

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION

ÉTABLISSEMENT RECONNU EN APPLICATION DE L'ARRÊTÉ-LOI DU 30 JANVIER 1947



Note d'information technique

RÉPARATION ET PROTECTION

DU BÉTON ARMÉ ET NON ARMÉ

DANS LES BÂTIMENTS ET EN GÉNIE CIVIL

Document de travail

Version 20 – 8 juin 2006

Table des matières

1	INTRODUCTION	5
1.1	Historique	5
1.2	Domaine d'application	6
1.3	Terminologie	6
2	DÉGRADATION DU BÉTON ET FACIES DES DÉGRADATIONS	7
2.1	Faciès des dégradations	7
2.2	Causes des dégradations	8
2.2.1	Dégradation mécanique du béton	8
2.2.2	Dégradation chimique du béton	8
2.2.3	Dégradation physique du béton	10
2.2.4	Corrosion de l'armature	12
2.3	Conséquences des dégradations	17
3	ÉVALUATION DE LA STRUCTURE	18
3.1	Préparation	19
3.2	Inspection de base	20
3.2.1	Inspection visuelle	20
3.2.2	Essais de base	25
3.3	Essais complémentaires	28
3.3.1	Examen aux ultrasons	28
3.3.2	Mesures de corrosion	28
3.3.3	Détermination de la résistance à la compression	30
3.3.4	Détermination de la masse volumique	31
3.3.5	Détermination de l'absorption d'eau	31
3.3.6	Examen pétrographique	31
3.3.7	Contrôle des armatures	32
3.3.8	Essais sur l'ensemble de la structure ou sur une de ses parties	32
3.4	Évaluation de la structure	32
4	PRINCIPES ET TECHNIQUES	33
4.1	Présentation des principes	33
4.2	Description des produits	36
4.2.1	Introduction	36
4.2.2	Mortiers de ragréage	36
4.2.3	Systèmes de protection superficielle	36
4.2.4	Matériaux de renforcement	37
4.2.5	Inhibiteurs de corrosion	37
4.2.6	Coulis d'injection	37
4.2.7	Produits de protection d'armature	37

5	SELECTION DES SYSTEMES DE REPARATION ET DE PROTECTION.....	37
5.1	Actions	37
5.2	Influences []	38
5.2.1	Le maintien ou la restauration de la sécurité	38
5.2.2	La cause et le développement des dégradations	38
5.2.3	La faisabilité technique	39
5.2.4	Les aspects économiques	39
5.2.5	La nature et l'ampleur des dégradations	39
5.2.6	Aspects liés à l'exécution	39
5.2.7	Les exigences liées à l'aspect extérieur	39
5.2.8	Le choix du donneur d'ordre	40
5.3	Sélection.....	40
6	MATERIAUX DE REPARATION	40
6.1	Mortiers	40
6.1.1	Mortiers de ragréage à base de liants hydrauliques	40
6.1.2	Mortiers de réparation à base de résines	41
6.1.3	Mortier d'égalisation	42
6.1.4	Autres couches à base de liants hydrauliques	42
6.1.5	Aperçu des critères et des propriétés des matériaux	42
6.2	Barbotine d'accrochage.....	43
6.3	Revêtement de protection des armatures.....	44
6.4	Couches de protection liquides pour le béton.....	44
6.4.1	Produits d'imprégnation hydrofuges	44
6.4.2	Produits d'imprégnation de remplissage des pores	45
6.4.3	Revêtements (enduits)	45
7	REPARATION DES DEGRADATIONS AU BETON.....	47
7.1	Introduction	47
7.2	Préparation du chantier	47
7.3	Mesures de contrôle avant et pendant l'exécution	47
7.3.1	Stabilité	47
7.3.2	Qualité de la surface	47
7.3.3	Corrosion de l'armature	48
7.4	Description des travaux.....	48
7.4.1	Enlèvement du béton non-adhérent ou altéré (réhabilitation)	48
7.4.2	Dégagement de l'armature	49
7.4.3	Préparation de la surface	51
7.4.4	Préparation de l'armature	52
7.4.5	Pose du mortier de réparation	53
7.4.6	Cure.....	57
7.4.7	Egalisation	58
7.4.8	Application d'un revêtement de protection	58
7.5	Possibilités de contrôle.....	58

8	TECHNIQUES SPECIALES.....	60
8.1	Techniques électrochimiques anticorrosion	60
8.1.1	Généralités	60
8.1.2	Protection cathodique.....	63
8.1.3	Extraction des chlorures.....	65
8.1.4	Réalcalinisation.....	66
8.2	Lutte contre la corrosion par des inhibiteurs.....	67
8.2.1	Domaine d'application.....	67
8.2.2	Limitations.....	67
8.2.3	Matériaux.....	68
8.3	Injection de fissures	68
8.3.1	Domaine d'application.....	68
8.3.2	Coulis d'injection.....	69
8.3.3	Exécution.....	70
8.4	Renforcement structurel	70
8.4.1	Domaine d'application.....	70
8.4.2	Armature complémentaire.....	71
8.4.3	Postcontrainte extérieure.....	71
8.4.4	Armature collée.....	71
9	MESURAGE DES REPARATIONS DE BETON.....	72
9.1	Descriptif pour cahier des charges selon FEREB [56].....	73
9.2	Descriptif pour cahier des charges selon le LIN [57].....	74
9.3	Descriptif pour cahier des charges selon le MET [58].....	74
10	CERTIFICATION	75
11	CONTÔLE ET ENTRETIEN APRÈS UNE RÉPARATION DE BÉTON.....	76
12	ANDERE LITERATUUR.....	77
13	REFERENCES	78

1 INTRODUCTION

1.1 HISTORIQUE

Après l'explosion de l'utilisation du béton dans les années 60, une augmentation des structures en béton à réparer a été constatée vingt ans plus tard. Le marché des réparations du béton est donc toujours en expansion.

Initialement la réparation du béton était considérée comme une solution à un problème esthétique que n'importe qui pouvait traiter. Les connaissances des causes de dégradation ont progressé. Parallèlement, on a pris conscience qu'une réparation correcte du béton exigeait une connaissance approfondie du matériau béton et des méthodes de traitement disponibles. C'est surtout depuis la fin des années 80 que l'on voit fleurir une littérature professionnelle spécialisée. Pour n'en citer que quelques exemples: les CEB Bulletins d'information, les rapports CUR, le Cours/Conférence 55 du CSTC et la circulaire 576-b-5 [1, 9, 14, 39].

Depuis le milieu des années 90, on constate l'apparition de plusieurs documents normatifs. Les premiers guides d'agrément de l'UBA^{tc} sont publiés en Belgique. Cette série comporte depuis lors une bonne trentaine de documents qui traitent de tous les aspects de la réparation du béton, depuis les mortiers de ragréage et les revêtements jusqu'aux techniques spéciales telles que la protection cathodique. Une prénorme européenne a également été publiée à ce sujet en 1997: la norme ENV 1504-9 [2] qui décrit les différents principes de réparation et qui a été adoptée en 1998 par l'IBN à titre de norme belge. Cette prénorme européenne est la première d'une série de 10 qui couvre toutes les facettes de la réparation du béton. Depuis lors, quelques parties ont déjà été publiées à titre de norme belge (Tableau 1). D'autres parties de la série viendront la compléter très prochainement au niveau européen et plus tard au niveau belge.

Numéro	Année publ.	Titre
NBN EN 1504-1	2005	Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 1: Définitions
NBN EN 1504-2	2005	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 2: Systèmes de protection de surface pour béton
EN 1504-3	-	Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 3: Structural and non-structural repair = EN 1504-3:2005
NBN EN 1504-4	2005	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 4: Collage structurel
NBN EN 1504-5	2005	Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, exigences, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 5: Produits et systèmes d'injection du béton

prEN 1504-6	-	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 6: Ancrages
prEN 1504-7	-	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 7: Moyens préventifs contre la corrosion de l'armature
NBN EN 1504-8	2005	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 8: Contrôle qualité et évaluation de conformité
NBN ENV 1504-9	1997	Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 9: Principes généraux pour l'utilisation de produits et de systèmes
NBN EN 1504-10	2004	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 10: Application sur site des produits et systèmes et contrôle de la qualité des travaux

Tableau 1: Normes et prénormes européennes déjà publiées et non publiées concernant la réparation du béton

Au niveau belge, des recommandations ou des prescriptions sont également en cours d'élaboration pour la certification des réparateurs du béton. Dès que les prescriptions seront d'application, les exécutants sur chantier de même que les concepteurs devront démontrer leur compétence d'une manière ou d'une autre.

C'est pour traduire toutes ces normes, prescriptions et recommandations, qui ont déjà été mises sur le marché ou doivent encore l'être, sous une forme spécifique pour le marché belge des réparateurs du béton, que le CSTC a pris l'initiative, avec l'accord du Comité technique Gros œuvre, de rédiger la présente Note d'information technique.

1.2 DOMAINE D'APPLICATION

La présente Note d'information technique s'applique à la réparation et à la protection du béton armé et non armé. La réparation du béton cellulaire et des maçonneries en béton ne rentre pas dans le domaine d'application de cette NIT, de même que la réparation esthétique d'éléments en béton décoratif endommagés lors de la pose. La réparation de la précontrainte dans les structures en béton précontraint et la réparation des dégradations du béton causées par le feu ne relèvent également pas du domaine d'application de cette NIT.

1.3 TERMINOLOGIE

C'est la terminologie des ENV, prENV et autres documents normatifs qui doit servir de base pour cette liste. La liste reprend également les termes qui ont donné lieu à des débats au sein du groupe de travail pendant les discussions du document.

revêtement: couche de peinture (« coating »)

micro mortier: mortier de réparation avec des granulats fins à appliquer en couches minces

D_{\max} : diamètre maximal des granulats; est donné par l'ouverture de tamis pour lequel le refus maximal est de 2 % ($D_{\max} \leq 2$ mm), 5 % (D_{\max} de 4 mm) au 10 % ($D_{\max} \geq 8$ mm)

Sondage (à marteau):

teneur en chlorures du béton

2 DÉGRADATION DU BÉTON ET FACIÈS DES DÉGRADATIONS

D'après la NBN ENV 1504-9 [2], toute protection ou réparation de structures en béton exige une préparation approfondie. La même norme décrit les principaux éléments d'un processus de réparation comme suit:

- l'évaluation de l'état dans lequel se trouve la structure;
- l'identification des causes de la dégradation;
- la détermination des objectifs de la réparation ou de la protection;
- le choix de la méthode;
- l'établissement des exigences auxquelles les produits ou les systèmes doivent satisfaire;
- l'établissement des exigences d'entretien propres à la protection ou à la réparation choisie.

Pour mener bien les deux premiers éléments du processus de réparation, il faut donc savoir sous quelle forme les dégradations du béton peuvent survenir, quelles en sont les causes et comment les identifier.

2.1 FACIÈS DES DÉGRADATIONS

La dégradation du béton peut s'exprimer de différentes manières. Les fissures peuvent être rectilignes ou avoir un parcours aléatoire. L'ouverture des fissures peut également varier. Dans de nombreux cas, la forme de la fissure, son ouverture et l'endroit où elle apparaît suffisent déjà à un inspecteur expérimenté pour exclure plusieurs causes de dégradation.

Les fissures qui s'accompagnent de déformations inacceptables de la structure peuvent être dues à un problème structurel. En cas de doute concernant les propriétés de la structure ou d'un de ses éléments, il est recommandé de procéder à une étude de stabilité.

Au droit des fissures, le béton peut se gonfler sous l'effet de réactions expansives. Dans certains cas, ce phénomène entraîne, après un certain temps, le détachement de morceaux de béton.

D'autres indicateurs, souvent négligés, de l'apparition d'une dégradation sont des décolorations et une rugosité locales de la surface, des taches d'humidité et des traces de rouille.

On a souvent à faire à des processus de vieillissement interne du béton armé, non encore visibles mais qu'il est possible de localiser en sondant la surface du béton.

2.2 CAUSES DES DÉGRADATIONS

Les dégradations des structures en béton peuvent être subdivisées en deux groupes principaux, à savoir les dégradations du béton proprement dit et les dégradations du béton dues à la corrosion de l'armature. On peut les représenter schématiquement comme ci-dessous (Figure 1).

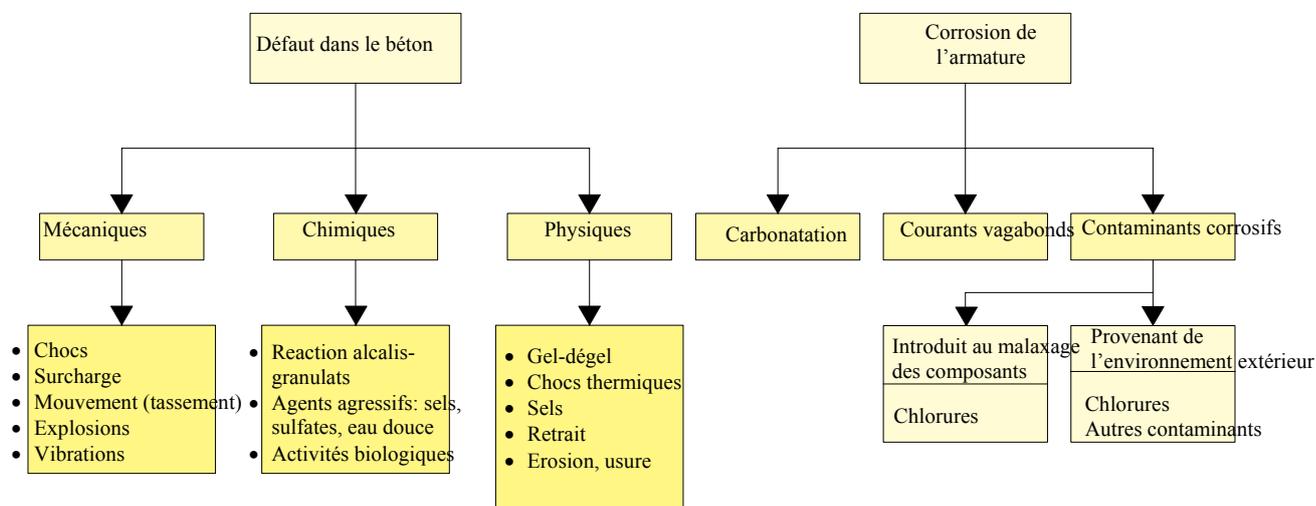


Figure 1: Récapitulatif des causes de dégradations selon NBN ENV 1504-9 [2]

2.2.1 Dégradation mécanique du béton

La dégradation mécanique du béton s'exprime généralement par l'apparition de fissures, éventuellement accompagnées d'une déformation inacceptable.

Des contraintes très brèves, comme un impact ou des explosions, peuvent provoquer le détachement de gros ou de petits morceaux de béton. Dans ce cas, le lien entre la dégradation et sa cause est généralement évident. Avant de procéder à la réparation, il faut toutefois vérifier s'il ne faut pas traiter d'autres mécanismes de dégradation actifs pendant les travaux.

Les dégradations résultant d'une surcharge limitée permanente ou du tassement des points d'appui s'expriment plus lentement. Le fluage du béton joue un grand rôle dans ce processus. Outre une inspection in situ, une étude de stabilité est nécessaire pour évaluer l'effet d'une surcharge éventuelle.

Bien que les vibrations constituent souvent une source de mécontentement pour les utilisateurs d'une structure, elles donnent rarement lieu à une véritable dégradation. En cas de doute, on peut mener une campagne de mesures basée sur la norme DIN 4150 [3].

2.2.2 Dégradation chimique du béton

2.2.2.1 Réaction alcalis-granulats (RAG)

La réaction alcalis-granulats (RAG) est une réaction entre les alcalis du béton (provenant essentiellement du ciment, des additions, des adjuvants,...) et les granulats dits potentiellement réactifs, c'est-à-dire sensibles aux alcalis [4]. Les granulats potentiellement réactifs contiennent des silices réactives (acide siliceux) sous la forme d'opale, de calcédoine,

de cristobalite, de tridymite et de quartz cryptocristallin. C'est la raison pour laquelle on parle aussi de réaction alcalis-silices.

La réaction donne lieu à des produits expansifs dont un gel alcalis-silices ayant la capacité d'attirer l'eau et donc de gonfler. Ceci provoque des contraintes internes de traction dans le béton qui aboutissent finalement à une fissuration du béton et dans certains cas la rupture de l'armature.

Pour avoir une réaction alcalis-granulats, il faut que les conditions suivantes soient remplies:

- Les granulats doivent être potentiellement réactifs. La réaction se produit seulement si la teneur en constituants réactifs se situe à l'intérieur d'un domaine critique (pessimum). Il existe en effet des limites inférieure et supérieure qui dépendent de la composition minéralogique.
- Le béton doit être en permanence ou périodiquement humide.
- La teneur en alcalis du béton doit dépasser un certain seuil.

Dans le béton non armé, la RAG se manifeste par un faciès de fissuration plutôt aléatoire (craquelé, voir Figure 2). Dans le béton armé et le béton précontraint, l'armature empêche la libre dilatation du béton dans le sens des barres d'armature. Le tracé des fissures correspond parfois, dans ces cas, à l'armature sous-jacente. On risque alors d'assigner à tort la responsabilité de la dégradation à la corrosion, en l'absence d'examen supplémentaire. Dans certains cas, on constate que le béton prend une teinte ocre. On constate aussi que les lichens et les mousses disparaissent le long des fissures.



Figure 2: Photo de dégradation par la RAG

2.2.2.2 Substances agressives

Etant un matériau basique, le béton est attaqué par les acides. Les acides réagissent avec les composés à base de calcium du ciment durci: l'hydroxyde de calcium, les silicates et aluminates de calcium hydratés. La réaction mène à la formation de sels de calcium de l'acide attaquant ainsi que de la silice. Les granulats calcaires sont aussi attaqués par les acides.

La vitesse de dégradation dépend des éléments suivants:

- Le degré d'acidité de la solution acide. Un pH entre 6,5 et 5,5 est considéré comme faiblement agressif, un pH entre 5,5 et 4,5 comme moyennement agressif et un pH entre 4,5 et 4 comme fort agressif [5].
- Le fait que la solution soit stagnante ou ruisselante.
- La solubilité du sel formé.
- La porosité du béton.

On retrouve des acides entre autres dans l'industrie chimique, le secteur agricole et dans les égouts. Les sels agressifs (comme les sels d'ammonium et de magnésium) décomposent aussi le ciment durci. Ces deux sels se trouvent dans certains engrais. Les sels d'ammonium peuvent être également présents dans les eaux industrielles usées.

2.2.2.3 *Attaques par les sulfates*

Les sulfates peuvent réagir dans le béton pour former de l'ettringite (sel de Candlot). Cette cristallisation s'accompagne d'une expansion très importante ($\approx 300\%$). Cette formation d'ettringite peut se présenter durant la phase plastique du béton (ettringite "primaire") et dans le béton durci (ettringite "secondaire"). Seule la formation d'ettringite secondaire est nuisible pour le béton. Les contraintes internes causées par l'expansion entraînent une fissuration et la dégradation de la structure.

Les sulfates peuvent provoquer une diminution de la résistance du béton en décalcifiant les composants primaires de la prise dans le ciment durci (C-S-H).

L'environnement (terre, eau) constitue généralement la source principale des sulfates. Un échauffement excessif du béton peut également donner lieu à la formation d'ettringite, en l'absence de source extérieure de sulfates. Ceci peut se produire lorsqu'un traitement thermique est appliqué (en vue d'accélérer le développement de la résistance en compression du béton), ou lors du dégagement de la chaleur d'hydratation dans le béton de masse. C'est pourquoi la température maximale du béton durcissant est limitée jusque environ $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6].

2.2.2.4 *Attaque biologique*

Le béton peut être attaqué par des actions naturelles. Le principal phénomène est celui de l'attaque par l'acide sulfurique biogène (BZA), laquelle se produit surtout dans les égouts et les systèmes d'évacuation. Les eaux usées contiennent des liaisons soufrées provenant des processus de décomposition. Quand une eau usée s'écoule lentement ou qu'elle stagne pendant une période prolongée, il peut se créer un milieu anaérobie dans lequel des bactéries produisant du sulfate convertissent les liaisons soufrées en hydrogène sulfuré. Ce gaz se libère dans l'atmosphère plus riche en oxygène de l'égout, où il est converti en soufre élémentaire qui se dépose sur les parois du tuyau. Le soufre élémentaire y est converti en acide sulfurique par des bactéries aérobies qui oxydent le soufre. L'acide sulfurique transforme ensuite la pierre de ciment entre autres en gypse, et le béton perd sa cohésion.

Les mousses ne sont pas seulement inacceptables du point de vue esthétique: elles peuvent également dégrader le béton par sécrétion d'acides [7].

2.2.3 **Dégradation physique du béton**

2.2.3.1 *Gel-dégel*

Le bétonnage du béton en période de froid peut, si l'on ne prend pas de mesures, ou des mesures insuffisantes, donner lieu à des dégâts du gel. L'eau présente dans le béton frais va se dilater sous l'effet du gel. Sur un béton encore plastique, ce gonflement n'est pas entravé, ce qui conduit à un béton de mauvaise qualité. Sur un béton jeune déjà durci, le gonflement est entravé et des tensions internes se créent. Si le béton jeune n'a pas encore développé une résistance suffisante, les dégâts du gel se manifesteront par l'écaillage de la surface du béton, généralement sur plusieurs couches. On considère généralement que le béton peut résister à ces tensions dès qu'il possède une résistance en compression supérieure à 5 N/mm^2 . On admet que c'est le cas quand une température supérieure à 5°C est maintenue sur la surface la plus exposée pendant les 72 premières heures suivant la mise en oeuvre [6].

