corrodées ou mettre en place des armatures complémentaires par recouvrement, scellement ou soudure pour restituer la section d'armature initiale en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement nécessaires afin de redonner à l'ouvrage sa capacité structurelle. Les armatures peuvent recevoir une protection contre la corrosion par application sur toute leur surface d'un revêtement adapté (inhibiteur anodique, résine synthétique ...). Lorsque la partie d'ouvrage est exposée à un environnement particulièrement agressif ou si l'épaisseur d'enrobage nécessaire ne peut pas être respectée, il peut être mis en place des armatures inox de nuance adaptée.

- reconstituer le béton d'enrobage afin de retrouver la géométrie de la structure : ragréage manuel ou mécanique, béton coulé, béton projeté... Les armatures sont ainsi protégées par passivation grâce à l'alcalinité du nouveau béton d'enrobage.

La zone reconstituée qui bénéficie d'un pH élevé après mise en œuvre du nouveau béton d'enrobage devient une cathode forte au regard des bétons anciens environnants qui deviennent des zones anodiques où il y a risque de corrosion. C'est le phénomène dit d'anode induite.

TRAITEMENTS ELECTROCHIMIQUES PROTECTION CATHODIQUE

La protection cathodique à courant imposé consiste à diminuer à l'aide d'un courant électrique (2 à 20 mA/m²) le potentiel électrique de corrosion de l'armature jusqu'à une valeur seuil (potentiel de protection) pour laquelle la vitesse de corrosion de l'acier est négligeable. Cette technique permet de restaurer la passivité des armatures, elle est installée de manière définitive et donc protège la structure en permanence.

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.

Il convient de rétablir préalablement au traitement la continuité électrique des armatures et parfois de protéger la surface du béton après traitement pour éviter de nouveaux désordres. Un générateur électrique impose un courant qui circule de l'anode (pôle positif : treillis en titane ou en carbone disposé sur toute la surface de la zone à traiter et enrobé par un matériau à base de liants hydrauliques) vers l'armature (pôle négatif : cathode).

PROTECTION GALVANIQUE

Une anode active dite sacrificielle est placée sur le parement de la surface à traiter (film de zinc...) ou dans l'enrobage (pastille de zinc). Elle est connectée aux armatures. Il se crée ainsi un courant galvanique sans alimentation électrique.

L'électrolyte (eau contenue dans la capillarité du béton et dans les hydrates des pâtes de ciment) assure la bonne conductivité électrique entre l'anode et la cathode.

RÉALCALINISATION

Ce traitement électrochimique du béton consiste à introduire sous l'effet d'un courant électrique des alcalins (Na^+ ou K^+) dans la zone d'enrobage des armatures. Il va permettre de redonner une alcalinité élevée au béton qui a été carbonaté et donc stopper la corrosion des armatures. Le traitement est réalisé avec une densité de courant imposé de 0,5 à 1 A/m² et dure une à deux semaines.

Il induit une électrolyse autour des armatures qui contribue à la création d' OH^- et à la remontée du pH à des valeurs supérieures à 10.

Les étapes du traitement :

- projection d'une première couche de pâte associée à une solution électrolytique adaptée ;

- mise en place d'un treillis anodique métallique (acier ou titane) sur des baguettes isolantes fixées au parement ;
- connexion du treillis à l'anode ;
- projection d'une deuxième couche de pâte ;
- raccordements électriques au générateur de courant continu ;
- humidification régulière de la pâte par l'électrolyte ou par l'eau ;
- suivi des tensions et courants ;
- dépose de l'ensemble de l'installation.

DÉCHLORURATION

La déchloration est une technique de traitement électrochimique qui consiste à extraire les chlorures et produire des ions hydroxydes (OH^-) situés dans la zone d'enrobage qui protège les armatures, afin de freiner la propagation de la corrosion. La totalité des chlorures ne peut pas être extraite, il convient de s'assurer que la teneur résiduelle en chlorure au droit des armatures est inférieure aux valeurs limites admissibles (0,4 % du poids du ciment).