Le béton durci peut, lui aussi, être endommagé par le gel. En effet, l'eau présente dans les pores et les fissures se dilate en cas de gel. Il se crée ainsi dans le béton des tensions qui peuvent provoquer des fissures. La sensibilité au gel du béton durci est déterminée dans une large mesure par sa structure poreuse et les dimensions de ses fissures. Le danger de dégâts du gel est plus

important pour les sols et autres surfaces horizontales que pour les surfaces verticales, car le degré de saturation des pores est plus élevé à ces endroits.

2.2.3.2 Sels de déverglaçage

La réaction des sels de déverglaçage pour faire fondre la glace est une réaction endothermique, ce qui signifie que de la chaleur du milieu environnant est prise lors de la réaction. La chaleur nécessaire provient de la couche superficielle du béton. La température y chute brutalement et la couche en question subit un choc thermique. De plus, dans le cas de période prolongée de chutes de neige et d'utilisation répétée de sels, il y a un risque que la couche superficielle du béton soit saturée en eau, ce qui augmente le risque de dégradation dû au gel.

Il ne faut pas oublier non plus que les ions chlore des sels de déverglaçage peuvent également constituer un danger pour l'armature. On reviendra sur ce point lors de la discussion des dégradations dues à la corrosion.



Figure 3: Dégradation due au sels de déverglaçage

2.2.3.3 Action thermique

Des différences de température peuvent être présentes dans un élément en béton. Elles peuvent être causées par la chaleur d'hydratation du béton frais, par l'enlèvement prématuré des coffrages ou par un réchauffement différentiel des surfaces du béton durci (par le soleil ou une autre source de chaleur). Les différences de dilatation thermique provoquent des tensions de traction auxquelles le béton oppose une résistance très limitée, et qui entraînent une fissuration.

2.2.3.4 Retrait[8]

Le retrait (la diminution de volume du béton) du béton peut avoir différentes origines. On distingue entre autres le retrait plastique, le retrait endogène et le retrait de séchage. Le retrait n'est pas un problème en soi. Mais il peut être empêché par son support ou par le fait qu'il n'est pas homogène, ce qui peut conduire à la fissuration du béton. Le retrait peut survenir à différents stades du durcissement du béton et dépend dans une large mesure de la composition du béton.

Pendant la phase plastique, le béton se rétracte surtout du fait de la perte d'eau non liée. Ce retrait dénommé retrait plastique est important dans les compositions de béton à facteur E/C élevé. Les paramètres influençant ce retrait sont l'ensoleillement, le vent ou un coffrage absorbant ou perméable à l'eau. Les fissures ainsi provoquées sont de grandes dimensions et ont généralement un parcours erratique.

Le béton se rétracte en durcissant (hydratation) car les produits de réaction (ciment non hydraté et eau) occupent moins de volume que le résultat. Ce retrait dénommé retrait endogène est proportionnellement important dans les compositions de béton à faible facteur E/C.

Enfin, un retrait dit de séchage survient pendant la suite du durcissement du béton; il peut durer quelques mois et provoque une lente augmentation de la largeur des fissures.

2.2.3.5 Érosion et usure

Il existe différents mécanismes qui causent l'érosion de la surface du béton.

L'usure est surtout provoquée par un mouvement mécanique à la surface du béton, par exemple les pneus de voiture sur une route, les piétons sur le trottoir, l'impact ou le glissement

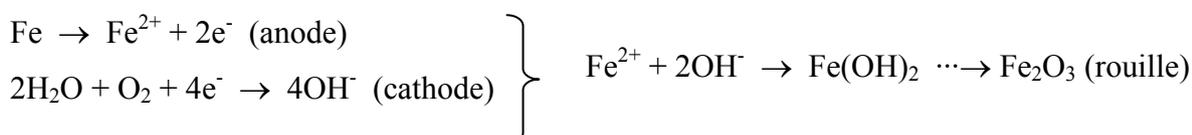
de matériaux en vrac déballés... mais aussi par le frottement de particules plus lourdes (p. ex: du sable) présentes dans l'eau ou le vent contre la surface du béton. L'érosion croît avec la vitesse, la rugosité, la dureté et la taille des particules abrasives.

Un autre mécanisme est dû à l'écoulement d'eau sur une surface plane. La moindre aspérité dans la paroi perturbe le parallélisme de l'écoulement de l'eau. L'écoulement s'écarte de la surface, créant par endroits une très basse pression. Quand cette pression est inférieure à la pression de vapeur de l'eau, des bulles d'air se forment et implosent en se déplaçant vers une zone où la pression est plus élevée. Cette 'implosion' provoque des ondes d'impact et de pression qui endommagent la paroi en béton quand le processus a lieu à proximité de cette dernière. Ce processus s'appelle cavitation. Il y a cavitation quand l'eau heurte une paroi à grande vitesse.

2.2.4 Corrosion de l'armature

2.2.4.1 Le processus de corrosion (généralités)

La corrosion est un processus chimique complexe. En simplifiant, on peut dire que les atomes d'oxygène et de fer réagissent en présence d'eau pour former de la rouille.



L'hydroxyde de fer (Fe(OH)_2) est un produit intermédiaire. Il y a, dans le béton, plusieurs ions qui peuvent être concernés par la formation du produit final qui est la rouille. Différents produits de corrosion peuvent se former ainsi.

Un courant circule entre l'anode (l'endroit où le fer entre en solution) et la cathode (l'endroit où l'oxygène est transformé). Les électrons se déplacent dans l'acier de l'anode (potentiel bas) vers la cathode (potentiel haut). Dans le milieu aqueux (eau dans les pores du béton) les hydroxydes se déplacent de la cathode vers l'anode. Les ions de fer et les hydroxydes se rencontrent et interagissent (Figure 4).

Le volume occupé par la rouille est plusieurs fois supérieur à celui occupé par l'acier, ce qui conduit à la fissuration voire à l'éclatement du béton. La corrosion entraîne également une diminution de la section des barres et par conséquent une diminution de la capacité portante de la structure en béton armé.

La Figure 4 représente de manière simplifiée l'ensemble du processus de corrosion de l'armature dans le béton.

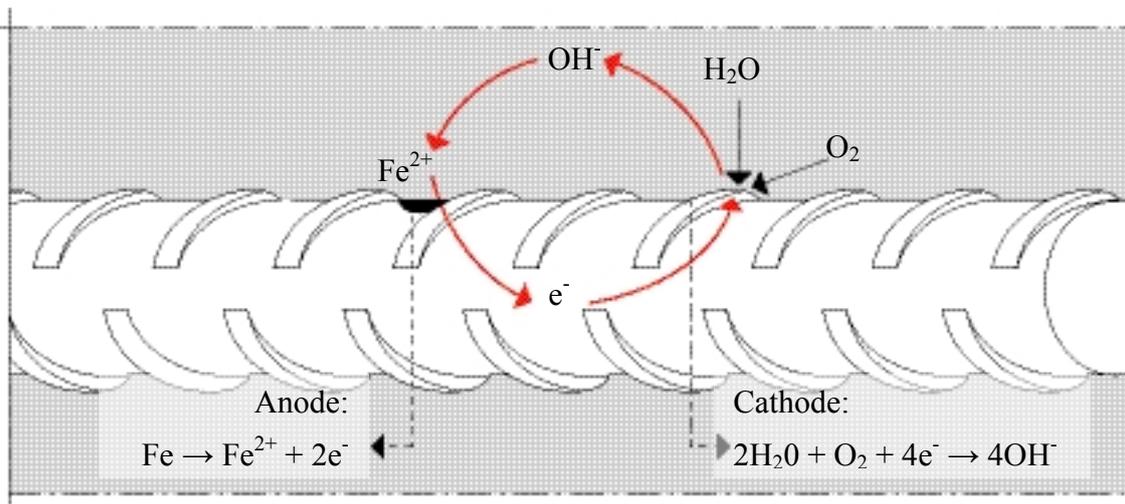
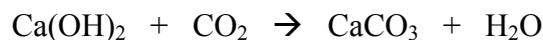


Figure 4: Schéma du processus de corrosion

La corrosion des armatures du béton peut être initiée par la carbonatation du béton, par les chlorures ou encore par des courants vagabonds. Ces différentes origines sont expliquées ci-dessous.

2.2.4.2 Corrosion de l'armature initiée par la carbonatation

Le béton jeune possède un pH élevé. Dans un tel environnement, une couche de passivation se forme autour de la barre d'armature. Il s'agit d'une couche d'hydroxydes de fer qui protège l'acier contre la rouille. Du fait de la réaction du CO_2 de l'air avec la chaux libre du béton, le pH baisse d'environ 13 à moins de 9. Cette réaction, appelée carbonatation, est représentée de façon simplifiée comme suit:



Le front de carbonatation, c.-à-d. la ligne de démarcation entre le béton carbonaté et non carbonaté, évolue régulièrement dans le béton. Pour la plupart des types de béton, la formation de carbonate de calcium (CaCO_3) représente une amélioration de la densité de la structure et une légère augmentation de la résistance en compression. Mais pour l'armature cela signifie, une fois que le front de carbonatation a atteint l'armature, la fin de la protection contre la corrosion par le béton. Dans ces conditions, la couche de passivation ne va plus être stable et n'empêchera plus la corrosion des armatures.

On constate généralement que la corrosion initiée par carbonatation attaque l'armature de manière plus ou moins régulière sur de grandes longueurs (corrosion généralisée).

La vitesse à laquelle le front de carbonatation évolue dans le béton (vitesse de carbonatation) est propre à la composition du béton et aux conditions climatiques. La réaction de carbonatation ne peut avoir lieu que dans un milieu aqueux, tandis que la diffusion de CO_2 à travers le béton est 10000 fois plus rapide dans du béton sec (air dans les pores) que dans du béton humide (où les pores sont remplis d'eau). C'est donc dans un béton alternativement sec et humide, mais le plus souvent sec, que la vitesse de carbonatation est la plus élevée. On peut observer une plus grande profondeur de carbonatation au droit des fissures et aux arêtes.

La vitesse de carbonatation dans le béton diminue avec le temps. En effet, le CO_2 doit pénétrer toujours plus profondément dans le béton, et les pores sont en outre rétrécis par le dépôt de calcaire. On peut calculer approximativement la profondeur de carbonatation à l'aide de la formule suivante:

$$D = k\sqrt{t}$$

Où $\left\{ \begin{array}{l} D = \text{profondeur de carbonatation (mm)} \\ k = \text{coefficient de carbonatation, fonction de la qualité du béton et de l'exposition} \left(\frac{\text{mm}}{\sqrt{\text{an}}} \right) \\ t : \text{âge du béton (an)} \end{array} \right.$

La détermination de la profondeur et du coefficient de carbonatation est détaillée au § 3.2.2.4.

2.2.4.3 Corrosion de l'armature due aux courants vagabonds

Comme nous l'avons déjà expliqué au § 2.2.4.1, la corrosion est un processus électrochimique. Beaucoup de courants vagabonds sont présents dans le sol à proximité des centrales à haute tension, des transformateurs ou des lignes de tram et de chemin de fer. Ces courants peuvent donc pénétrer dans le béton jusqu'à l'armature. Ils perturbent donc l'équilibre électrochimique dans les barres d'armature et peuvent créer des zones d'anode supplémentaires où la corrosion peut se former.

2.2.4.4 Corrosion de l'armature initiée par les chlorures

Malgré la protection contre la corrosion apportée par le pH élevé du béton, une corrosion peut survenir dans un béton non carbonaté, en présence d'une quantité excessive de chlorures corrosifs à l'intérieur du béton. Ces chlorures peuvent avoir été ajoutés au moment du malaxage du béton à titre d'accélérateurs de prise ou être présents dans les composants du béton (entre autres le sable ou l'eau). Des chlorures peuvent aussi pénétrer dans le béton au fil du temps. On le constate surtout sur des structures le long de la côte ou sur du béton exposé à des sels de déneigement.

Ces chlorures peuvent briser la couche de passivation qui enrobe l'armature et donner lieu à des foyers de corrosion très locaux. Cette forme de corrosion, aussi appelée corrosion par piqûres ("pitting"), est dangereuse parce qu'elle peut faire diminuer rapidement localement la section de l'armature (Figure 5). Il se forme également moins de produit de corrosion si bien que l'on n'observe souvent pas l'effet "avertisseur" d'un enrobage de béton qui éclate et/ou se fissure. De plus, après la réaction de corrosion les ions chlore se libèrent dans le béton et peuvent de nouveau réagir.



Figure 5: Corrosion par piqûres causé par chlorures

L'armature perd sa couche protectrice suite à la carbonatation. Il va de soi qu'il faut moins de chlorures pour provoquer une corrosion dans un béton carbonaté que dans un béton non carbonaté. En outre, il semble que, dans un béton non carbonaté, une partie des chlorures ajoutés au mélange frais ont été liés chimiquement et ne participeront donc pas à la corrosion. Cette liaison chimique semble toutefois disparaître sous l'effet de la carbonatation du béton, si bien qu'à ce moment, tant la carbonatation que les chlorures peuvent favoriser conjointement la corrosion.

Le Tableau 2 et le Tableau 3 reprennent plusieurs teneurs en chlorures critiques par rapport à la masse de ciment pour un béton non carbonaté [9], respectivement pour les chlorures ajoutés pendant la fabrication du béton et pour les chlorures infiltrés. Bien évidemment, les valeurs mentionnées dans ce tableau ne portent que sur la teneur en chlorures par rapport à la masse de ciment au droit de l'armature. D'après certaines sources, les valeurs limites sont plus

élevées, selon d'autres, elles sont plus basses. On admet en général qu'une teneur en chlorures par rapport à la masse de ciment située entre 0,3 et 0,5 % implique, dans la plupart des cas, un risque limité de corrosion. La norme NBN EN 206-1 :2001 [5] reprend une classification des bétons à partir de leur teneurs maximales en chlorures (Tableau 4).

% Cl ajoutés par rapport à la masse de ciment	% Cl ajoutés par rapport à la masse de béton	Danger de corrosion
< 0,6	< 0,075	faible
0,6 - 1,0	0,075 – 0,125	moyen
> 1,0	> 0,125	élevé

Tableau 2: Teneurs critiques en chlorures par rapport à la masse de ciment pour un béton couramment utilisé non carbonaté [9], pour des chlorures ajoutés

% Cl infiltrés par rapport à la masse de ciment	% Cl infiltrés par rapport à la masse de béton	Danger de corrosion
< 0,4	< 0,05	faible
0,4 - 1,0	0,05 – 0,125	moyen
> 1,0	> 0,125	élevé

Tableau 3: Teneurs critiques en chlorures par rapport à la masse de ciment pour un béton couramment utilisé non carbonaté [9], pour des chlorures infiltrés

Utilisation du béton	Classe de chlorures	Teneur maximale en Cl ⁻ rapportée à la masse de ciment
Ne contenant ni armatures en acier ni pièces métalliques noyées (à l'exception des pièces de levage résistant à la corrosion)	Cl 1,0	1,0 %
Contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées	Cl 0,20	0,20 %
	Cl 0,40	0,40 %
Contenant des armatures de précontrainte en acier	Cl 0,10	0,10 %
	Cl 0,20	0,20 %

Tableau 4: Teneur maximale en chlorures par rapport à la masse de ciment [5]

En fait, les teneurs en chlorures devraient être exprimées par le rapport entre le nombre d'ions chlorures ([Cl⁻]) et le nombre d'ions hydroxydes ([OH⁻]). La détermination des hydroxydes n'est pas aisée, c'est la raison pour laquelle les valeurs sont exprimées par rapport à la masse de ciment. Toutefois, si le béton se carbonate, le pH diminue (et le rapport [Cl⁻]/[OH⁻] augmente à même teneur en Cl⁻) tandis que la masse de ciment (et la teneur en chlorures par rapport à la masse de ciment) reste inchangée.

Le schéma ci-dessous (Figure 6) cherche à donner une idée du risque de corrosion, et tient compte non seulement de la teneur en chlorures par rapport à la masse de ciment mais aussi de l'environnement et de l'état du béton. Il ressort clairement de cette figure que la teneur critique en chlorures par rapport à la masse de ciment est moins élevée dans le béton carbonaté que dans le béton non carbonaté.

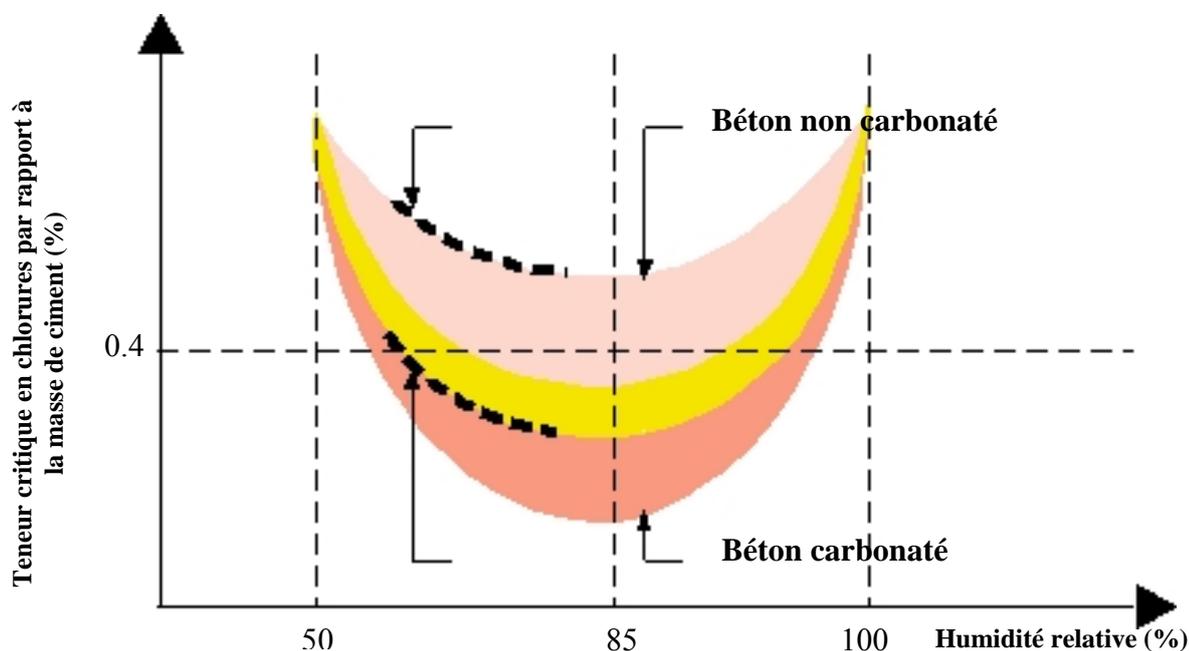


Figure 6: Teneur critique en chlorures par rapport à la masse de ciment en fonction de facteurs environnementaux [10]

Par souci d'exhaustivité, il convient de remarquer que la teneur critique en chlorures par rapport à la masse de ciment est plus basse pour les structures précontraintes que pour les structures en béton armé normal.

2.2.4.5 Corrosion de réparation

Cette forme de corrosion peut apparaître après l'exécution de travaux de réparation sur le béton. Suite à la réparation à l'aide d'un mortier à base de liants hydrauliques, le potentiel de l'armature dans la zone réparée est passé d'une valeur basse à une valeur haute. (Figure 7). Si il existe des zones qui jouaient le rôle de cathode moyenne avant la réparation, elles peuvent, après la réparation, se transformer en zones extrêmement anodiques. Il est possible que ces endroits continuent à se corroder de manière accélérée en raison de la différence de potentiel entre ces deux zones.

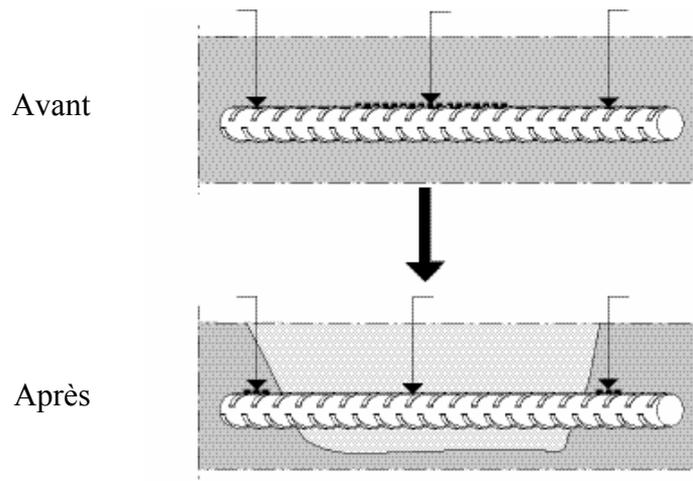


Figure 7: Le principe de la corrosion de réparation

2.3 CONSEQUENCES DES DÉGRADATIONS

Il faudra proposer une réparation appropriée en fonction du stade d'avancement de la dégradation au moment où cette dernière a été constatée. Lorsqu'on constate la dégradation à un stade précoce (petites fissures et/ou taches de rouille), les anomalies sont souvent interprétées à tort comme étant de nature esthétique. Pourtant, à ce stade, une réparation et une protection simples et peu coûteuses (p. ex. à l'aide d'un revêtement) peuvent suffire (I-IV, Figure 8). À un stade plus avancé de la dégradation (détachement de béton), il peut y avoir un risque croissant pour les passants ou pour la stabilité de la structure, et la réparation à effectuer devient plus difficile et plus coûteuse (courbe verte, Figure 8). En cas d'interventions encore plus tardives (attaque profonde des armatures ou déformations importantes), la seule solution possible ou acceptable peut consister à remplacer des parties voire l'ensemble de la structure.

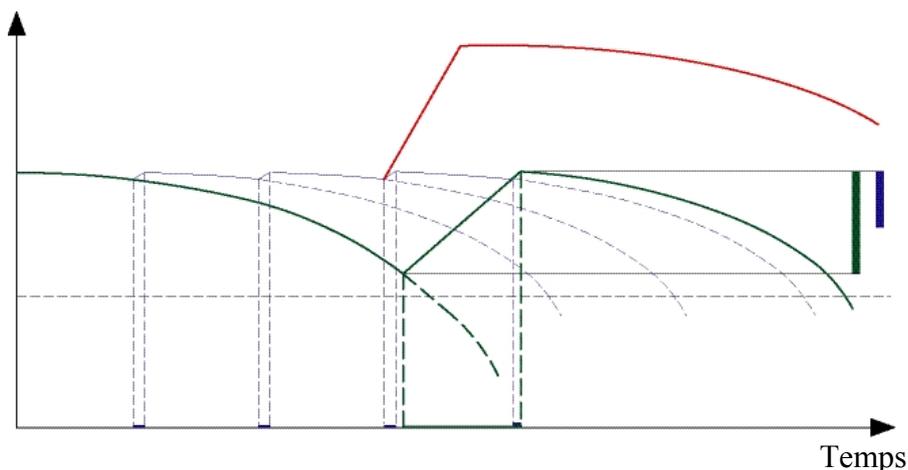


Figure 8: Schéma des coûts entretien – réparation

3 ÉVALUATION DE LA STRUCTURE

La prénorme NBN ENV 1504-9 [2] stipule que le choix de la procédure de réparation doit être basé sur une étude préalable. Cette étude implique une évaluation de l'état de la structure en béton et comprend les opérations suivantes:

- préparation,
- inspection de base,
- essais complémentaires,
- évaluation des résultats et estimation de l'état.

Les critères appliqués pour l'estimation de l'état dans lequel se trouve le béton diffèrent d'un cas à l'autre (nature de la structure, exposition, âge, etc.). Il n'est donc pas possible d'établir une liste d'essais à effectuer systématiquement.

Cette évaluation doit permettre, en fin de compte:

- d'estimer l'ampleur de la dégradation,
- de déterminer correctement les causes de dégradation,
- de proposer la méthode de réparation ou de protection la plus appropriée.

Le programme d'évaluation complet est représenté schématiquement sur l'organigramme de la figure suivante [11, 12].

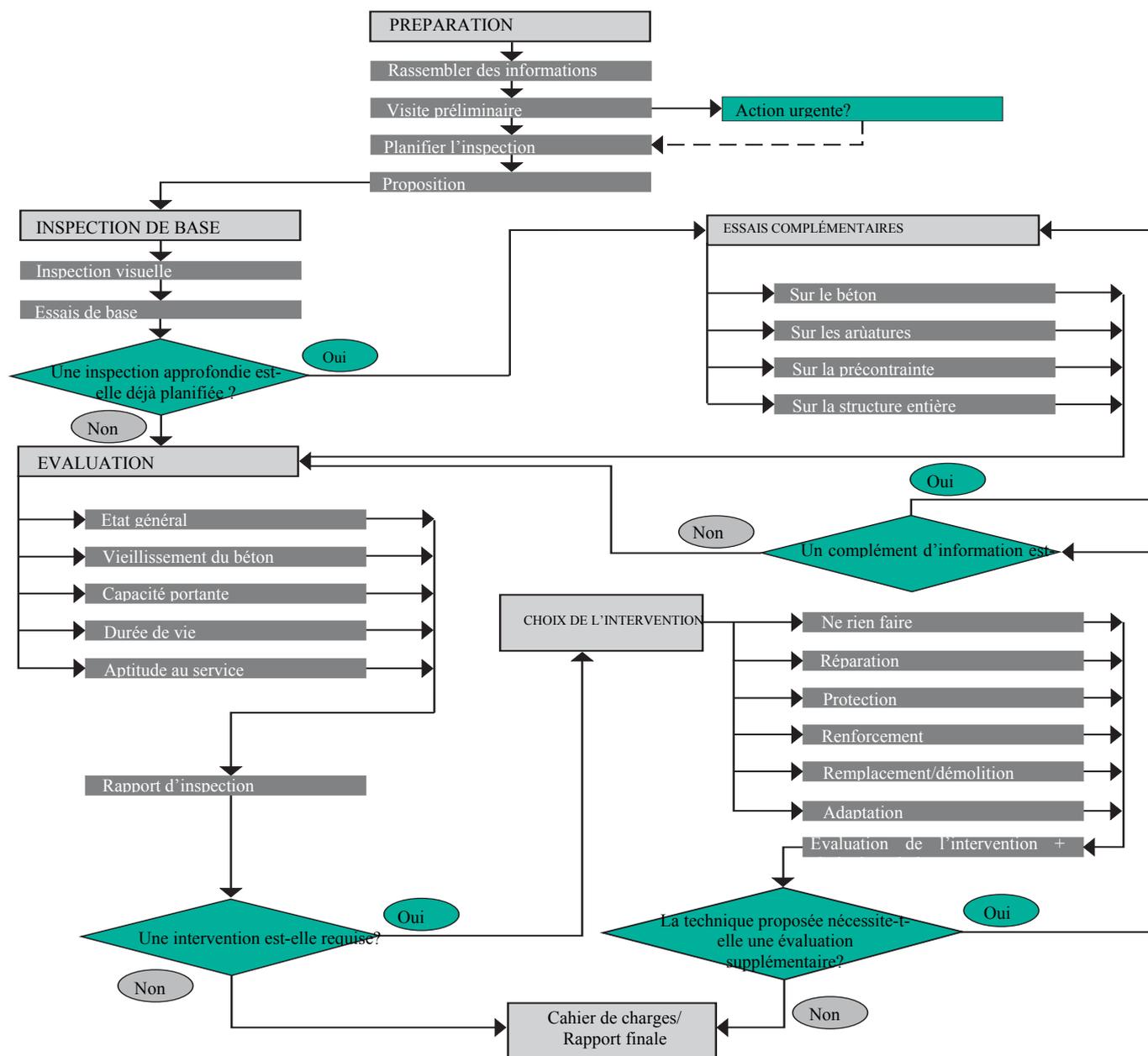


Figure 9: Flow-chart pour l'évaluation d'une structure [11]

3.1 PRÉPARATION

Le paragraphe 4.3 de la NBN ENV 1504-9 [2] stipule qu'un programme d'évaluation doit au minimum prendre en compte les données suivantes:

- l'état actuel de la structure en béton, y compris les dégradations non apparentes et possibles;
- le projet initial;
- l'environnement, y compris l'exposition aux pollutions;
- les conditions qui ont présidé à la construction (y compris les conditions climatologiques);

- l'historique de la structure;
- les conditions d'utilisation (p. ex. les charges...);
- les exigences auxquelles doit satisfaire la structure, compte tenu de son utilisation future et de sa durée d'utilisation.

Il faut rechercher une partie des informations requises auprès du maître de l'ouvrage ou du propriétaire. Mais il n'est pas évident d'obtenir des informations suffisantes dans le cas de bâtiments plus anciens, surtout quand ils ont changé de propriétaire. Il faut alors recueillir les données relatives aux conditions d'utilisation, aux expositions et à l'historique de la structure en consultant des sources officielles, comme le cadastre, et en interrogeant les utilisateurs ou les voisins.

Si l'on ne dispose pas de plans, après avoir mesuré la structure suspecte, il faudra prévoir une vaste campagne de mesures complémentaires afin de connaître l'emplacement et les dimensions de l'armature.

Il est conseillé d'effectuer une première visite pour évaluer la situation dans laquelle les travaux d'inspection de la structure pourront se dérouler. On peut en profiter pour effectuer éventuellement quelques constatations et des préparatifs qui permettront d'accélérer la suite de l'inspection.

3.2 INSPECTION DE BASE

L'inspection de base comprend une inspection visuelle de la structure, complétée par quelques essais de base qui peuvent être réalisés sur place. Dans la plupart des cas, on peut déjà tirer certaines conclusions après cette inspection.

3.2.1 Inspection visuelle

La première phase des travaux d'inspection sur place consiste en une inspection visuelle de la structure. Si certaines parties sont soustraites à la vue par des bardages, des panneaux, des conduites voire de la végétation, il faut vérifier si une évaluation complète est possible sans éliminer ces obstacles. Des accessoires techniques, comme un endoscope ou une caméra, peuvent parfois offrir une solution dans ce cas.

L'inspection visuelle a pour but:

- d'identifier les expositions qui peuvent entraîner des dégradations;
- de dresser l'inventaire des anomalies observables visuellement, comme les décolorations, l'érosion, les fissures, les déformations, le béton détaché, la corrosion, etc.;
- d'évaluer l'ampleur des zones dégradées;
- de sélectionner les essais à réaliser en fonction des constatations;
- de choisir les zones où il faudra effectuer les mesures complémentaires, également en fonction des anomalies constatées. Pour obtenir une image complète de la situation, il est conseillé de reprendre dans le programme d'essais aussi bien des zones avec anomalies que des zones sans anomalies.

L'inspection visuelle constitue la phase principale de l'étude préliminaire, puisque c'est d'elle que dépendent tous les essais et mesures à réaliser ensuite. En effet, la justesse de la décision

finale est déterminée en grande partie par les premières hypothèses formulées après une inspection visuelle.

Une inspection visuelle de la surface du béton implique que cette surface soit suffisamment visible. Les coffrages perdus, les couches d'enduit ou de peinture, ou les autres revêtements qui soustraient la surface du béton au regard, rendent une inspection visuelle quasiment impossible. En pareil cas, les essais et mesures complémentaires doivent permettre d'établir un tableau général de l'ensemble de la surface du béton. Si l'inspection ne s'inscrit pas dans un programme d'inspection planifié, mais constitue effectivement la première phase d'un programme de réparation, il est conseillé de la débiter en enlevant les éventuels panneaux de façade (éventuellement déjà détachés en partie). Mais cette opération doit s'effectuer en présence d'un expert car une personne incompétente pourrait influencer le faciès des dégradations voire le faire disparaître entièrement.

Au cours de l'inspection visuelle, l'attention devra être attirée par:

- l'aspect de la surface;
- les changements de teinte de la surface, comme les traces de rouille;
- la présence de fissures et l'aspect du tracé des fissures;
- la dégradation de la peau du béton;
- l'écaillage et le détachement des plaques de béton;
- l'armature à nu.

Ces symptômes seront discutés de manière plus approfondie aux chapitres suivants. Mais il faut tenir compte du fait qu'ils ne sont généralement pas les seuls. De même qu'il est toujours difficile d'attribuer l'apparition de dégradations à une cause unique, il est rarement réaliste, lorsqu'on évalue de plus près l'état de la surface du béton, de ne tenir compte que d'un seul symptôme de dégradation observable à l'œil nu.

Les résultats de l'inspection visuelle doivent être intégrés avec précision dans le rapport d'inspection. Pour limiter au maximum les ambiguïtés ou une interprétation erronée des observations, il est préférable de récapituler les résultats dans un dessin étayé par des documents photographiques et éventuellement complété par des photos infrarouges. Le rapport des observations pourra ainsi servir aussi lors de l'établissement d'un éventuel programme d'entretien ou de réparation.

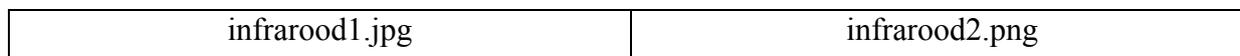


Figure 10: Thermographie infrarouge

3.2.1.1 L'aspect de la surface

La cause des dégradations est souvent due à une finition non conforme de la surface du béton. Des concentrations de bulles d'air à la surface du béton ont le même effet qu'une diminution locale de l'enrobage de béton. De même, il semble souvent y avoir des nids de gravier ou des joints de reprise aux endroits où une dégradation s'est d'abord produite (généralement à la suite d'une corrosion de l'armature).

Moins visibles sont les endroits où une réparation locale réalisée immédiatement après le décoffrage camoufle les imperfections de la surface du béton. Ces endroits sont eux aussi souvent une cause de dégradation ultérieure, surtout si la réparation n'a été effectuée qu'en surface.

Il arrive aussi que l'on remarque, lors d'une mission d'inspection, des restants d'armature, des fils de ligature ou des écarteurs sur des structures en béton réalisées avec moins de soin.

3.2.1.2 Les changements de teinte de la surface

Les taches et les changements de teinte peuvent être causées par des souillures superficielles, mais elles peuvent aussi avoir d'autres causes. En tout cas, il faut les considérer avec l'attention nécessaire.

Un premier changement de teinte du béton peut survenir aux endroits où la teneur en eau est plus élevée dans le béton. Un exemple typique est l'apparition de petites fissures qui se dessinent après humidification du béton. Ce changement de teinte peut être la conséquence d'une pénétration d'eau dans le béton par la face inspectée. Dans ce cas, elle disparaît après une période sèche. Si ce changement de teinte reste apparent, il peut s'agir d'infiltrations d'eau qui diffusent à travers du béton et qui s'évaporent à la surface. Dans certains cas, des dépôts calcaires se forment alors à la surface du béton. Les taches d'humidité peuvent aussi donner lieu, à long terme, à la formation de mousses. Ces taches peuvent être une cause de corrosion, l'eau nécessaire étant disponible en abondance. L'accumulation d'humidité a également une influence sur un traitement ultérieur. Elle ne permettra pas l'adhérence d'une couche de protection insuffisamment perméable à la vapeur.

Un deuxième type de taches souvent inquiétant sont les traces de rouille allongées que l'on retrouve souvent sur les plafonds. Ce peut être le dessin de l'armature qui s'est imprimé sur le coffrage entre le moment de la pose de l'armature et le bétonnage. Ce problème n'est souvent que de nature esthétique, mais il est conseillé de vérifier l'emplacement exact de l'armature. Si celui-ci correspond parfaitement avec le dessin, il faut contrôler l'activité de corrosion de ces armatures.

Des traces de rouille de petites dimensions peuvent être dues à des petits fils de ligature restés dans le coffrage ou à de longs bouts de fil de ligature qui arrivent jusqu'à la surface du béton. Les granulats ferrugineux peuvent également causer des traces de rouille localisées. Dans ces cas, il faut toujours contrôler si les traces de rouille ne s'étendent pas jusqu'à l'armature.

Face à des traces de rouille locales, il faut aussi envisager une corrosion de l'armature proprement dite par des chlorures (par piqûres). En pareil cas, la tache de rouille s'accompagne souvent d'une fissuration.

Dans tous les cas, les taches de rouille doivent être considérées comme suspectes et nécessitent une attention supplémentaire.



Figure 11: Traces de rouille en bas d'un escalier

3.2.1.3 La présence de fissures et l'aspect du tracé des fissures

L'évaluation des fissures dans le béton est loin d'être simple. En premier lieu, il faut bien tenir compte du fait que le béton armé se fissure toujours. Mais ces fissures doivent rester limitées. Une armature convenable doit donc répartir sur toute la surface les fissures internes du béton, sous la forme de toute une série de microfissures.

On estime souvent que des fissures inférieures à 0,3 mm ne compromettent pas la durabilité du béton armé [13]. S'il n'existe qu'un faible risque de corrosion dû à la carbonatation du béton (par exemple à l'intérieur des bâtiments ou en cas d'un béton immergé en continu), une ouverture de fissure de 0,4 mm peut être tolérée. Mais ces mêmes fissures peuvent être toutefois inacceptables dans d'autres situations (p. ex. dans les structures étanches à l'eau).

Les fissures peuvent se présenter de nombreuses façons différentes dans le béton, selon leur origine. Dans certains cas, de fines craquelures se répandent sur une grande surface; dans d'autres cas, la fissuration se concentre en une seule grande crevasse.

Certaines fissures résultent de négligences pendant l'exécution (dessiccation prématurée de la surface, retrait précoce...) et restent stables après leur apparition. D'autres surviennent après plusieurs années seulement mais continuent à évoluer par la suite (réaction alcali-silice, fissures de dilatation...).

Dans le cadre de l'analyse des fissures, un schéma (forme, largeur, direction des fissures) combiné avec leur emplacement et éventuellement complété par le moment où elles ont été constatées pour la première fois, donne souvent une bonne indication de leur cause. La Figure 12 présente quelques schémas de fissuration très fréquents [14]:

- A, B et C: fissures de tassement plastique;
- D, E et F: fissures de retrait plastique;
- G et H: fissures résultant d'un retrait thermique dans le béton jeune;
- I: fissures dues au retrait de séchage à long terme;
- J et K: craquelures dues à un retrait de séchage différentiel;
- L et M: fissures dues à la corrosion de l'armature.

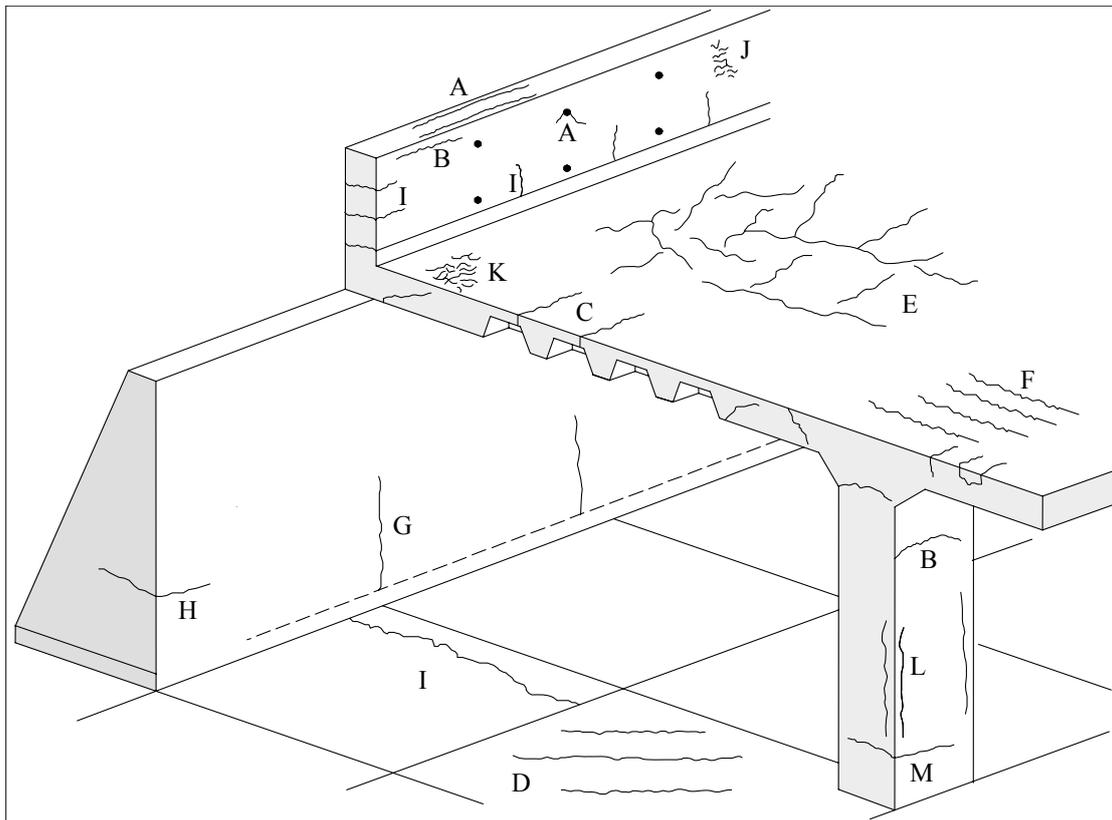


Figure 12: Schéma de fissuration très fréquent dans le béton [14]

3.2.1.4 L'écaillage de béton

La peau de ciment peut être endommagée par une attaque chimique (l'eau douce,...) ou physique (érosion, trafic, action gel-dégel,...).

Le résultat de ces actions est une surface rugueuse sur laquelle la saleté (parfois agressive du point de vue chimique) se dépose plus facilement. Une telle surface est aussi plus difficile à nettoyer. Dans beaucoup de cas, c'est une première indication que le béton non protégé ne résistera pas à l'environnement auquel il est exposé. Cela peut conduire à des dégradations plus importantes (comme dans § 3.2.1.5).

3.2.1.5 Détachement d'épaufrures de béton

La dégradation apparente du béton, comme son effritement et son détachement, est souvent le premier indice d'un comportement anormal. Les dégradations suite à un accident nécessitent une réparation rapide.

Cependant le choix du procédé de réparation le plus approprié est moins évident si la dégradation se situe à un endroit peu ou non visible et où que la cause directe du dégradation n'a pas pu être déterminée. Une action prolongée d'acides, de gel, d'érosion, d'usure, de RGI ou la corrosion de l'armature peuvent être la cause de dégradations du béton. Il est donc nécessaire de procéder à un examen plus approfondi de la cause exacte de la dégradation.

3.2.1.6 L'armature à nu

Dans la plupart des cas, la dégradation du béton s'exprime par des armatures à nu rouillées. La rouille de l'armature va de pair avec une augmentation de volume qui provoque des fissures et repousse l'enrobage de béton.

Mais on ne peut pas exclure que l'armature a commencé à rouiller juste après la fissuration du béton, en raison du contact avec l'air.

Il est inutile d'expliquer que, dans de tels cas, il faut avant tout vérifier pourquoi l'armature s'est mise à rouiller. C'est uniquement en étudiant ces raisons que l'on peut réaliser une réparation durable.