Ces traitements peuvent être réalisés :

- à l'aide d'un générateur électrique qui impose un courant continu (tension 40 V) circulant de l'anode vers l'armature. Si nécessaire la déchloration et la réalcalinisation sont effectuées l'une après l'autre ou simultanément ;
- à l'aide d'une anode active (grille d'acier ou en titane) directement reliée à l'armature. Il y a création d'un courant galvanique. Dans ce cas la réalcalinisation et la déchloration peuvent être effectués en même temps. Pour les deux procédés, une couche de pâte imbibée d'une solution électrolyte adaptée est appliquée à la surface de la zone de béton à traiter. Elle doit être humidifiée régulièrement pour permettre la circulation du courant. Ces traitements sont temporaires, leur durée d'application est de quelques semaines.



Carl Redon

→ Pont Camille de Hogues à Châtellerault (86). L'un des premiers ponts en béton armé réalisé en France 1899–1900. Ingénieur François Hennebique. Ouvrage classé parmi les Monuments Historiques. Protection par réalcalinisation, vue de l'intrados de l'arche du pont revêtu du treillis anodique.

Il convient préalablement d'assurer une continuité électrique entre les armatures.

INHIBITEURS DE CORROSION

Les inhibiteurs de corrosion sont appliqués à la surface des bétons à traiter. Ils vont migrer dans la zone d'enrobage vers les armatures assurant ainsi leur protection contre la corrosion en abaissant la vitesse de corrosion de l'acier.

L'inhibiteur est appliqué directement sur la surface du béton après préparation du support (enlèvement de la laitance, des salissures, des revêtements éventuels...) par pulvérisation sous forme liquide en plusieurs passes ou par application directe sous forme gélifiée sur la surface. Il pénètre dans le béton par capillarité. Cette technique permet de protéger les armatures de la corrosion sans avoir à purger le béton carbonaté et donc en conservant l'aspect initial du parement de l'ouvrage.

La pénétration des inhibiteurs au sein du béton dépend de nombreux paramètres dont la porosité du béton, le degré d'humidité, le niveau de carbonatation, la teneur en chlorures... La technique fonctionne sous réserve d'une teneur limitée en chlorures

dans le béton et fonctionne d'autant mieux pour les armatures faiblement enrobées.

Souvent le traitement doit être complété par la mise en œuvre d'un revêtement de protection.

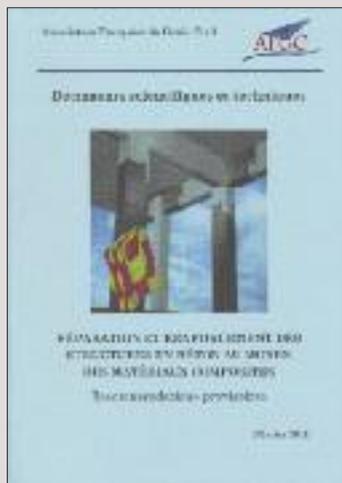
Nota : les inhibiteurs de corrosion peuvent aussi être incorporés dans le béton frais lors de la construction d'ouvrage neuf.

Ils sont plus efficaces en présence d'un phénomène de carbonatation qu'en présence de chlorures. ■



Document de référence
Cahier pratique du Moniteur
Réparation du béton.
25 mars 2011

Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites



Document de référence
AFGC : documents scientifiques et techniques
Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites
Recommandations provisoires.
 Février 2011

Les techniques de renforcement des structures au moyen de matériaux composites utilisent le collage de plats ou de plaques composites (textiles de renforcement unidirectionnels ou bidirectionnels, lamelles, fibres de carbone...) ou la stratification directe *in situ* de composites (tissus textiles en verre ou carbone) associés à des matrices polymères thermodurcissables (résines époxydes, polyester...).

Cette technique de renfort passif est une alternative innovante à la solution traditionnelle utilisant des plats métalliques extérieurs collés.

Elle permet :

- d'augmenter la résistance de structures dégradées, endommagées ou faisant l'objet de défauts de conception ou d'exécution afin de prolonger leur durée d'utilisation ;
- d'adapter la structure à des modifications de ses conditions d'exploitation ou d'accroître sa capacité portante.