3.2.2 Essais de base

Plusieurs essais peuvent compléter l'inspection visuelle. Il est évident que les résultats de l'inspection visuelle sont déterminants pour le choix des endroits qui devront être examinés de plus près ainsi que des essais à effectuer. Si ces essais (peu destructifs) ne sont pas probants, on peut encore effectuer quelques essais spécialisés pour parvenir à une évaluation satisfaisante de la structure.

3.2.2.1 Localisation des défauts d'adhérence

Un sondage de la surface du béton (en la frappant avec un marteau) permet de déterminer les zones où il y a des cavités dans le béton, en interprétant les différences de sonorité.

3.2.2.2 Détermination de la dureté de surface

La dureté de surface du béton peut être déterminée à l'aide d'un scléromètre, parfois aussi appelé marteau Schmidt.

Le principe de la mesure consiste à mesurer le rebond d'une masse connue, projetée avec une force connue sur la surface. Comme les propriétés du corps projeté restent constantes, le seul facteur qui puisse influencer le choc en retour est la dureté de la surface. En effet, une surface plus dure absorbera moins d'énergie lors de l'impact et renverra donc la masse plus loin.

Avant d'effectuer les mesures, il faut débarrasser une zone suffisamment grande, environ 300 mm x 300 mm, de toute souillure, peinture, enduit ou élément branlant. La peau du ciment friable doit être enlevée à la meule. Le scléromètre est utilisé selon les instructions de la norme et du fabricant. Préalablement aux mesures, trois activations sans lecture du résultat doivent assurer le bon fonctionnement de l'outil.

La tige de choc est appuyée perpendiculairement sur la surface du béton dans une zone sans défauts visibles. Ensuite, on augmente la pression sur l'appareil jusqu'à ce que le ressort se déclenche. On effectue au moins 9 mesures dans la zone préparée.

Ainsi on obtient un indice sclérométrique. Cet indice peut être converti à titre indicatif en résistance cubique à la compression du béton. Sur un béton relativement jeune (quelques mois), cette valeur correspond très bien à la résistance réelle en compression; sur un béton plus âgé, des réactions de surface (carbonatation) peuvent augmenter la dureté superficielle, si bien qu'il n'existe plus de lien direct avec la résistance en compression. Cependant l'indice peut donner une indication de l'homogénéité de la qualité du béton de l'ouvrage.

La détermination de la dureté de surface est décrite dans la NBN EN 12504-2 [15].



Figure 13: Détermination de la dureté de surface à l'aide d'un scléromètre

3.2.2.3 Localisation de l'armature et détermination de l'enrobage

Un pachomètre (détecteur d'armature) permet de déterminer la localisation de l'armature ainsi que son enrobage. Les mesures peuvent être rendues plus compliquées par une grande compacité du treillis d'armature ou par la présence de plusieurs couches d'armature.

On déplace le capteur du pachomètre à la surface du béton pour déterminer les endroits où se trouvent les armatures. On peut généralement détecter l'armature jusqu'à une profondeur d'environ 10 cm. Les fissures qui suivent le tracé de l'armature doivent toujours être considérées comme suspectes, car il est toujours possible qu'elles soient provoquées par la corrosion.

On peut aussi déterminer l'enrobage à l'aide du pachomètre. Mais pour réaliser des mesures précises, il faut généralement connaître le diamètre de l'armature examinée. On contrôle l'exactitude de cette méthode à un ou plusieurs endroits, en pratiquant un petit forage, ou aux endroits où l'armature est apparente. Il est important de déterminer l'enrobage de l'armature pour pouvoir évaluer dans combien de temps la structure commencera à se corroder sous l'effet de la carbonatation et des attaques par les chlorures, et pour prendre éventuellement des mesures de protection.

Certains pachomètres permettent de déterminer le diamètre de l'armature. Mais la précision des résultats de cette méthode n'est pas garantie. Par conséquent, la méthode ne convient pas pour un contrôle de stabilité de la structure.

3.2.2.4 Détermination de la profondeur de carbonatation

La détermination de la profondeur de carbonatation s'effectue en vaporisant une surface de rupture fraîche avec une solution de phénolphthaléine suivant la méthode RILEM CPC-18 [16] ou la prénorme prEN 14630 [17]. Le béton non carbonaté se colorera immédiatement en violet tandis que les zones carbonatées ne changeront pas de couleur (Figure 14).



Figure 14: Détermination de la profondeur de carbonatation sur une carotte

Pour limiter au maximum les dégâts pendant l'inspection, on peut se contenter de forer de petits trous (\varnothing 6 ou 8 mm) et de mettre la poudre de forage en contact avec la solution de phénolphthaléine. Dès qu'on observe un changement brusque de couleur, on cesse de forer et on mesure la profondeur du trou de forage. La méthode doit être répétée quelques fois (au moins 3) car on obtient parfois des résultats erronés, par exemple si l'on fore sur un granulats. Cette méthode est peu destructive et peut être appliquée sur place sur le chantier mais n'est précise qu'à quelques millimètres près.

On peut déterminer le facteur k de chaque structure, pour chaque composition de béton et chaque exposition, en se basant sur la profondeur de carbonatation mesurée et sur l'âge au moment de la mesure, à l'aide de la formule suivante:

$$k_0 = \frac{D_0}{\sqrt{t_0}}$$

où: D_0 : la profondeur de carbonatation mesurée [mm];

k_0 : constante, en fonction de la qualité du béton, de l'exposition, etc $\left[\frac{mm}{\sqrt{an}} \right]$.

t_0 : âge du béton en années au moment de la mesure [an].

On peut ensuite, à l'aide de la même formule, procéder à la prédiction du moment où le front de carbonatation atteindra l'armature, ou bien du moment où la corrosion sera amorcée par carbonatation.

$$t_1 = \frac{D_w^2}{k_0^2}$$

où: D_w : l'enrobage de l'armature [mm];

k_0 : constante tirée de la mesure précédente $\left[\frac{mm}{\sqrt{an}} \right]$;

t_1 : âge du béton où commence la corrosion par carbonatation [an].

Il faut être bien conscient du fait que toute modification de l'exposition (p. ex. passage d'un environnement humide à un environnement sec) a une incidence sur le facteur k . Ce calcul peut être une donnée utile lors du choix de mesures préventives en vue de prévenir la dégradation à plus long terme.

3.2.2.5 Détermination de la teneur en chlorures

La teneur (totale) en chlorures peut être déterminée à l'aide d'une analyse chimique selon la norme NBN B15-250 [18] ou la recommandation RILEM TC 178-TMC [19]. À cette fin, il faut prélever des échantillons sur le chantier afin de les étudier ensuite en laboratoire.

Il existe des essais qualitatifs (p.ex. des bandelettes) qui peuvent donner une première indication sur la présence de chlorures. Mais il faut encore déterminer ensuite la teneur en chlorures de façon quantitative. Il existe toutefois à l'heure actuelle plusieurs "coffrets de chantier" qui permettent de déterminer efficacement sur place la teneur en chlorures de manière assez simple et rapide.

Toutes ces analyses donnent pour résultat la teneur de chlorures par rapport à la masse totale de béton. Pourtant, la teneur en chlorures par rapport à la masse de ciment est plus utilisée dans les critères d'évaluation. Pour la déterminer il faut multiplier le résultat des analyses par le rapport entre la masse volumique du béton et la quantité de ciment présente dans le béton (pour les types de béton normaux, cette proportion se situe entre 6 et 8). La valeur obtenue doit alors être comparée avec la valeur critique (Figure 6).

L'étude d'échantillons prélevés à différentes profondeurs permet aussi de savoir si les chlorures ont été mélangés au béton dès le début ou s'ils y ont pénétré par la suite. Elle permet également de connaître la teneur en chlorures au niveau des armatures.

3.2.2.6 Mesure de la largeur des fissures

La largeur des fissures présentes dans le béton peut être mesurée au moyen d'un fissuromètre (optique ou autre) (Figure 15). La largeur d'une fissure est importante, mais son emplacement et son évolution dans le temps le sont tout autant.



Figure 15: Mesure de la largeur des fissures par un fissuromètre optique

On peut contrôler simplement si une fissure est active (mobile) en y appliquant un témoin de plâtre (p. ex. une petite couche d'enduit). Si le témoin lui-même se fissure après un certain

temps, cela indique une fissure active dont il faut étudier davantage le comportement. On peut le faire à l'aide d'un vernier ou de jauges d'extension ou de déplacement (dilatomètres).

3.2.2.7 Détermination de la cohésion superficielle du béton

L'essai est généralement réalisé selon la NBN EN 1542 [20] et peut se faire facilement in situ. Le choix des zones où l'essai se fera peut être basé sur l'inspection visuelle ou sur les résultats des essais de dureté superficielle. Il serait aberrant de déterminer l'adhérence aux endroits où le marteau du scléromètre a produit un bruit sourd, puisque probablement le béton y est fissuré.

Aux endroits où l'essai a été réalisé, on commence par forer avec un carottier diamanté de 50 mm de diamètre intérieur jusqu'à une profondeur de 15 mm. On y colle ensuite une pastille en acier de 50 mm de diamètre et d'au moins 30 mm d'épaisseur sur laquelle on exerce une force de traction augmentant au maximum de 0,5 N/mm² par seconde.

3.3 ESSAIS COMPLÉMENTAIRES

Si l'inspection visuelle et les essais de base ne sont pas concluants pour obtenir une évaluation correcte de la structure, différents essais peuvent compléter la recherche en vue de mieux comprendre le phénomène. Mais la plupart de ces essais sont tellement spécialisés et coûteux qu'il convient de commencer par évaluer la pertinence de leur mise en œuvre.

Il existe quelques techniques non destructives pour examiner la qualité du béton et effectuer des mesures de corrosion. En outre, il existe aussi des essais destructifs, que l'on réalise sur des échantillons en laboratoire, sur l'ensemble de la structure ou de grandes parties de celle-ci.

Ces essais et l'interprétation de leurs résultats doivent toujours être réalisés par des personnes compétentes.

3.3.1 Examen aux ultrasons

Les mesures par ultrason permettent d'évaluer l'homogénéité du béton et d'estimer sa qualité par une mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans le béton. La méthode peut s'utiliser pour détecter la présence de nids de gravier, de cavités, de fissures et d'autres défauts.

L'instrument ne donne pas une évaluation précise de la résistance en compression du béton: un étalonnage au moyen d'essais sur carottes est favorable à la précision. La technique exige qu'en outre le résultat de la mesure, on tienne aussi compte de la distance entre les deux transducteurs ultrasoniques. Des variations dans la teneur en humidité et la température peuvent influencer les résultats, tout comme la présence de barres d'armature et de gaines de précontrainte. L'essai ne peut être réalisé que par des spécialistes.

3.3.2 Mesures de corrosion

3.3.2.1 Mesures potentiométriques

Aux endroits où le fer se dissout, donc aux endroits où se produit la corrosion (anode), le potentiel de la surface du béton est différent de celui des endroits où la couche de passivation est encore intacte. Les différences de potentiel entre la surface du béton et l'armature sous-jacente, aux endroits où le processus de corrosion est en cours, sont plus élevées, dans l'absolu, qu'aux endroits où ce n'est pas le cas.

C'est sur l'existence de ces différences de potentiel que se fondent les mesures potentiométriques de la surface. Le béton et la barre d'armature en train de rouiller ou non constituent en effet une demi-cellule. Lorsqu'on utilise une demi-cellule stable mise en contact avec la surface du béton, on peut former une cellule électrique. Un voltmètre à impédance d'entrée suffisamment élevée ($> 10^7$ ohm) permet de mesurer le potentiel généré par cette cellule (Figure 16).

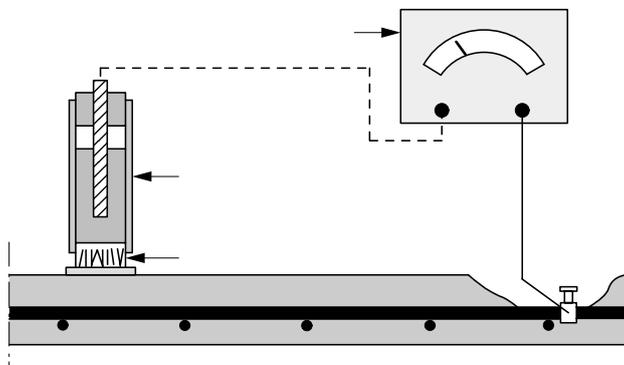


Figure 16: Schematische voorstelling van een potentiaalmeting

Pour respecter les conventions internationales en vigueur (ASTM [21], RILEM [22]), il faut raccorder la borne négative du voltmètre à l'électrode de la demi-cellule de référence et la borne positive à l'armature. Lorsqu'un tel raccordement est établi, ce sont les endroits où de la corrosion se produit qui fourniront les valeurs les plus négatives.

En balayant systématiquement la surface du béton, on peut dresser la carte des lignes équipotentiellles (Figure 17) et, sur cette base, déterminer les endroits où l'armature est atteinte par la corrosion.

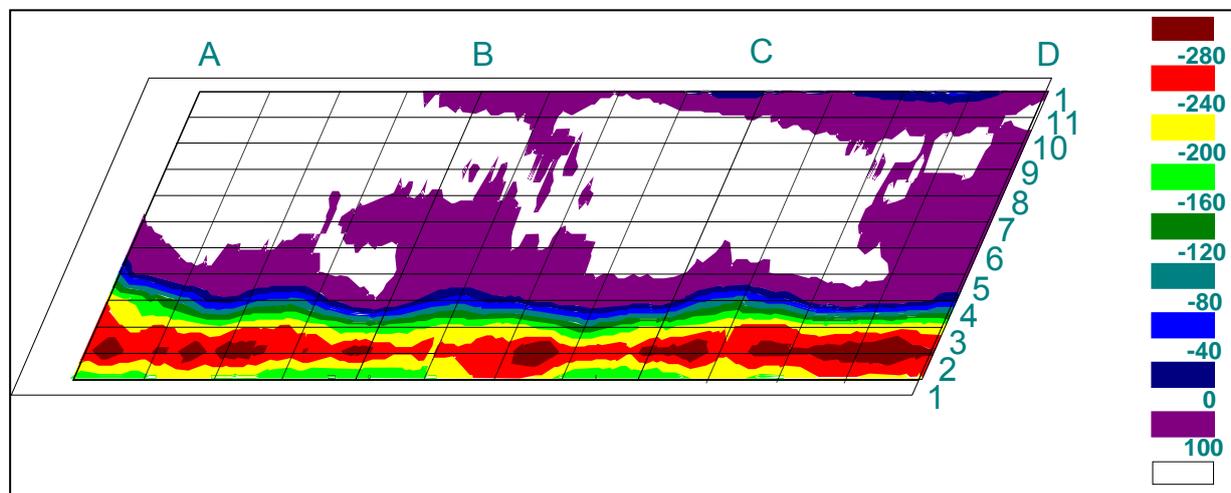


Figure 17: Lignes equipotentiellles

3.3.2.2 Mesures de résistivité

La mesure potentiométrique repose essentiellement sur l'influence de la corrosion sur le potentiel de l'armature. Or, il ressort de la description du processus de corrosion que celle-ci influence le béton, et principalement sa teneur en ions. Cette teneur en ions est un facteur déterminant de la résistivité du béton. Plus la teneur en ions est élevée dans l'eau présente

dans les pores du béton, plus la résistivité du béton est basse, et plus le risque de corrosion est élevé.

Cette résistivité du béton peut se mesurer avec un appareil de mesure doté de 4 points de contact en ligne (dispositif de Wenner). On injecte un courant électrique dans le béton par les deux points de contact extrêmes. Ensuite, on mesure la tension entre les deux points de contact centraux de la cellule de mesure.

3.3.2.3 Mesures de résistance à la polarisation linéaire

Les deux méthodes de mesure précédentes mettent en lumière les zones où une corrosion est très probable (ce sont des mesures qualitatives de la corrosion), mais elles ne donnent pas une idée quantitative de la vitesse de corrosion. Par contre, les mesures de résistance à la polarisation linéaire le permettent. Cette technique permet de mesurer la quantité de métal qui se dissout, et donc se corrode, sur une surface donnée.

Par application de petites variations de tension, on essaie de conférer à l'armature une polarisation d'environ 10mV. On mesure le courant électrique ainsi généré. On déduit la résistance de polarisation qui est la relation entre les variations de tension et la variation du courant qui en résulte. Cette relation est quasi linéaire à proximité du potentiel de corrosion libre. La "résistance à la polarisation" peut servir pour le calcul de la vitesse de corrosion.

3.3.2.4 Remarques concernant les mesures électriques

Du fait de leur caractère peu destructif, ces techniques de mesure conviennent parfaitement pour contrôler régulièrement l'état d'une structure. Les mesures doivent cependant se faire chaque fois sur une surface de béton propre. Il faut donc enlever les couches de peinture éventuelles.

Il est de pratique de plus en plus courante de bétonner des électrodes de référence dans les nouvelles structures. Cela facilite beaucoup les mesures et l'évaluation des résultats lors d'une inspection ultérieure. En outre, ces électrodes de référence peuvent anticiper certains facteurs qui influencent les résultats des mesures. Ces facteurs sont, entre autres:

- l'enrobage du béton;
- la présence de béton carbonaté ou d'un coating à résistivité électrique parfois élevée;
- la teneur en humidité de l'enrobage de béton;
- la présence de fissures;
- les courants vagabonds éventuels.

Les résultats des mesures effectuées à intervalles réguliers permettront de prédire avec plus de précision comment la structure se comportera en vieillissant.

3.3.3 Détermination de la résistance à la compression

L'essai de compression s'effectue sur des carottes de forage selon NBN EN 12504-1 [23]. Les éprouvettes sont mises en charge avec une progression située entre 0,2 N/mm² par seconde et 1 N/mm² par seconde jusqu'à rupture. La force maximale est notée et permet de calculer la résistance à la compression du béton. Pour obtenir une bonne évaluation de ce paramètre, il est nécessaire d'effectuer suffisamment d'essais.

La résistance en compression mesurée pour un béton donné dépend de la forme et des dimensions de l'éprouvette utilisée. Plus l'éprouvette est haute et/ou mince, plus la résistance en compression mesurée est petite. On trouve, dans l'«Addendum 1» de la NBN B15-220

(édition 1970) [24], une relation empirique générale qui permet de calculer des facteurs de conversion pour des éprouvettes de hauteur h (mm) et de section transversale A (mm²), le cube de 200 mm de côté servant de référence.

La résistance en compression dépend aussi dans une large mesure de l'âge du béton au moment de la mesure. La norme EN 1992-1-1 [13] contient une formule qui permet de convertir la résistance en compression obtenue à 28 jours en résistance en compression à d'autres âges.

La résistance en compression donne une indication de la qualité du béton et permet de s'assurer que le béton convient aux prescriptions établies dans l'étude de stabilité. On peut également effectuer un calcul de contrôle lorsque survient une dégradation.

3.3.4 Détermination de la masse volumique

La masse volumique est déterminée selon la norme belge NBN EN 12390-7 [25]. Le volume minimum des éprouvettes est de 1 dm³. On mesure la masse de l'éprouvette à l'état reçu (M_0) puis on immerge complètement l'éprouvette dans l'eau. L'éprouvette y reste au moins 48 heures, jusqu'à obtention d'une masse constante (M_1 , masse humide). La masse constante est atteinte quand deux mesures successives, effectuées à un intervalle de 24 heures d'intervalle, présentent une différence de masse inférieure à 0,1 % de la valeur de la dernière mesure. On place ensuite l'éprouvette dans une étuve sèche à 105 °C jusqu'au moment où la masse constante est atteinte (M_2 , masse sèche). On détermine alors le volume V de l'éprouvette par calcul si l'éprouvette possède une forme géométrique simple et régulière ou par pesée hydrostatique. La masse volumique ρ est donnée par la formule suivante: $\rho = \frac{M}{V}$ où l'on prend généralement la valeur M_2 (masse sèche) pour M .

3.3.5 Détermination de l'absorption d'eau

La norme belge NBN B 15-215 décrit la méthode de détermination de l'absorption d'eau par immersion d'éprouvettes en béton. L'éprouvette est plongée dans l'eau jusqu'à obtention de la masse constante (M_1). On la place ensuite dans une étuve sèche jusqu'à obtention de la masse constante (M_2). L'absorption d'eau par immersion est calculée selon la formule suivante:

$$A = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \cdot 100$$

La norme NBN B 15-217 (1984) [26] décrit une méthode d'essai de détermination de l'absorption d'eau par capillarité par le béton et les mortiers, de même que la norme NBN EN 480-5 (1996) [27]. Cette mesure nous donne une bonne indication de la porosité et donc de la qualité du béton.

3.3.6 Examen pétrographique

Pour un examen pétrographique, on découpe dans un échantillon imprégné d'une résine fluorescente, une mince plaquette (25 à 30 μ m d'épaisseur). Cette lame mince est ensuite soumise à une analyse microscopique. Cette analyse peut être concluante quant à la présence de fissures, d'ettringite ou de RAG. Elle peut également fournir une série de données indicatives concernant la composition de béton utilisée, les granulats, le type de ciment, le facteur eau/ciment et la porosité.

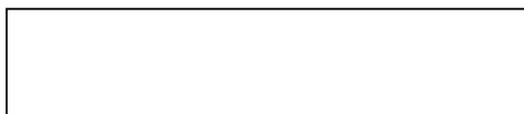


Figure 18: Analyse microscopique avec lumière fluorescente

3.3.7 Contrôle des armatures

Ce contrôle débute par la détermination des dimensions des armatures. Si l'on souhaite effectuer en outre un contrôle de stabilité sur une structure existante, il faut connaître la qualité de l'acier et du béton. La qualité du béton et ses propriétés peuvent être obtenues à l'aide des essais cités ci-dessus. Si l'on ne connaît pas la qualité de l'acier utilisé, on peut prélever un échantillon de l'armature dont on déterminera les propriétés mécaniques et la soudabilité.

3.3.8 Essais sur l'ensemble de la structure ou sur une de ses parties

3.3.8.1 Radiographie et gammagraphie

Des sources de rayonnement (sources radioactives ou röntgen) permettent de détecter des cavités et des éléments en acier dans le béton. La méthode s'applique aussi pour évaluer à quels endroits on peut pratiquer des réservations. Mais cette technique a ses limites:

- la source et le récepteur doivent se trouver de part et d'autre de l'objet à examiner, ce qui n'est pas toujours facile;
- chaque mesure ne permet d'examiner qu'une surface limitée; les résultats sont donc aussi limités en taille;
- cela peut être dangereux pour l'opérateur et les passants;
- l'interprétation des résultats doit être confiée à un spécialiste.

La photographie aux rayons X ou aux rayons gamma permet, par exemple, de découvrir une diminution générale de la section ou une corrosion par piqûres. L'expérience montre que cette technique ne peut s'utiliser que sur des éléments structurels de section simple et à densité d'armatures limitée. Étant donné ses limitations, l'emploi de cette technique est réservé à des situations où il n'y a aucune autre solution possible.

3.3.8.2 Essai de mise en charge

L'application d'une charge connue et limitée sur une structure et la mesure des déformations qui en résultent permettent d'obtenir des indications sur les propriétés de résistance de la structure. On peut calculer la charge maximale admissible au départ de la mise en charge et de la déformation. La coordination d'une mise en charge d'essai et l'interprétation des résultats relèvent de la responsabilité d'un bureau d'études spécialisé en la matière.

3.4 ÉVALUATION DE LA STRUCTURE

Une fois les résultats des essais effectués connus, on peut évaluer la structure. Cette évaluation peut porter sur:

- l'état général,
- le vieillissement du béton,
- la force portante des éléments,
- la durée d'utilisation,
- l'aptitude à l'utilisation

de la structure.

Les résultats de l'inspection doivent être synthétisés de manière claire et complète dans un rapport d'inspection. Un rapport d'inspection se présente comme suit, dans les grandes lignes:

- introduction: maître de l'ouvrage, raison de l'examen, but de l'examen;
- données connues ou pertinentes qui sont ressorties de l'examen du dossier;
- techniques d'examen et de mesure utilisées;
- rapport de l'inspection visuelle;
- liste des endroits où des mesures ont été effectuées et des échantillons prélevés;
- résultats des essais de base;
- résultats des essais complémentaires;
- analyse de l'ensemble des données, observations et résultats;
- conclusions.

Dans la formulation des conclusions, on décrit la dégradation de la structure et les relations entre les différentes observations et les différents résultats de mesures. On s'efforce de décrire les mécanismes de dégradation qui interviennent, ainsi que leur cause, leur évolution et les pronostics. Il faut, pour cela, posséder une connaissance très approfondie des différents mécanismes de dégradation du béton, étant donné que beaucoup de problèmes peuvent résulter de mécanismes différents. Les conclusions de ce rapport font parties du cahier des charges.

La sélection de la méthode de réparation est décrite au chapitre 5.

4 PRINCIPES ET TECHNIQUES

4.1 PRÉSENTATION DES PRINCIPES

La norme NBN ENV 1504-9 [2], déjà citée à quelques reprises, stipule les principes sur lesquels doit reposer la réparation du béton. Une première série de principes concerne la réparation des dégradations du béton et la protection du béton (Tableau 5).

N° du principe	Principe et définition	Méthodes fondées sur le principe
Principe 1 [PI]	Protection contre la pénétration Réduction ou prévention de la pénétration d'agents indésirables, par exemple eau, autres liquides, vapeur, gaz, produits chimiques ou biologiques.	1.1 Imprégnation Application de produits liquides qui pénètrent dans le béton et obstruent le système poreux. 1.2 Revêtement de surface avec ou sans capacité de pontage des fissures 1.3 Colmatage superficielle des fissures ¹⁾ 1.4 Remplissage des fissures (injection) 1.5 Transformation des fissures en joints ¹⁾ 1.6 Pose d'un bardage ^{1) 2)} 1.7 Applications de membranes ¹⁾

<p>Principe 2</p> <p>[MC]</p>	<p>Contrôle de l'humidité</p> <p>Réglage et maintien de la teneur en humidité du béton selon une gamme de valeurs spécifiées.</p>	<p>2.1 Imprégnation hydrophobe</p> <p>2.2 Revêtement de surface</p> <p>2.3 Protection ou sur-revêtement ^{1) 2)}</p> <p>2.4 Traitement électrochimique ^{1) 2)}</p> <p>Application d'une différence de potentiel sur les parties du béton pour aider ou résister au passage de l'eau dans le béton. (Ne s'applique pas au béton armé sans estimation du risque de corrosion).</p>
<p>Principe 3</p> <p>[CR]</p>	<p>Restauration du béton</p> <p>Restauration de la forme et de la fonction spécifiées à l'origine, du béton d'origine ou d'un élément de la structure.</p> <p>Restauration de la structure en béton par remplacement partiel.</p>	<p>3.1 Application du mortier à la main</p> <p>3.2 Mise en œuvre d'un nouveau béton</p> <p>3.3 Projection de béton ou de mortier</p> <p>3.4 Remplacement de certains éléments</p>
<p>Principe 4</p> <p>[SS]</p>	<p>Renforcement structurel</p> <p>Augmentation ou restauration de la portance d'un élément ou de la structure en béton.</p>	<p>4.1 Ajout ou remplacement d'armatures en acier enrobées ou externes</p> <p>4.2 Installation des armatures scellées dans des trous préformés ou forés dans le béton</p> <p>4.3 Collage de plats</p> <p>4.4 Ajout de mortier ou de béton</p> <p>4.5 Injection des fissures</p> <p>4.6 Remplissage des vides ou interstices</p> <p>4.7 Précontrainte - (postcontrainte) ¹⁾</p>
<p>Principe 5</p> <p>[PR]</p>	<p>Résistance physique</p> <p>Augmentation de la résistance aux attaques physiques ou mécaniques.</p>	<p>5.1 Recouvrements ou revêtements</p> <p>5.2 Imprégnation</p>
<p>Principe 6</p> <p>[RC]</p>	<p>Résistance aux produits chimiques</p> <p>Augmentation de la résistance de la surface du béton aux détériorations par attaque chimique.</p>	<p>6.1 Recouvrements ou revêtements</p> <p>6.2 Imprégnation</p>

¹⁾ Ces méthodes peuvent utiliser les produits et les systèmes non couverts par la série de normes EN 1504.

²⁾ L'inclusion des méthodes dans la prénorme n'implique pas leur approbation.

Tableau 5: Principes et méthodes relatifs aux défauts dans le béton

Le Tableau 6 reprend les principes du traitement et de la prévention de la corrosion des armatures.

N° du principe	Principe et définition	Quelques exemples de méthodes fondées sur le principe
Principe 7 [RP]	Préservation ou restauration de la passivité Création des conditions chimiques dans lesquelles la surface de l'armature est maintenue ou retourne à l'état passif.	7.1 Augmentation de l'enrobage de l'armature avec mortier ou béton hydraulique supplémentaire. 7.2 Remplacement du béton contaminé ou carbonaté 7.3 Réalcalinisation électrochimique du béton carbonaté ¹⁾ 7.4 Réalcalinisation du béton carbonaté par diffusion 7.5 Extraction électrochimique des chlorures ¹⁾
Principe 8 [IR]	Augmentation de la résistivité Augmentation de la résistance électrique du béton.	8.1 Limitation de la teneur en humidité par des traitements de surface, des revêtements ou bardages
Principe 9 [CC]	Contrôle cathodique Création de conditions dans lesquelles les zones d'armature potentiellement cathodiques ne peuvent entraîner une réaction anodique.	9.1 Limitation de la teneur en oxygène (au niveau de la cathode) par saturation ou revêtement de la surface ²⁾
Principe 10 [CP]	Protection cathodique	10.1 Application d'un potentiel électrique ¹⁾

Principe 11 [CA]	Contrôle des zones anodiques Création des conditions dans lesquelles les zones d'armature potentiellement anodiques ne peuvent participer à la réaction de corrosion.	11.1 Badigeonnage de l'armature avec des revêtements contenant des pigments actifs 11.2 Badigeonnage de l'armature avec des revêtements de protection 11.3 Application d'inhibiteurs sur le béton ¹⁾²⁾
1) Ces méthodes peuvent utiliser les produits et les systèmes non couverts par la série de normes EN 1504. 2) L'inclusion de méthodes dans cette prénorme n'implique pas leur approbation.		

Tableau 6: Principes et méthodes relatifs à la corrosion de l'armature

4.2 DESCRIPTION DES PRODUITS

4.2.1 Introduction

Ce chapitre décrit de façon succincte quelques matériaux utilisés pour la réparation du béton avec leur principe d'application. Le chapitre suivant expliquera comment choisir la méthode de réparation appropriée et le chapitre 7 décrira de manière plus détaillée la réparation générale du béton. Le chapitre 8 explique quelques techniques spécialisées de réparation et décrit les éléments nécessaires à cette fin.

4.2.2 Mortiers de ragréage

Les mortiers de ragréage sont utilisés dans les travaux de réparation sur le béton proprement dit afin de lui redonner sa forme et sa fonction d'origine (Principes 3 et 4). Les mortiers de ragréage à base de liants hydrauliques créent un milieu basique dans lequel une couche protectrice de passivation se forme à la surface de l'armature (Principe 7) tandis qu'un mortier de ragréage à base de résines a une action protectrice en faisant barrage entre l'armature et l'eau et/ou l'oxygène (Principes 3, 4 et 8).

Les exigences relatives aux mortiers de ragréage à base de liants hydrauliques et de résines sont décrites respectivement dans le Guide d'agrément G0007 "Mortiers de ragréage à base de liants hydrauliques" [28], et dans le Guide d'agrément G0013 "Mortiers de ragréage à base de résines" [29]. Les exigences pour le béton projeté sont décrites dans la norme NBN EN 14487-1:2006 [30], et dans le Guide d'agrément G0019 "Béton de gunitage" [31]. Les méthodes d'application des mortiers de ragréage sont discutées dans les détails au chapitre 7.

4.2.3 Systèmes de protection superficielle

Les systèmes de protection superficielle diminuent ou empêchent la pénétration de substances nocives dans le béton (Principes 1, 2, 5, 6, 8, 9). Ces systèmes peuvent être:

- des couches de protection liquides:
 - produits d'imprégnation imperméabilisants;
 - produits d'imprégnation bouche-pores;
 - revêtements;
- des recouvrements: panneaux et membranes.

Les exigences imposées aux couches de protection liquides sont décrites dans la norme NBN EN 1504-2 [32] et dans les Guides d'agrément G0008 "Revêtements de protection des

surfaces en béton soumis aux influences extérieures et non soumis au trafic” [33], G0017 [34] pour les revêtements de surfaces en contact avec l'eau et G0027 [35] pour les produits d'imprégnation et d'imprégnation hydrophobe. Ils sont décrits davantage au § 6.4. L'emploi de panneaux et de membranes ne sera pas discuté dans le présent document.

4.2.4 Matériaux de renforcement

Il peut être nécessaire, pour des raisons de stabilité, de renforcer une structure (Principe 4). Cela peut se faire soit par consolidation interne (armatures supplémentaires avec enrobage de béton) ou par consolidation externe (plats collés en acier ou en matériaux composites à base de fibres de carbone, ou systèmes de précontrainte externes). Dans certains cas, on peut poser des éléments en béton supplémentaires. Les exigences imposées aux armatures collées sont reprises dans le Guide d'agrément G0026 [36]. Les matériaux de renforcement seront traités au chapitre 8.4.

4.2.5 Inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion ont pour but de freiner la vitesse de corrosion de l'armature présente dans le béton (Principe 11). Ces produits sont mélangés au mortier de ragréage ou peuvent être appliqués par imprégnation de la surface du béton. La réussite de ce genre de traitement dépend de nombreux facteurs et exige un suivi très rigoureux des travaux. Les inhibiteurs de corrosion sont discutés au chapitre 8.2.

4.2.6 Coulis d'injection

Les coulis d'injection ont pour but de colmater ou de combler les fissures en surface ou complètement (Principes 1, 4). Ces coulis sont généralement à base d'époxy, de polyuréthane, d'un mélange des deux, d'une suspension de ciment ou d'un gel lié au polyuréthane ou à l'acrylique. La norme NBN EN 1504-5 [37] décrit les exigences auxquelles les coulis d'injection doivent satisfaire. Des explications plus détaillées concernant la réparation des fissures par injection sont données au chapitre 8.3.

4.2.7 Produits de protection d'armature

S'il s'avère que l'enrobage du béton est trop faible après réparation, on peut appliquer, au moment de la préparation, un produit pour protéger l'armature contre la corrosion (Principe 11). Le type de produit dépend du mortier utilisé. Ce point sera traité au chapitre 6. En ce qui concerne les exigences relatives à la couche de protection contre la corrosion de l'armature, on consultera l'Annexe A du Guide d'agrément G0007 [28] et le Guide d'agrément G0011 “Protection de l'armature en cas de dépassement par carbonatation, lorsque l'enrobage est inférieur à 10 mm” [38].

5 SELECTION DES SYSTEMES DE REPARATION ET DE PROTECTION

5.1 ACTIONS

Sur base des conclusions de l'inspection et compte tenu de l'évolution potentielle des dégradations, la durée de vie (au niveau constructif, économique et technique) de la construction peut être estimée si aucune action de protection ou de réparation du béton n'est entamée. Il est alors possible de déterminer les mesures à prendre.

Suite aux dégradations subies par la construction, différentes solutions peuvent être envisagées. Ces actions peuvent être les suivantes:

- ne rien faire;
- protéger la construction en visant à empêcher ou à freiner toute dégradation supplémentaire;
- réparer les dégradations;
- consolider la construction;
- enlever et éventuellement remplacer la construction ou certains éléments de celle-ci;

L'usage de la construction peut éventuellement être restreint.

5.2 INFLUENCES [39]

Différents paramètres déterminent la sélection du système de réparation ou de protection:

- le maintien ou la restauration de la sécurité;
- la cause et le développement des dégradations;
- la faisabilité technique;
- les aspects économiques;
- la nature et l'ampleur des dégradations;
- les aspects liés à l'exécution;
- les exigences liées à l'aspect extérieur;
- le choix du donneur d'ordre.

Ces paramètres et la manière dont ils influent sur la sélection sont décrits en détail ci-après.

5.2.1 Le maintien ou la restauration de la sécurité

La sécurité *constructive* est mise en danger s'il existe un risque pour la stabilité de la construction ou des éléments de la construction. Ce risque peut entre autres survenir après:

- la corrosion de l'armature;
- la dislocation du béton dans la zone de pression;
- l'apparition d'une fissuration importante;
- le détachement ou le glissement des appuis.

La sécurité *générale* comprend toutes les autres situations comportant un risque pour les passants ou pour l'environnement. Cela peut notamment se produire lorsque des morceaux de béton se détachent.

La méthode de réparation choisie doit garantir tant la sécurité constructive que la sécurité générale et ce, tant avant que pendant et après les travaux.

5.2.2 La cause et le développement des dégradations

Pour créer une situation favorable pour l'avenir, la cause à l'origine des dégradations doit être éliminée. Cela peut s'avérer impossible dans certains cas ou déraisonnable économiquement. Dans ces cas, il convient d'en tenir compte lors de l'entretien de la construction après la réparation.

En cas de corrosion par carbonatation par exemple, l'origine des dégradations ne peut en effet pas être éliminée (CO₂ dans l'air). Ces dégradations sont généralement la conséquence d'un trop faible enrobage du béton. Les endroits corrodés peuvent être réparés localement. Mais étant donné que la carbonatation se poursuit, il convient de voir également si les emplacements où l'on n'a pas encore constaté de corrosion jusqu'à présent sont suffisamment protégés contre la carbonatation.

5.2.3 La faisabilité technique

Une réparation est faisable techniquement s'il existe une solution qui répond à toutes les exigences posées à la construction (solidité, rigidité, résistance physique et chimique). Par exemple, si lors de la conception de la construction un mauvais matériau a été choisi et qu'il est maintenant impossible de le remplacer, aucune solution technique valable n'est possible.

5.2.4 Les aspects économiques

Normalement, la durée de vie économique d'une construction (la durée d'amortissement de la construction) est plus courte que la durée de vie technique (la durée pendant laquelle la construction peut remplir sa fonction). Il peut parfois arriver que l'état d'un bâtiment se dégrade plus rapidement que l'amortissement. Il convient d'en tenir compte lors de la sélection de la méthode de réparation. Dans un bâtiment récent, par exemple, il peut être acceptable de remplacer des pièces endommagées, alors qu'une réparation temporaire sera peut-être davantage conseillée pour un bâtiment ancien.

5.2.5 La nature et l'ampleur des dégradations

Toutes les méthodes et tous les matériaux de réparation ne conviennent pas à tous les types de dégradation. La nature et l'ampleur des dégradations ont une influence sur la sélection de la méthode de réparation. Voici quelques caractéristiques des dégradations qui influencent le choix:

- la position de la surface de béton endommagée (verticale, au plafond, horizontale) détermine les exigences de consistance du mortier de ragréage;
- l'épaisseur (profondeur) du volume de béton endommagé:
 - si elle est faible, elle influence la plus grande dimension de grain du mortier de ragréage;
 - si elle est plus importante que l'enrobage, elle influence le type de mortier de ragréage;
- la taille de la surface endommagée du béton;
- la nécessité de remplacement des armatures ou de renforcement.

5.2.6 Aspects liés à l'exécution

Lors de la sélection de la méthode de réparation, il convient de tenir compte des limites ou des exigences éventuelles au niveau de l'exécution, imposées par la méthode de réparation, l'emplacement de la réparation ou une combinaison de ces deux éléments.

La localisation de la réparation et/ou la méthode de réparation peuvent:

- nécessiter l'utilisation d'accessoires pour l'accessibilité (échafaudages, bacs suspendus,...);
- nécessiter des horaires d'exécution inhabituels (voies ferrées, écoles, tunnels, voie maritime, ...);
- être dangereuses pour la sécurité personnelle;
- provoquer une surcharge: bruit, eau, poussières ou déchets.

5.2.7 Les exigences liées à l'aspect extérieur

Parfois, la conservation de l'aspect extérieur peut être requise et des possibilités de réparation moins invasives doivent être recherchées. Cela peut notamment être le cas avec des monuments classés.

La réparation de béton architectonique conduit parfois à des exigences non réalisables.

5.2.8 Le choix du donneur d'ordre

Si le donneur d'ordre a le choix entre plusieurs méthodes de réparation, il peut sélectionner la méthode la plus adaptée à ses yeux. Il doit être conscient que l'option "ne rien entreprendre", bien que plus économique à court terme, est souvent plus onéreuse à long terme.

5.3 SELECTION

La méthode de réparation/de protection finale doit

- convenir au type, à l'origine ou à la combinaison de l'origine et de la portée des dégradations;
- convenir au niveau de l'utilisation future de la construction;
- être conforme à l'action choisie au § 5.1;
- correspondre aux principes en vigueur pour la réparation et la protection du béton (Tableau 5 et Tableau 6);
- être exécutable avec des produits et des systèmes qui sont conformes à la norme EN 1504 ou à toute autre norme EN pertinente, une agrégation technique européenne ou un avis d'approbation.

Cette sélection est influencée par de nombreux paramètres (§ 5.2). Il est dès lors également conseillé de confier cette tâche complexe à un expert en la matière.

6 MATERIAUX DE REPARATION

6.1 MORTIERS

Les mortiers de réparation sont classés selon leur type de liant, selon qu'il s'agit de ciment ou de résine synthétique.

L'aspect du résultat après réparation avec des mortiers est souvent accessoire. Lors de la réparation de béton architectonique, on peut faire appel à des mortiers destinés à la réparation des pierres naturelles.

Les différents mortiers de réparation ainsi que leurs avantages et inconvénients sont abordés ci-après.

6.1.1 Mortiers de ragréage à base de liants hydrauliques

En 2003, l'UBAtc (l'Union Belge pour l'Agrément technique dans la construction) a établi un classement des mortiers de ragréage à base de liants hydrauliques. L'annexe B du Guide d'agrégation G0007 [40] donne un aperçu de la classification des mortiers de réparation à base de liants hydrauliques. Cette classification doit permettre de choisir le produit le plus adapté, en fonction du cas considéré. Les mortiers sont classés selon leur usage prévu et selon leurs caractéristiques d'application. Pour les travaux de réparation, on utilise le plus souvent les mortiers des catégories I et II.

Il s'agit de mortiers à base de liants hydrauliques auxquels on a ajouté

- soit des polymères,
- soit des produits tels qu'adjuvants, fibres,...
- soit les deux

afin d'améliorer les propriétés du mortier. L'ajout de polymères présente les avantages suivants [39]:

- une compensation du retrait;
- une meilleure résistance à la traction;
- une meilleure adhérence;
- une moins grande perméabilité à l'humidité, au dioxyde de carbone,...;
- une meilleure résistance au gel;
- une meilleure résistance chimique.

Les polymères accroissent toutefois la dilatation thermique, ce qui a pour conséquence d'augmenter les contraintes thermiques.

Les mortiers de réparation à base de liants hydrauliques protègent l'armature en rétablissant l'alcalinité autour de cette armature. Une exigence importante est qu'ils doivent être appliqués sur un support humidifié.