Ces techniques permettent :

- l'accroissement de la résistance à l'effort tranchant ou vis-à-vis de la flexion de poutres ;
- le renforcement de structures en cas de modification des charges d'exploitation, de changement de système statique, d'insuffisance d'armatures ou de capacité portante ou de défaut d'exécution ;
- le renforcement parasismique de structures pour les adapter aux évolutions normatives ;
- l'augmentation de la résistance et de la rigidité de structures en béton ;
- le confinement de poteaux, de colonnes ou de piles ;
- le renforcement de structures lors de la création d'ouvertures ou de trémies.

La mise en œuvre de la technique nécessite une méthodologie rigoureuse, le respect de conditions climatiques adaptées (travaux à l'abri de la pluie, pas d'ensoleillement direct, température extérieure comprise entre 10 et 25° C, humidité relative limitée...), des conditions d'emploi des différents matériaux (durée d'utilisation des résines...), des critères de sécurité et de grandes précautions lors de la préparation des supports.

Des règles de dimensionnement en phase avec les normes Eurocode ont été développées et validées par des essais expérimentaux, des modélisations numériques et des retours d'expérience sur des ouvrages réparés et instrumentés.

Le guide technique AFGC précise les recommandations pour le calcul des ouvrages en béton armé, réparé ou renforcé par des matériaux composites et les conditions de mise en œuvre et de contrôle pour assurer la qualité de la réparation.

La surface du béton doit présenter une cohésion superficielle suffisante

(supérieure à 1,5 MPa) et une planéité adaptée car les caractéristiques de l'interface composite béton sont particulièrement importantes vis-à-vis de l'efficacité et de la pérennité de la réparation.

Le support béton doit faire l'objet d'une préparation précise afin de :

- créer une rugosité de surface satisfaisante ;
- rendre la surface chimiquement et physiquement propre et sèche ;
- enlever toute la laitance superficielle et toute trace de poussière, de graisse, d'huile...
- éliminer tous revêtements éventuels ;
- ne pas présenter de défauts (fissures, trous...).

Les principales techniques utilisables sont : le sablage humide ou à sec ; le lavage à l'eau sous très haute pression ; le ponçage au disque diamanté. Le choix du produit et de la solution technique à utiliser est fonction :

- des exigences de dimensionnement : contrainte de rupture, résistance en cisaillement, module d'élasticité du composite, comportement

en fatigue, vis-à-vis du fluage, sous l'effet des vibrations, des chocs, des incendies ou des séismes...

■ des exigences relatives à la mise en œuvre : conditions thermiques lors de l'encollage, durée pratique d'utilisation, géométrie de la pièce...

■ des exigences de durabilité liées aux conditions d'environnement (températures, hygrométrie, ultraviolet...), de surveillance, d'entretien et d'utilisation de la structure.

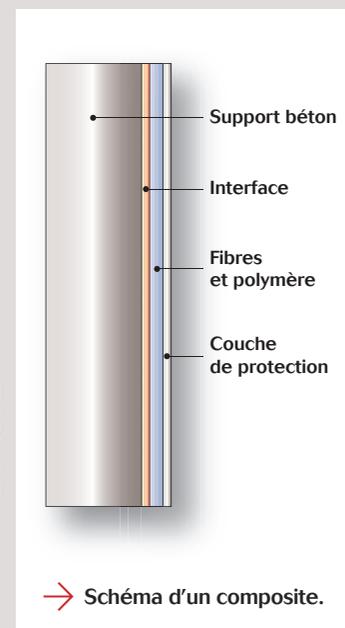
Les composites sont soit imprégnés de résine au moment de la pose, soit pré imprégnés en usine ou sur le chantier avant la pose.

Les tissus ou les lamelles sont collés au support (par simple ou double encollage) à l'aide d'un rouleau par l'intermédiaire d'une résine d'imprégnation. La réparation s'achève par l'opération de marouflage qui permet d'éliminer les bulles d'air éventuellement formées entre le support et le composite et expulser les excédents de colle. Une couche de fermeture est appliquée sur le tissu ou la lamelle une fois posée. ■



Patrick Guiraud

→ Mise en sécurité par des matériaux composites collés des pylônes en béton armé de l'ancien pont suspendu de Terenez atteint d'alcali réaction.



→ Schéma d'un composite.