Les mortiers à base de liants hydrauliques modifiés à l'aide de polymères (5-20 % de polymères par rapport à la masse de ciment) sont repris sous l'appellation PCC (Polymer Cement Concrete/mortar, béton polymère ciment), les autres mortiers (< 5 % de polymères par rapport à la masse de ciment) sous l'appellation CC (Cement Concrete/mortar, béton ciment).

Pour les réparations de grandes surfaces, le béton projeté constitue la meilleure méthode. Pour les grands volumes, le bétonnage constitue une bonne alternative. Pour les petits travaux de réparation, les mortiers peuvent être appliqués à la main localement. Le retrait (§ 2.2.3.4) est un phénomène qui se produit toujours lors de l'utilisation de mortiers à base de liants hydrauliques. Surtout lors de l'application sur de grandes surfaces, les précautions nécessaires doivent être prises pour éviter toute fissure inacceptable qui serait due au retrait.

Pour les exigences et les normes d'application dans le domaine des mortiers de réparation à base de liants hydrauliques, il faut se référer au Guide d'agrément et de certification n° G0007 (2002) [28].

6.1.2 Mortiers de réparation à base de résines

Ce sont les mortiers composés d'un composant en résine synthétique (liant principal), d'une charge et d'un ou de plusieurs composants qui ont pour but d'enclencher la polymérisation ou le durcissement (catalyseur, durcisseur, ...). On utilise souvent des résines époxy comme liant avec des amines comme durcisseurs.

En constituant une barrière contre l'eau et l'oxygène, ces mortiers protègent l'armature contre la corrosion. Pour ce faire, ils doivent être placés autour des armatures. Exigence importante: lors de l'application, la surface doit être sèche. Cette exigence est très stricte pour les réparations en extérieur. La pose d'une couche d'adhérence sur la surface est indispensable.

Ces mortiers sont désignés par l'appellation PC (Polymer Concrete mortar, béton polymère). Les résines synthétiques les plus utilisées sont les résines époxy avec de l'amine comme durcisseur mais on utilise également des polyuréthanes et des acrylates. En plus le mortier PC se compose d'additions et de pigments.

Comparés aux mortiers à base de liants hydrauliques, les mortiers à base de résines possèdent une grande résistance mécanique (à la compression et à la traction). De plus, ces caractéristiques sont acquises plus rapidement. Mais d'autre part ils sont caractérisés par un coefficient de dilatation thermique plus important, un module d'élasticité plus petit et un retrait au durcissement plus grand. Ils n'offrent en outre qu'une mauvaise résistance au feu. Les mortiers à base de résines sont surtout utilisés pour des petites réparations locales,

éventuellement en cas d'exposition à des substances chimiques ou pour des ouvrages contenant du ciment sursulfaté.

Les exigences et les normes d'application en matière de mortiers de réparation à base de résines sont décrites dans le Guide d'agrément n° G0013 [33].

6.1.3 Mortier d'égalisation

Un mortier d'égalisation a pour but d'éliminer les inégalités d'une surface en béton et d'obtenir une surface lisse. Cela peut être souhaitable si un revêtement doit être appliqué. Les inégalités peuvent être des défauts (pores, joints de reprise, joints de coffrage, surface brute après réparation du béton,...) ou des attaques physiques ou chimiques qui exposent progressivement les granulats.

On utilise généralement comme mortier d'égalisation un mortier PCC auquel sont ajoutés de fines charges. L'épaisseur d'une couche réalisée avec un mortier d'égalisation varie de 2 à 8 mm, avec une moyenne d'environ 5 mm. Il peut constituer une protection complémentaire pour l'armature.

6.1.4 Autres couches à base de liants hydrauliques

6.1.4.1 Enduit de protection

L'enduit de protection a pour fonction de protéger la surface en béton contre les attaques physiques et chimiques. Il peut être appliqué sur un mortier de réparation ou un mortier d'égalisation et l'épaisseur moyenne de la couche est de 2 mm. Les exigences imposées sont décrites dans la norme NBN EN 1504-2 [32] et dans le Guide d'agrément G0008 [41].

6.1.4.2 Couche de finition

La couche de finition a pour but d'éliminer les irrégularités de la surface provoquées par des bulles d'air. Il peut s'agir d'un mortier d'égalisation ou de tout autre produit composé pour l'occasion.

6.1.5 Aperçu des critères et des propriétés des matériaux

Quelques critères relatifs aux propriétés des matériaux des différents mortiers sont repris dans les Guides d'agrément précités. Pour les méthodes d'essais voir § 7.4.5.1.

Les exigences pour la résistance à la traction par flexion, la résistance à la compression et l'adhérence après 28 jours pour les mortiers de réparation à base de liants hydrauliques sont reprises au Tableau 7.

	Résistance à la compression N/mm ²	Résistance à la traction par flexion N/mm ²	Adhérence N/mm ²
Cat I	30,0	7,0	1,5
Cat II	40,0	8,0	2,0

Tableau 7: Critères (après 28 jours) pour les mortiers de réparation à base de liants hydrauliques (CC/PCC) selon G0007 [28]

Ils existent également des exigences générales imposées au mortier de réparation à base de liants hydrauliques relatives à

- la mise en œuvre;
- la teneur en chlorures;
- le coefficient d'absorption capillaire;

- la résistance aux cycles de gel-dégel;

Quelques exigences spécifiques peuvent être imposées à un mortier de réparation à base de liants hydrauliques vis-à-vis de sa résistance aux sels de déverglaçage ou à la carbonatation ou si le mortier est utilisé comme enduit de protection et/ou de colmatage.

Les exigences pour la résistance à la traction par flexion, la résistance à la compression et l'adhérence pour les mortiers de réparation à base de résines après 14 jours sont indiquées au Tableau 8, où une distinction est faite en catégorie II entre des mortiers à base de métacrylates ou de polyuréthanes (IIa) et des mortiers à base de résines époxy (IIb).

	Résistance à la compression N/mm ²	Résistance à la traction par flexion N/mm ²	Adhérence N/mm ²
Cat I	30,0	7,0	1,8
Cat IIa	40,0	8,0	2,4
Cat IIb	60,0	20,0	3,0

Tableau 8: Critères (après 14 jours) pour les mortiers de réparation à base de résines (PC) selon G0013 [29]

D'autres exigences générales sont imposées au mortier de réparation à base de résines en ce qui concerne

- la mise en œuvre;
- la porosité;
- la durabilité;
- l'identification.

Quelques exigences spécifiques peuvent être imposées à un mortier de réparation à base de résines en ce qui concerne la température de transition vitreuse et le module d'élasticité.

Quelques ordres de grandeur des autres propriétés des matériaux des différents mortiers de réparation comme indiqué dans d'autres publications sont repris au Tableau 9.

	Module d'élasticité kN/mm ²	Traction N/mm ²	Elongation %	Dilatation thermique 1/K
CC	20 - 30	1,5 - 3,5	0	7 - 12*10 ⁶
PCC	1 - 30	2 - 8	0 - 5	8 - 20*10 ⁶
PC	0,5 - 20	9 - 20	0 - 15	25 - 30*10 ⁶

Tableau 9: Aperçu des propriétés des matériaux des mortiers de réparation [39]

6.2 BARBOTINE D'ACCROCHAGE

La surface libérée est généralement rugueuse par la réhabilitation (§ 7.4.1). Pour une bonne adhérence avec le mortier de réparation, une barbotine d'accrochage peut être appliquée. Cette couche contient souvent le même liant que le mortier de réparation.

Les conditions d'application d'une barbotine d'accrochage sont très strictes. Ces conditions sont souvent incompatibles avec les conditions sur chantier. Dans ces circonstances, l'utilisation d'une barbotine d'accrochage peut influencer négativement l'adhérence.

Il existe également des barbotines d'accrochage qui pénètrent dans la surface du béton et améliorent de la sorte la cohésion du béton et l'adhérence de la réparation.

6.3 REVETEMENT DE PROTECTION DES ARMATURES

Une fois l'armature décapée (§7.4.4.2), on doit dans certains cas appliquer un revêtement de protection sur l'armature. Ces revêtements peuvent être les suivants:

- revêtements à base de résines synthétiques réactives (époxy, PU): certains doivent être pourvus d'éléments anti-corrosion;
- revêtements à base d'un liant hydraulique modifié (PCC);
- revêtements à base de zinc.

Le revêtement de protection doit toujours être appliqué en deux couches. Il ne peut pas affecter l'adhérence entre les armatures et le béton ou le mortier de réparation.

Dans le cas de réparations avec des mortiers à base de liants hydrauliques, il est important que les armatures soient enveloppées par le mortier alcalin. En appliquant une couche de protection adéquate sur la barre d'armature avant la pose du mortier, on améliore le contact entre acier et réparation. Si les dégradations au béton ont été causées par la corrosion de l'armature et si l'enrobage après réparation s'élève à moins de 20 mm, il est obligatoire d'appliquer une couche de protection sur l'armature.

Lors de réparations avec des mortiers à base de résines, dès qu'une armature se trouve à nu (suite à la corrosion, chocs,...), l'application d'un revêtement de protection sur celle-ci est obligatoire. En effet dans ce cas, la protection de l'armature par le mortier à base de résines est insuffisante. En pratique le décapage des armatures corrodées est une opération difficilement réalisable. Ce décapage est cependant nécessaire si on veut éviter une poursuite ou une reprise de la corrosion.

Pour les exigences relatives aux revêtements de protection de l'armature contre la corrosion, nous vous renvoyons à l'Annexe A du Guide d'agrément n° G0007 [28] et le Guide d'agrément n° G0011 [38].

6.4 COUCHES DE PROTECTION LIQUIDES POUR LE BETON

6.4.1 Produits d'imprégnation hydrofuges

Dans le cas d'une imprégnation hydrofuge, les pores et capillaires sont tapissés de produit mais ne sont pas entièrement comblés. Ces produits sont généralement utilisés sous forme de gel pour éviter un séchage rapide néfaste à une bonne pénétration du produit. Aucun film n'est formé sur la surface en béton et l'aspect extérieur ne change pas ou peu (Figure 19). Les silanes ou siloxanes sont des exemples de mélanges actifs.

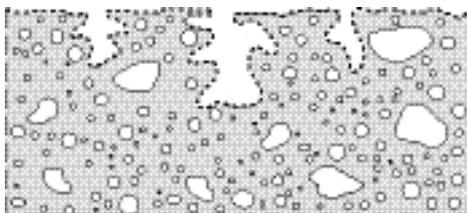


Figure 19: Schéma d'une imprégnation hydrofuge typique [32]

Les produits d'imprégnation hydrofuges agissant par effet tensio-actif, leur efficacité est supérieure sur les surfaces verticales, voire pratiquement inexistante sur des surfaces horizontales (sols).

L'application de produits d'imprégnation hydrofuges sur une surface peut avoir les objectifs suivants:

- une diminution de l'absorption d'eau;
- une diminution de la diffusion de chlorures;
- une augmentation de la résistance aux agents chimiques;
- une diminution des réactions alcalis-granulats;
- un ralentissement de l'encrassement de la surface.

Ces produits doivent être appliqués conformément à leur ATG. Pour les exigences relatives aux produits d'imprégnation hydrofuges et leur application, nous renvoyons à la norme NBN EN 1504-2 [32] et au Guide d'agrément n° G0027 [35].

6.4.2 Produits d'imprégnation de remplissage des pores

Dans le cas d'une imprégnation avec un produit de remplissage des pores, les pores et les capillaires de surface sont partiellement ou totalement comblés (Figure 20). Il en résulte que la porosité superficielle est réduite et que le béton de surface est consolidé. Ces produits peuvent être à base de polymères organiques.

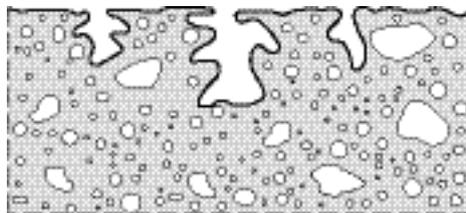


Figure 20: Schéma d'une imprégnation à remplissage de pores typique [32]

L'imprégnation de remplissage de pores d'une surface en béton peut avoir pour objectif:

- une diminution de l'absorption capillaire;
- une amélioration des propriétés de la surface:
- une meilleure résistance à la carbonatation;
- une meilleure protection contre les graffiti;
- une diminution des réactions alcalis-granulats.

Ces produits doivent être appliqués conformément à leur ATG. Pour les exigences relatives aux produits d'imprégnation et leur application, nous renvoyons à la norme NBN EN 1504-2 [32] et au Guide d'agrément n° G0027 [35].

6.4.3 Revêtements (enduits)

Un revêtement de protection peut assurer une meilleure durabilité de la construction en empêchant toute attaque ultérieure. Certains revêtements peuvent parfois remplir d'autres fonctions telles qu'une fonction d'égalisation, décorative, antistatique,

On distingue les revêtements minéraux et ceux à base de résine synthétique où le liant est respectivement hydraulique et polymérique. Un revêtement peut être constitué d'une ou de plusieurs couches. Dans le cas où il y a plusieurs couches, les conventions d'appellation suivantes sont utilisées:

- couche d'imprégnation;
- couche de base;
- couche intermédiaire;
- couche supérieure ou de finition.

La couche d'imprégnation a pour but d'améliorer l'adhérence et/ou la durabilité de l'adhérence avec le support. Elle pénètre dans le support et en réduit la porosité (Figure 21). Les liants peuvent être les suivants: polymères organiques, polymères organiques avec ciment

comme charge ou ciment hydraulique modifié par des polymères organiques. Dans le cadre des réparations de béton, on utilise souvent le terme 'peinture' pour les revêtements à base de polymères.



Figure 21: Schéma d'un revêtement typique [32]

Le revêtement peut remplir différentes fonctions:

- limitation de la vitesse de carbonatation du béton;
- limitation de la pénétration d'eau et de solutions aqueuses en cas de
 - sensibilité au gel et/ou aux produits de déverglaçage;
 - sensibilité aux réactions alcali-silices;
 - exposition aux dépôts acides ou à la condensation, par la pollution de l'environnement;
 - pollution par les chlorures:
 - éviter toute infiltration de chlorures dans le béton;
 - éviter l'infiltration d'eau dans le béton, qui est déjà pollué par des chlorures, pour freiner la corrosion des armatures;
 - ralentissement de la corrosion de l'armature en diminuant la teneur en eau du béton;
- pontage des fissures déjà présentes et à venir. Les revêtements sont à ce propos classés en catégories ([32] et [33]) :
 - B0: Sans aptitude au pontage des fissures
 - B1: Avec aptitude au pontage des fissures de 0,12 mm, seulement sujettes à des variations périodiques d'ouverture saisonnières
 - B2: Avec aptitude au pontage des fissures de 0,12 mm, sujettes à des variations périodiques d'ouverture saisonnières et quotidiennes
 - B3.1: Avec aptitude au pontage des fissures de 0,20 mm, sujettes à des variations périodiques d'ouverture saisonnières et quotidiennes
 - B3.2: Avec aptitude au pontage des fissures de 0,20 mm, sujettes à des variations périodiques d'ouverture saisonnières, quotidiennes et vibrations mécaniques;
- limitation de la pénétration des substances chimiques;
- modification de la teinte du support pour des raisons esthétiques et/ou de sécurité;
- autres: protection contre les graffiti, espaces avec de grandes exigences ('clean rooms').

Pour les exigences relatives à ces revêtements et à leur application, nous renvoyons à la norme NBN EN 1504-2 [32] et à la Guide d'agrément n° G0008 [33] et G0017 [34].

7 REPARATION DES DEGRADATIONS AU BETON

7.1 INTRODUCTION

Ce chapitre aborde les aspects pratiques de la réparation des dégradations du béton (méthodes de traitement, appareils nécessaires, implications pour l'organisation du chantier, préparations,...) et présente de manière détaillée les matériaux utilisés.

7.2 PREPARATION DU CHANTIER

Avant d'entamer les travaux de réparation, les aspects suivants relatifs à la sécurité, à l'inspection, à la préparation du chantier et aux incidences sur l'environnement doivent être pris en considération:

- nuisance acoustique;
- excès de poussière et d'eau;
- outils autorisés;
- échafaudages:
 - accessibilité: pour les habitants, les commerçants;
 - bâchage;
 - petites réparations après leur enlèvement;
- évacuation des matériaux de démolition et des déchets;
- protection des bâtiments proches, de la végétation,...;
- contrôle qualité;
- circulation routière et déviations;
- signalisation routière;
- capacité au niveau électricité et eau;
- câbles, fils concernés par les travaux;
- coffrages de support.

7.3 MESURES DE CONTROLE AVANT ET PENDANT L'EXECUTION

7.3.1 Stabilité

Lors de chaque phase des travaux de réparation, il convient de veiller à ce qu'à aucun moment la stabilité de la partie de la construction à réparer ne soit insuffisante. Lors des travaux de réparation, on enlève souvent du béton et/ou de l'acier, ce qui entraîne des modifications au niveau de la résistance à la traction, à la compression, au glissement et à la flexion de la structure. Il faut considérer la nécessité d'installer des étais ou d'autres consolidations provisoires.

7.3.2 Qualité de la surface

Après la préparation de la surface (§ 7.4.3), celle-ci doit présenter une cohésion de surface correspondant au moins à l'adhérence requise pour le mortier de réparation (§ 6.1.5). Si cette condition semble irréalisable pour le béton de la construction à réparer, la cohésion de la surface doit être au moins équivalente à la résistance à la traction du béton.

Pour une réparation durable, une préparation approfondie et correcte de la surface à réparer est nécessaire (enlèvement du béton altéré, préparation de la surface et armature).

7.3.3 Corrosion de l'armature

Après enlèvement du béton altéré et après avoir décapé l'armature (§ 7.4), cette dernière doit être inspectée. Il convient de déterminer si l'armature est encore capable de reprendre les efforts comme indiqué dans le projet. En cas de diminution de section visible (formation d'écaillage, corrosion), une étude de stabilité doit toujours être réalisée par un ingénieur compétent. Sur base de cette étude, il peut alors être décidé de remplacer l'armature ou de prévoir un renforcement.

7.4 DESCRIPTION DES TRAVAUX

Dans les grandes lignes, une réparation des dégradations au béton s'effectue en trois phases:

- enlèvement du béton qui se détache ou qui est attaqué et décapage de l'armature;
- application des produits de réparation, si nécessaire après l'application d'une couche d'adhérence sur la surface et d'un traitement antirouille autour de l'armature;
- protection et finition.

Il est conseillé de laisser suffisamment de temps (mais pas trop) entre les différentes étapes afin de pouvoir effectuer un contrôle. Les conclusions de ces contrôles doivent être reprises dans le rapport.

Les paragraphes suivants abordent par ordre chronologique les différents éléments des réparations de béton traditionnelles.

7.4.1 Enlèvement du béton non-adhérent ou altéré (réhabilitation)

Un principe général d'une réparation est que le produit de réparation doit être appliqué sur un béton homogène. Le béton dégradé ou altéré et toutes les parties non-adhérent doivent donc être entièrement enlevés jusqu'au béton sain, avec une profondeur de minimum 5 mm (en cas de mortier de réparation à base de liants hydrauliques avec un diamètre de grain maximum de $D_{\max} \geq 2$ mm, jusqu'à une profondeur de $3 D_{\max}$). On doit délimiter les zones à réparer à l'aide d'un trait de scie de 5 mm de profondeur selon une ligne polygonale, de manière à obtenir par la suite une surface réparée bien délimitée. Les raccords en sifflet au bord de la surface à réparer ne sont pas autorisés, de même que les passages abrupts en profondeur et en largeur. La profondeur jusqu'à laquelle le béton doit être enlevé est décrite au § 7.4.2. Pour enlever le béton, les accessoires suivants peuvent être utilisés:

- Outils manuels: marteau, burin, brosse métallique
- Outils mécaniques: marteau pneumatique, marteau à aiguilles. Les brosses métalliques rotatives donnent une surface lisse et ne sont pas autorisées;
- Les jets de sable ou de gravier sont utilisés en dernier recours lors du nettoyage de la surface et pour le décapage de l'armature. Cette méthode génère beaucoup de poussière.
- L'eau à très haute pression (1000 à 2000 bars) peut être utilisée pour enlever des particules et le béton endommagé ainsi que pour décaper les armatures. Cette méthode requiert souvent le matériel nécessaire pour récupérer et évacuer l'eau.

En cas des structures précontraintes, l'équipement utilisé pour le décapage sera adopté afin d'éviter toute blessures aux câbles. Le décapage à la flamme est interdit.

Il faut veiller à ce que ces préparatifs ne perturbent ni l'adhérence entre l'armature et le béton ni la cohésion du béton dans les zones environnantes saines.

7.4.2 Dégagement de l'armature

Si l'armature se trouve dans le béton carbonaté, le béton qui se situe à proximité de l'armature doit être enlevé jusque dans la zone non carbonatée.

La profondeur à laquelle l'armature doit être dégagée dépend du mécanisme de dégradation, du système de réparation et de l'enrobage de béton visé après la réparation. La Figure 22 et la Figure 23 illustrent le cas de la dépassivation des armatures par carbonatation.

Si l'on passe dans le sens longitudinal de l'armature, du béton carbonaté vers le béton non carbonaté, le décapage est réalisé jusque dans le béton non carbonaté et ce, sur une longueur égale au diamètre de l'armature avec un minimum de 20 mm.

- Cas des mortiers à base de liants hydrauliques [28]:
 - Si l'enrobage final après réparation est supérieur à 20 mm et si le périmètre de l'armature se trouve en grande partie dans une zone non carbonatée, l'armature ne doit être dégagée que sur la moitié de la surface d'acier (Figure 23-A)
 - Si l'enrobage final après réparation est supérieur à 20 mm et si le périmètre de l'armature se trouve en grande partie dans la zone carbonatée, l'armature doit être entièrement dégagée jusqu'à au moins 20 mm des deux côtés de l'armature et jusqu'à 10 mm derrière l'armature (Figure 23-B)
 - Si l'enrobage final après réparation se situe entre 10 et 20 mm, l'armature doit être entièrement dégagée (Figure 23-C). Une revêtement de protection sur le périmètre complet de l'armature est obligatoire.
 - Si l'enrobage final après réparation est inférieur à 10 mm, l'utilisation exclusive du mortier de réparation ne peut garantir une réparation durable. Des mesures complémentaires doivent être prises par exemple avec un recouvrement général au mortier, ou avec un revêtement de protection complémentaire sur toute la surface. L'armature doit être entièrement dégagée jusqu'à 10 mm derrière l'armature et jusqu'à 20 mm des deux côtés de l'armature. L'enrobage final ne peut jamais être inférieur à 5 mm.

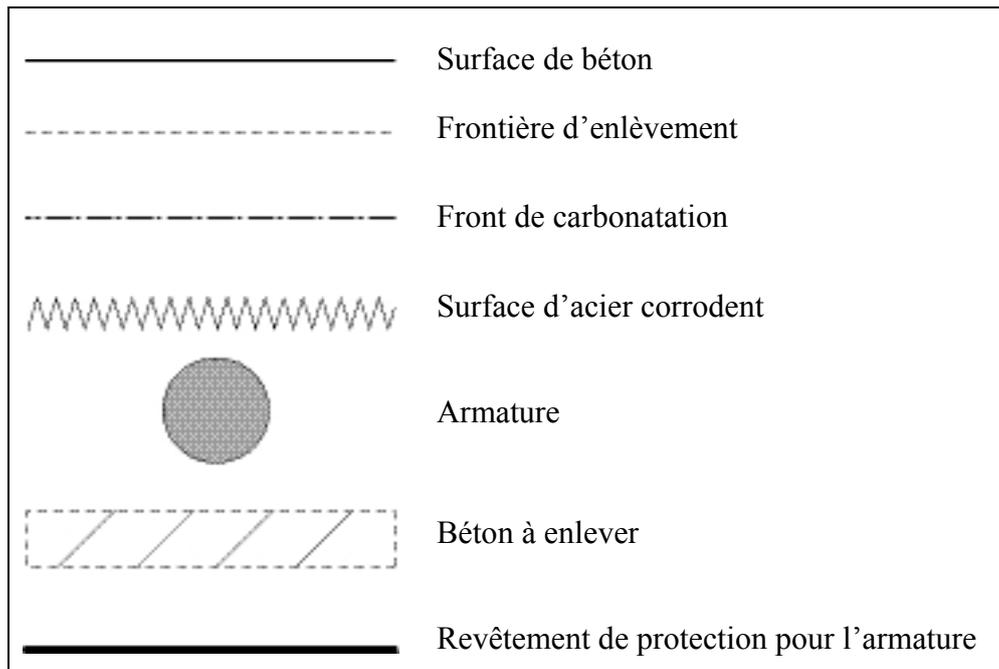


Figure 22: Légende des dessins de Figure 23 [28]

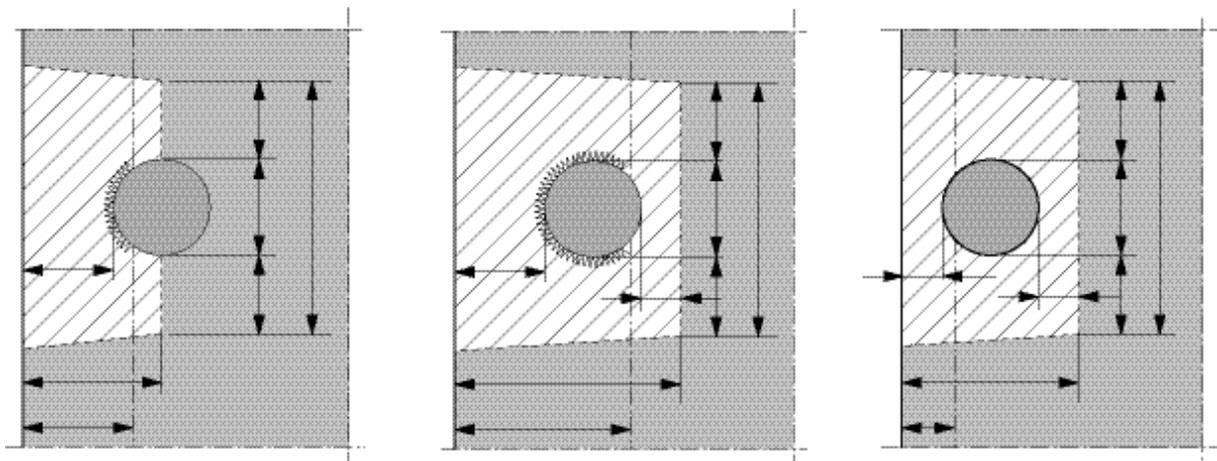


Figure 23: Quantité de béton à enlever dans les différents cas [28]

- Cas des mortiers à base de résines [29]:
 - Si l'enrobage final après réparation est supérieur ou égal à 10 mm, l'armature doit être entièrement dégagée jusqu'à 10 mm derrière l'armature et jusqu'à 20 mm des deux côtés de l'armature.
 - Si l'enrobage final après réparation est inférieur à 10 mm, aucune réparation durable ne peut être effectuée. Des mesures complémentaires doivent être prises, par exemple un revêtement de protection supplémentaire sur toute la surface. Dans tous les cas, l'enrobage doit être de minimum 5 mm. L'armature doit être entièrement dégagée jusqu'à 10 mm derrière l'armature et jusqu'à 20 mm des deux côtés de l'armature.

7.4.3 Préparation de la surface

7.4.3.1 Généralités

Après enlèvement du béton selon le § 7.4.1 il est nécessaire de prévoir une bonne préparation de la surface, pour obtenir une bonne adhérence entre la surface et le mortier de réparation. La qualité de la réparation dépend en grande partie de cette préparation. La surface dégagée doit tout d'abord être nettoyée et rendue rugueuse. Après un traitement adapté, la surface est prête pour la pose du mortier de réparation.

La préparation de la surface à réparer dépend de l'état de l'ouvrage (degré de carbonatation, corrosion des armatures, enrobage du béton, désagréments, teneur en chlorures,...) et du choix de la méthode de réparation (type de mortier de réparation, avec/sans rechargement ou une protection de surface,...). La valeur minimale de la cohésion de la surface est donnée dans l'ATG du mortier de réparation.

7.4.3.2 Assainissement de la surface

Pour la qualité de la réparation il est important d'obtenir une bonne adhérence entre la surface dégagée et le produit de réparation. Il faut enlever de la surface tous les éléments qui peuvent altérer l'adhérence tels que graisse, huile, poussière, laitance, granulats et éventuellement anciens revêtements de protection. Il est également possible d'obtenir une meilleure adhérence en traitant la surface jusqu'à la rugosité souhaitée. Quelques techniques sont disponibles pour nettoyer et rendre la surface rugueuse. Les plus importantes sont décrites ci-après:

- Grenailage: projection d'un produit (scories-billes d'acier) à l'air comprimé. La forme, la dimension et la composition du grain déterminent l'intensité du traitement. Cette méthode génère beaucoup de poussières et de déchets.
- Nébulisation: projection d'un mélange d'eau et d'un abrasif à l'air comprimé. Cette méthode génère moins de poussière et de déchets que la méthode par grenailage. On obtient toutefois des boues à évacuer.
- Jets d'eau à haute pression (500 à 2000 bar).
- Fraisage et bouchardage: traitements de surface mécaniques où des couches de béton sont enlevées à l'aide de ciseaux rotatifs (fraisage) ou de marteaux (bouchardage). Ces méthodes génèrent des micro-fissures en la surface et risquent de diminuer l'adhérence.

Le choix de la technique dépend de la rugosité souhaitée de la surface. Par exemple, pour le renouvellement d'un revêtement de protection, l'ancien revêtement doit être enlevé sans que la surface ne soit trop rugueuse.

7.4.3.3 Traitement de la surface

Un pré-traitement de la surface dégagée est nécessaire pour obtenir une bonne adhérence du mortier de réparation. Une surface non traitée possède un très fort caractère absorbant et risque de pomper l'eau du mortier de réparation. Le pré-traitement requis de la surface dépend fortement du mortier de réparation utilisé.

7.4.3.3.1 Mortiers de réparation à base de liants hydrauliques

L'absorption de l'eau d'un mortier à base de liants hydrauliques est néfaste à son hydratation et à sa résistance et donc à la durabilité de la réparation. En humidifiant au préalable la

surface de manière répétée jusqu'à ce que l'eau ne soit plus absorbée, mais sans toutefois que l'eau ne stagne à la surface, on évite ce phénomène. Cette humidification s'effectue de préférence quelques jours et au moins 2 heures avant la pose du mortier.

De nombreux fabricants prévoient la pose d'une barbotine d'accrochage (§ 6.2) entre le béton et le mortier de réparation. L'expérience montre toutefois que cette couche conduit souvent à une adhérence moindre. Dans la pratique, il apparaît en effet pratiquement impossible de respecter les consignes de traitement (une épaisseur correcte, la pose humide sur humide du mortier de réparation sur la barbotine d'accrochage) dans les détails en raison d'un assèchement trop rapide. Même si l'on utilise une barbotine d'accrochage, il est encore nécessaire d'humidifier la surface avant d'appliquer le mortier de réparation.

7.4.3.2 Mortiers de réparation à base de résines

Dans le cas de travaux de réparation avec des mortiers à base de résines, la surface du support doit généralement être sèche. La teneur en humidité ne peut être supérieure à 60 % du taux de saturation (ce qui équivaut, pour un béton normal, à une teneur en humidité d'environ 4 %, mesuré à l'étuve ou à la bombe à carbure). Un support peut être considéré comme sec lorsqu'une surface fraîche de rupture d'environ de 2 cm de profondeur ne s'éclaircit pas à la suite d'un séchage.

L'utilisation d'une barbotine d'accrochage est obligatoire. Certaines couches d'accrochage ou certains mortiers peuvent être appliqués sur support humide, ce qui est testé dans le programme des essais d'agrément. Dans tous les cas, la pose sur béton mouillé est interdite.

7.4.4 Préparation de l'armature

7.4.4.1 Généralités

Pour que le mortier de réparation puisse être appliqué sur une armature dégagée, cette armature doit être décapée et peut ensuite être pourvue ou non d'une couche de protection. Cette préparation de l'armature dépend du choix de la méthode de réparation (type de mortier de réparation, avec ou sans recouvrement général, avec ou sans protection de surface, ...).

7.4.4.2 Décapage de l'armature

L'armature dégagée doit être décapée jusqu'à un point prévu dans l'ATG du mortier de réparation, pour les mortiers à base de résines, ce point est Sa 2½ ou St 2½. Il est possible que cela ne soit pas aussi simple si l'armature est rouillée sur tout le périmètre ou en cas d'une armaturage dense. Le décapage peut être effectué à l'aide de sablage ou jets d'eau sous pression. Le décapage à la brosse métallique est généralement insuffisant.

7.4.4.3 Protection de l'armature

Si l'on utilise des mortiers à base de résines pour la réparation, il est obligatoire d'appliquer une couche de protection sur l'armature.

Dans le cas de l'utilisation de mortiers à base de liants hydrauliques, cela dépend de

- l'enrobage du béton après réparation;
- la pose ou non d'un recouvrement avec mortier de réparation;
- la pose ou non d'un revêtement de protection supplémentaire sur la surface du béton.

Sans recouvrement général avec du mortier de réparation et sans revêtement de protection complémentaire, les mesures suivantes sont d'application [28]:

- si l'enrobage visé est supérieur à 20 mm, il suffit d'utiliser un mortier de réparation conforme aux prescriptions du Guide d'agrément G0007 [28];
- si l'enrobage visé se situe entre 10 et 20 mm, une couche anticorrosion doit être appliquée sur le périmètre total de l'armature. Il est en effet possible que les caractéristiques dépassivantes des mortiers de ragréage soient insuffisantes;

Si l'enrobage final est inférieur à 10 mm (avec un minimum de 5 mm), un système comprenant un recouvrement de mortier d'égalisation ou un revêtement de protection sur toute la surface et une protection des armatures sont indispensables. Pour être efficace, cette combinaison des produits doit correspondre aux exigences de la notice d'agrément G0011 [33].

Pour les autres situations, nous vous renvoyons au Guide d'agrément G0007 [28].

7.4.5 Pose du mortier de réparation

7.4.5.1 Introduction

Le mortier de réparation doit posséder des propriétés similaires à celles du béton d'origine; si le béton d'origine est un béton de mauvaise qualité, il convient d'analyser la situation. Ce mortier ne doit en outre présenter qu'un léger retrait pour minimiser les tensions internes. Les exigences pour le mortier doivent être spécifiées sans ambiguïté:

- résistance à la compression – NBN EN 12190: 1999;
- résistance à l'adhérence – NBN EN 1542: 1999;
- résistance à la traction – NBN EN 196-1: 2005;
- module d'élasticité - NBN EN 13412: 2002;
- coefficient de dilatation thermique – NBN EN 1770: 1998;
- perméabilité aux chlorures – NBN EN 1015-17: 2000;
- résistance au gel – NBN EN 13687-1: 2002.

Le § 6.1 explique les différents types de mortiers pour travaux de réparation.

Le mortier de réparation ne peut être mise en œuvre en dehors des conditions limites de température (ambiante et béton) reprises dans l'ATG. En règle générale, sauf indication contraire du fabricant, la température doit se situer entre 5°C et 25°C.

Les produits sont livrés en kits prédosés. De règle générale il est interdit de fractionner les conditionnements. Le fractionnement des conditionnements est seulement autorisé dans le cas où l'entrepreneur procède au préalable à l'homogénéisation des conditionnements et qu'il dispose sur chantier de balances précises à au minimum 0,5 % des poids à peser.

La technique de pose et le mortier de réparation sont tous les deux déterminants pour la résistance et la durabilité de la réparation. La projection de mortiers de réparation à base de liants hydrauliques par exemple, donne généralement de meilleures caractéristiques d'étanchéité et d'adhérence qu'une réparation manuelle réalisée avec le même mortier.

7.4.5.2 Epaisseur de la couche

7.4.5.2.1 Mortiers de réparation à base de liants hydrauliques

L'épaisseur du mortier ne peut excéder l'épaisseur maximale prévue par l'ATG, sauf en des zones très localisées. Celle-ci dépend en général de la taille des agrégats utilisés dans le mortier de réparation (diamètre maximal des granulats D_{max}) et s'élève en général à environ

10 D_{\max} . Très localement, des épaisseurs de couche plus grandes sont autorisées par le fabricant. Des épaisseurs plus importantes que l'épaisseur maximale doivent être appliquées en différentes couches. Une couche supplémentaire ne peut être appliquée qu'après durcissement, c'est-à-dire après la fin de prise.

L'épaisseur minimale de couche est indiquée dans l'ATG du mortier de réparation et s'élève généralement à environ 3 D_{\max} .

L'épaisseur nominale de couche est déterminée par le fabricant dans l'ATG.

7.4.5.2 Mortiers de réparation à base de résines

L'épaisseur minimale à appliquer sur le béton est de 2 mm. L'épaisseur de mortier est en général 10 mm et ne peut dépasser 15 mm, sauf en des zones très localisées. En cas de dépassement, les épaisseurs maximales de couche sont indiquées dans l'ATG du mortier. Une couche supplémentaire ne peut être appliquée qu'après durcissement.

Si l'on travaille en plusieurs couches, les délais entre les poses des différentes couches doivent être soigneusement respectés, comme indiqué dans l'ATG du mortier.

7.4.5.3 Techniques de pose

Ce chapitre aborde les différentes techniques de pose possibles:

- la réparation manuelle;
- le coulage;
- la projection (pas d'application pour les mortiers à base de résines).

Pour toutes les techniques de pose, les épaisseurs minimales et maximales spécifiées dans l'ATG du mortier de réparation doivent être respectées, ainsi que les conditions limites de température.

7.4.5.3.1 Pose manuelle

Le mortier de réparation est appliqué à l'aide d'une truelle, serré (par piquage) et lissé à la main. Il est éventuellement possible d'utiliser un coffrage. Cette technique est surtout utilisée pour les petits travaux et si l'armature n'est pas visible.

La consistance du mortier doit être adaptée à la position de l'endroit à réparer (horizontal, vertical ou au plafond), tout en respectant scrupuleusement la quantité d'eau prescrite. En cas de réparations verticales et au plafond, la combinaison de la barbotine d'accrochage et du mortier de réparation peut contribuer à éviter que le mortier ne se détache prématurément. L'application de couches d'accrochage pour les réparations avec des mortiers à base de ciment n'est toutefois pas conseillée (§ 6.2).

La surface obtenue est lissée pour éviter la possibilité d'infiltration d'eau et pour obtenir un bel aspect fini. En particulier, les bords de la réparation doivent être soignés afin d'obtenir une surface sans soudure. Un lissage trop extensif peut altérer l'adhérence de la réparation à son support.

Dans le cas de travaux de réparation manuels, le mortier le plus utilisé est un mortier PCC. Les polymères présents assurent un colmatage aisé et limitent le retrait et l'assèchement [39]. Les mortiers CC peuvent également être utilisés, la mise en œuvre du mortier étant améliorée par l'utilisation de substances telles que les fumées de silice. Leur résistance à la diffusion des chlorures est toutefois limitée. Les mortiers PC peuvent également être utilisés dans les

réparations manuelles. Toutefois, étant donné les grandes différences au niveau mécanique et physique du béton, ils conduisent souvent à des problèmes dans les grandes réparations.

7.4.5.3.2 Coulage

Dans le cas d'une réparation par coulage, le mortier utilisé doit être suffisamment liquide pour pouvoir être mis en œuvre par coulage ou pompage. Un coffrage adapté, étanche au mortier et suffisamment rigide doit également être prévu. Cette technique est généralement utilisée si de grandes surfaces ou de grands volumes doivent être comblés ainsi que dans le cas de constructions avec une armaturage dense.

Généralement cette technique est utilisée pour traiter des grandes surfaces et de grands volumes; dès lors le mortier ne peut pas trop différer, au niveau des propriétés physico mécaniques, du béton sur lequel il est appliqué. Le retrait doit également être limité, ce qui peut être obtenu par l'ajout d'additifs qui le réduisent: en se dilatant durant le durcissement, le mortier compense le retrait.

En raison des risques de ségrégation du mélange, les mortiers de réparation coulés ne sont en général pas vibrés. Il convient toutefois d'être attentif à la désaération du mortier coulé. Toute interruption dans le processus de coulage peut entraîner des infiltrations d'air ou un remplissage incomplet du coffrage.

Grâce à ses propriétés de faible retrait et de grande résistance à la traction, le mortier PCC est le plus souvent utilisé. En cas d'application de grandes quantités, des problèmes peuvent toutefois survenir tels qu'une ségrégation du mélange ou un durcissement prématuré.

7.4.5.3.3 Gunitage

7.4.5.3.3.1 Généralités

Dans cette technique, le mortier est projeté sur la surface à l'aide d'air comprimé (désuilé). Les mortiers utilisés doivent être conformes à la norme pour le béton projeté NBN EN 14487-1: 2006 [30] et au Guide d'agrément G0019 [31]. Les exigences relative à l'exécution sont décrites dans le projet de norme prEN 14487-2 [42].

L'impact sur la surface assure un colmatage parfait ce qui permet d'obtenir un mortier de densité élevée, et donc de faibles absorption et perméabilité à l'eau; tout ceci contribue à la résistance au gel/dégel, à l'apparition de peu de fissures et à une grande résistance à l'usure.

La courbe granulométrique des agrégats dans le mortier est déterminante pour l'aspect final de la surface finale de béton et pour l'épaisseur de la couche à utiliser. Des exigences sont également imposées (D_{max} restreint) à cette courbe en fonction du choix de la méthode de traitement du mortier. Lors de la projection, une partie du mélange projeté rebondit (surtout les plus gros agrégats) ce qui rend le mélange final plus riche en matériaux fins que le mélange sec de départ. Cela donne une meilleure adhérence mais aussi un plus grand retrait qui peut être anticipé par une composition adéquate du mortier (avec polymères). Dans la préparation de la surface, aucune couche d'accrochage n'est nécessaire mais une bonne pré-humidification est primordiale.

Le mortier projeté permet de mettre en œuvre rapidement d'importants volumes et ce à moindres frais. Cette méthode nécessite moins de coffrage et permet d'accéder, à l'aide d'un tuyau, des endroits difficilement accessibles.

Deux méthodes différentes sont applicables, la méthode par voie sèche et la méthode par voie humide.

7.4.5.3.3.2 La méthode par voie sèche [43]

Dans cette méthode, le mortier “sec” est placé dans une cuve de laquelle il est envoyé dans un tuyau souple à l’aide d’air comprimé. Des problèmes peuvent survenir si ce mélange sec présente une teneur en humidité élevée. C’est pourquoi ces mélanges sable-ciment sont généralement livrés sur chantier en silos. Juste avant que le mélange ne quitte le tuyau, de l’eau est ajoutée et la substance obtenue est mélangée dans la tête de projection par un mouvement de tourniquet (Figure 24). La quantité d’eau qui doit être ajoutée dans la tête de projection est importante et doit être parfaitement dosée par un exécutant expérimenté. Cela implique également que le mélange sec soit envoyé à une vitesse constante dans la tête de mélange.

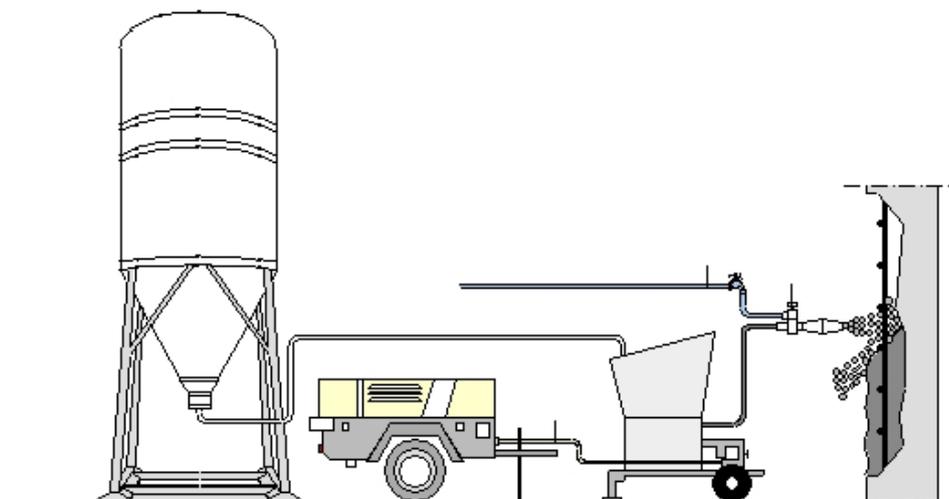


Figure 24: Méthode de projection par voie sèche

Puisque de l’eau et des additifs ne sont pas nécessaires pour le transport ou le traitement du mélange, on peut atteindre avec cette méthode des rapports eau/ciment très faibles (0,30 – 0,35), mais qui ne peuvent pas être définis au préalable de manière très précise. Etant donné le faible rapport eau/ciment, le mélange obtenu ne présente pratiquement pas d’affaissement, ce qui le rend utilisable sur des surfaces verticales et au plafond.

Un inconvénient de cette méthode est que le rebond des agrégats les plus gros lors de la projection est plus important qu’avec la méthode par voie humide. Par contre, la machine utilisée avec cette méthode est particulièrement facile à nettoyer et de grandes distances peuvent séparer la cuve de mélange et la tête de projection (jusqu’à 600 m).

Les mortiers les plus utilisés pour cette méthode sèche sont les mortiers CC traditionnels. L’ajout de polymères au mortier diminue le risque de fissures de retrait (voir § 2.2.3.4). Les mortiers PCC, où les polymères sont ajoutés au préalable (à sec), peuvent être utilisés mais cela peut s’avérer coûteux pour de gros travaux.

Les pompes et têtes de projection actuelles peuvent traiter des mélanges avec des teneurs en humidité jusqu’à 10% et des débits jusqu’à 10 m³/h.

7.4.5.3.3.3 La méthode par voie humide

Cette méthode utilise un mortier mélangé à l'eau avant projection. Le mortier est lentement pompé par un tuyau souple (à l'aide d'une pompe hélicoïdale) pour être projeté, dans la tête de projection, par de l'air comprimé (Figure 25).

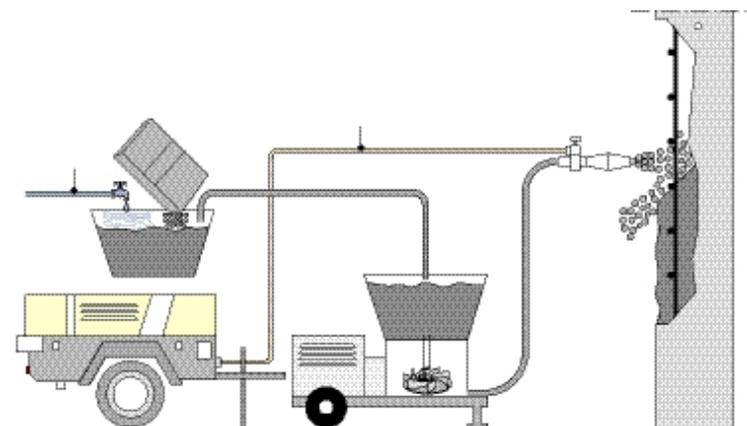


Figure 25: Méthode de projection par voie humide

Cette méthode permet de maîtriser avec précision le rapport eau/ciment et l'utilisation d'un superplastifiant permet d'atteindre des coefficients eau/ciment inférieurs à 0,45. La courbe granulométrique des agrégats doit être choisie de manière à ce que le mortier puisse être pompé facilement et à ce que l'on obtienne le moins de rebond d'agrégats.

Les pompes et têtes de projection doivent pouvoir projeter à une vitesse réglable, régulière et sans à-coups. Pour ce faire, il est conseillé, avant l'utilisation, de faire couler de l'eau dans le système, comme lubrifiant. En cours d'utilisation, le tuyau de transport ne doit pas comporter d'irrégularités et doit être le plus droit possible ou présenter seulement de légères courbes. Toute l'installation doit être nettoyée après chaque application pour éviter toute accumulation de mortier.

Des épaisseurs de couche jusqu'à 150 mm d'épaisseur peuvent être mises en œuvre avec cette méthode, à des débits jusqu'à 25 m³/h, selon le système de pompage.

7.4.5.3.3.4 Remarques générales

La méthode par voie sèche exige davantage de savoir-faire que dans le cas de la méthode par voie humide. Ce n'est que lorsque la machine livre un flux continu de mortier adéquat que le jet de projection peut être dirigé vers la surface à traiter pour décrire un mouvement en forme de boucle. Si des barres d'armature sont visibles, la projection doit être effectuée sous différents angles pour éviter la formation de poches d'air derrière les barres. Pour les surfaces verticales, il convient de commencer par le bas.

Après le traitement, la surface n'est pas lissée car cela peut provoquer des fissures plastiques qui peuvent être néfastes pour le résultat final. Si on souhaite tout de même obtenir une surface finale lisse, on peut utiliser un morceau de bois ou une truelle métallique. Plus les agrégats utilisés sont fins, plus ce sera facile.

7.4.6 Cure

Une fois le mortier mis en œuvre, une cure adéquate doit être appliquée pour garantir une réparation durable. La cure (durée et type) dépend du mortier utilisé.

En cas d'application de mortiers à base de résines, la surface réparée doit être protégée des intempéries. Les mortiers à base de liants hydrauliques doivent être protégés de façon à

prévenir une perte d'humidité. Pour ce faire, la surface peut être conservée humide avec des chiffons imbibés d'eau, ce qui n'est pas toujours possible. Un produit de cure (conforme au PTV 501 [44]) peut être utilisé dans ces cas, mais pas entre deux couches successives de mortier. Si un revêtement de protection est prévu pour la surface réparée, il convient d'en tenir compte dans le choix du produit de cure parce que cela peut influencer l'adhérence.

7.4.7 Egalisation

Dans la plupart des cas, on souhaite obtenir une surface finale lisse après la réparation, pour des raisons esthétiques mais aussi en préparation de la pose d'un revêtement de protection. Cela peut être obtenu grâce à l'utilisation d'un mortier d'égalisation (§ 6.1.3). Comme il s'agit de mortiers à base de liants hydrauliques qui sont posés en très fine couche, une bonne pré-humidification et une cure adéquate sont nécessaires. Si un revêtement de protection doit être appliqué, la couche de base de celui-ci peut servir de produit de cure pour la couche d'égalisation, si cela est techniquement réalisable.

7.4.8 Application d'un revêtement de protection

La surface de béton sur laquelle le revêtement de protection est appliqué, doit être dépourvue de poussière, de boue, de laitance, de bulles d'air, de nids de gravier et de tout ce qui peut altérer l'adhérence. Sauf indication contraire dans l'ATG, la surface doit présenter une texture lisse et si tel n'est pas le cas, il convient d'utiliser un mortier d'égalisation.

Un revêtement de protection est souvent composé de différentes couches (§ 6.4.3):

- couche d'imprégnation;
- couche de base;
- couche intermédiaire;
- couche supérieure ou de finition.

Dans certains cas, une hydrofugation du support par un produit non filmogène peut compléter ou remplacer la couche d'imprégnation (pour garder le béton sec sous la couche d'enduit).

Le revêtement, toutes les données sur les différents produits et les composants, leur fonction et leur traitement sont décrits dans les fiches techniques et l'ATG. En fonction de la protection visée, un système de protection doit être choisi. La capacité protectrice d'un revêtement est notamment déterminée par son épaisseur de couche sèche. Celle-ci doit donc être contrôlée lors de l'application.

Le revêtement de surface peut uniquement être appliqué dans une plage de température qui se situe dans la zone indiquée dans l'ATG du revêtement utilisé. En général, cette zone se situe entre 5°C et 30°C. La quantité à appliquer peut varier en fonction des prestations souhaitées.

Le revêtement doit être appliqué de manière régulière de manière à ce que

- l'épaisseur moyenne soit supérieure ou égale à l'épaisseur minimale,
- les valeurs individuelles de l'épaisseur se situent entre l'épaisseur minimale et maximale indiquées dans l'ATG.

7.5 POSSIBILITES DE CONTROLE

Lors de l'exécution des travaux de réparation, des possibilités de contrôle doivent être prévues à différents moments. Il est toutefois absolument indispensable que le maître d'ouvrage et l'entrepreneur conviennent, avant le début des travaux, quand ces contrôles seront effectués, par qui et de quelle manière ils seront évalués. L'aperçu ci-dessous (Tableau 10) explique

quelques éléments de contrôle. Puisque toute réparation de béton est soumise aux conditions spécifiques du chantier, cet aperçu doit être considéré uniquement à titre informatif. D'autres contrôles peuvent être nécessaires le cas échéant.

Lors du contrôle des propriétés mécaniques (par ex. l'adhérence), il convient de tenir compte du fait qu'une température ambiante inférieure donne lieu à un développement plus lent de la résistance.

Les résultats de ces contrôles doivent être consignés dans le rapport des travaux. Sauf convention contraire, les travaux ne peuvent être poursuivis qu'après acceptation du contrôle par les parties concernées.

Moment	Contrôles
Après l'installation du chantier	Possibilité de contrôle des paramètres qui sont à la base du choix de la méthode de réparation (dégradations visibles, profondeur de la carbonatation, ...) à des endroits qui n'étaient pas accessibles durant l'inspection Confirmation provisoire du diagnostic de l'étude préalable
Après le nettoyage et l'enlèvement du béton, le dégagement de l'armature,...	Contrôle de l'étendue du décapage Contrôle de la cohésion du béton Contrôle de l'armature et de l'enrobage Contrôle et confirmation définitive du diagnostic Mesure des quantités à réparer
Après la pose du mortier	Contrôle de la planéité Après 28 jours: contrôle des fissures, des détachements et de la résistance à l'adhérence
Pendant et après la pose de la couche de protection	Pendant les travaux: contrôle de l'épaisseur de la couche avant durcissement Après séchage: contrôle de l'épaisseur de la couche et de son adhérence Contrôle de l'aspect extérieur et de la continuité du film Contrôle de la consommation
Après les travaux	Rapport de synthèse des travaux réalisés (énumération des points) avec mention des motivations et des modifications du projet original (déjà approuvées et consignées durant l'exécution des travaux) et résultats des contrôles réalisés Suggestions pour l'entretien

Tableau 10: Contrôles et leur moment d'exécution

8 TECHNIQUES SPECIALES

8.1 TECHNIQUES ELECTROCHIMIQUES ANTICORROSION

8.1.1 Généralités

8.1.1.1 *Domaine d'application*

La technique traditionnelle de réparation des dégradations du béton provoquées par la corrosion de ses armatures consiste à décaper le béton au delà des zones altérées (donc également élimination des bétons carbonatés ou contaminés de chlorures et en contact avec des armatures) et à le reconstituer au moyen d'un mortier. Dans certains cas, cette méthode peut provoquer des nuisances (bruit, déchets) et s'avérer onéreuse. En outre, en cas d'une pollution du béton par des chlorures, la durabilité d'une telle réparation est rarement assurée en raison de la quasi impossibilité d'éliminer totalement ces chlorures.

Quelques techniques de traitement électrochimiques sont appliquées depuis les années '70 [45]. A l'aide d'un courant électrique, elles protègent l'armature contre la corrosion. Les techniques électrochimiques les plus connues sont:

- protection cathodique (PC);
- extraction des chlorures (CE);
- réalcalinisation (RE).

Les deux premières méthodes conviennent surtout à la corrosion initiée par les chlorures.

Ces techniques autorisent un décapage moins poussé que dans les procédés traditionnels. En effet, seuls les éléments de béton détachés demandent à être éliminés (§ 8.1.1.6).

Les techniques électrochimiques ne sont actuellement que peu appliquées. Une étude préalable spécifique (§ 8.1.1.4) est nécessaire pour s'assurer qu'elles sont applicables et qu'elles garantissent des résultats durables. La conception et l'exécution de ces méthodes doivent toujours être assurées par des personnes ou des organisations spécialisées compétentes.

8.1.1.2 *Principe*

Les trois méthodes (PC, CE, RE) ont un principe de fonctionnement similaire mais présentent des différences au niveau de la durée du traitement, de l'intensité du courant appliquée et des produits chimiques utilisés. Le principe de ces trois méthodes est schématisé à la Figure 26.

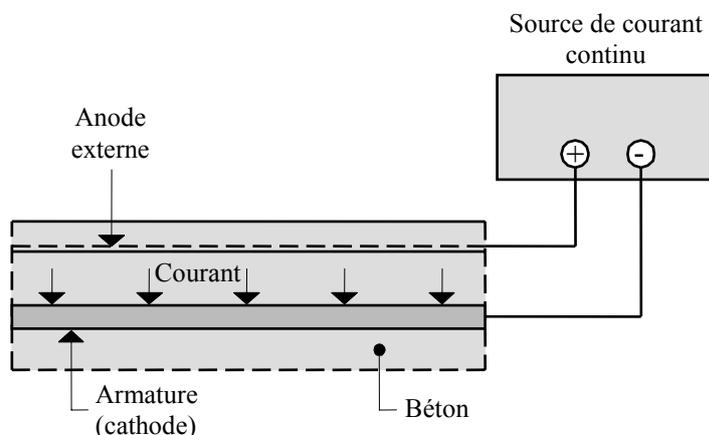


Figure 26: Présentation générale des techniques électrochimiques anti-corrosion

Un système d'anode externe, appliqué sur la surface du béton, est relié au pôle positif d'une source de courant continu. L'armature est reliée au pôle négatif, ce qui permet de générer un courant électrique allant de l'anode vers l'armature.

8.1.1.3 Systèmes d'anode

Le système d'anode doit garantir une répartition uniforme du courant dans les armatures à protéger. La distance minimale conseillée entre l'anode et l'armature est de 10 mm. Des distances plus petites ne permettent pas de garantir une distribution du courant uniforme et augmentent le risque de court-circuit entre les deux. Dans certains cas, les anodes sont dédoublées en anodes primaires dont le but est d'injecter le courant électrique dans la structure et les anodes secondaires qui répartissent uniformément le courant dans les armatures.

Les systèmes d'anode les plus courants sont les suivants:

- treillis métalliques recouverts d'un mortier à base de liants hydrauliques;
- fils métalliques (anode primaire) recouverts d'un mortier conducteur à base de liants hydrauliques modifiés (anode secondaire);
- fils métalliques (anode primaire) recouverts d'un revêtement organique conducteur (anode secondaire);
- câbles ou bandes métalliques, placés dans des creux de la surface du béton;
- pour la réalcalinisation et l'extraction des chlorures, dont la durée de traitement est limitée, un treillis d'armature en acier peut suffire. Il est noyé dans une pâte ou un gel conducteur.

Les anodes doivent présenter une résistance élevée aux acides. Les matériaux métalliques à utiliser pour ce faire sont le niobium platiné, le titane platiné et le titane recouvert d'oxydes de métal. Un exemple est présenté à la Figure 27.



anodesystemeem.jpg

Figure 27: Un système d'anode

Le système d'anode doit être choisi de manière à obtenir un bon déroulement du traitement. Par exemple, pour un système basé sur des fils en titane avec revêtement organique conducteur, la capacité (l'intensité maximale autorisée de courant anodique) est inférieure à celle des systèmes basés sur des treillis en titane avec mortier.

L'augmentation du poids et la modification de l'aspect extérieur de la construction par le système d'anode doivent également être permises. Un revêtement organique conducteur contient par exemple du carbone et est donc noir. On y ajoutera généralement un revêtement esthétique.

8.1.1.4 Etude préalable

L'utilisation d'un traitement électrochimique anticorrosion doit être précédée d'une étude d'identification de la structure, de ses défauts, de ses dégradations et de son environnement. A partir de cette étude, on peut déterminer la technique la mieux adaptée à la structure.

Cette étude est une extension de l'étude préalable (Chapitre 3) dont quelques données concernant les techniques électrochimiques sont connues (résistivité électrique du béton, profondeur de carbonatation, enrobage de béton, profil de chlorures, ...). Elle doit également être complétée par quelques examens spécifiques:

- détection et suppression des infiltrations d'eau anormales;

- contrôle de la continuité électrique des armatures. Pour ce faire, on mesure la résistance électrique (sous courant continu) entre n'importe quelle paire d'armatures dégagées et en particulier entre les deux points extrêmes de la zone traitée. Les résistances mesurées doivent être stables et inférieures à 1Ω [46];
- vérification de l'absence de risque de formation d'une réaction alcalis-granulats suite à la formation d'ions hydroxyle autour des armatures (§ 2.2.2.1).

8.1.1.5 Zonage

La surface à traiter doit être divisée en zones anodiques d'égale résistivité superficielle. Celle-ci est fonction de l'humidité du béton, du type de ciment utilisé, du niveau de pollution par des chlorures,... Chacune de ces zones sera traitée par sa propre source de courant continu. Une zone présentant une résistance 10 x moindre sera parcourue par 10 x plus de courant. La taille des zones anodiques généralement utilisée dépend de la technique électrochimique retenue.

8.1.1.6 Préparations

La surface du béton doit être préparée avant la pose du système. Les éléments qui pourraient perturber le traitement électrochimique doivent être éliminés:

- impuretés;
- béton non-adhérent;
- anciennes réparations, réalisées avec des mortiers de réparation présentant une résistivité électrique trop élevée;
- fissures d'une ouverture de plus de 0,3 mm;
- particules métalliques;
- armatures à nu.

Une réparation traditionnelle de béton peut précéder le traitement pour obtenir une surface physiquement saine. Pour ce faire des matériaux à base de ciment doivent être utilisés. Ils doivent avoir une résistance électrique comparable à celle du béton (entre 50 et 200 %). Aucun revêtement de protection ne peut être appliqué sur l'armature.

Des électrodes de référence sont placées aux endroits où la corrosion est la plus attendue ou déjà active. Ces électrodes permettent de réaliser des contrôles pendant et après le traitement. Un minimum d'une électrode de référence est prévu par zone anodique.

8.1.1.7 Effets secondaires

Les processus chimiques qui se déroulent durant l'exécution des méthodes de protection électrochimique peuvent également entraîner des effets secondaires néfastes:

- lorsque le potentiel de l'acier est fortement réduit par polarisation (jusqu'à < 1000 mV SCE), il y a formation d'une couronne d'ions hydrogène autour de l'armature. Ceux-ci peuvent entraîner, dans le cas d'acier précontraint, la fragilisation des armatures. En conséquence on limitera le potentiel à -900 mV SCE pour les armatures précontraintes et à -1100 mV SCE pour les armatures passives (NBN EN 12696 [46]);
- une augmentation de l'alcalinité peut, en présence d'agrégats qui y sont sensibles, générer des réactions alcali-granulats (voir § 2.2.2.1);
- de fortes intensités de courant peuvent entraîner une augmentation de la température de l'armature. Cela peut générer des fissures et conduire à des modifications de l'adhérence acier-béton;

- des acides sont produits à l'anode. Ils peuvent être nuisibles à l'homme (gaz chloré) ou à la surface de séparation anode/béton.

8.1.2 Protection cathodique

8.1.2.1 Généralités

La technique de la protection cathodique (PC) a été appliquée au départ pour protéger les constructions métalliques de la corrosion. Cette méthode de protection peut toutefois également être utilisée pour protéger le béton armé contre la corrosion de l'armature. Dans le cas de la corrosion initiée par des chlorures, cette technique peut offrir une solution durable, contrairement à la méthode de réparation traditionnelle. Cette protection doit être appliquée de manière permanente pendant toute la durée de vie de la construction. La protection cathodique des structures en béton armé est décrite dans la norme NBN EN 12696 [46] et le Guide d'agrément G0016 [48].

La protection cathodique est surtout appliquée aux structures telles que les tabliers et les piles de ponts, les parkings, les piscines,....

D'un point de vue thermodynamique, la protection cathodique consiste à amener le potentiel de l'acier dans une zone où la dissolution est impossible (immunité). Dans le cas de béton armé, afin d'éviter le dégagement d'hydrogène pouvant provoquer la fragilisation de l'acier, elle consiste à amener le potentiel de l'acier dans une zone où la dissolution est très limitée (passivation parfaite).

La Figure 28 montre l'évolution de protection et de prévention cathodiques [46, 47]. Les valeurs de E_{pit} et E_{prot} dépendent des conditions ambiantes (teneur en chlorures, humidité, température,...). Dans le cas d'une pollution par des chlorures infiltrés (1 → 4) où la corrosion a déjà commencé (zone A), l'armature peut être protégée en amenant le potentiel de l'acier en zone C (4 → 5) où la corrosion ne peut plus se propager (protection cathodique). Afin d'éviter la formation d'hydrogène, le potentiel ne peut pas être trop abaissé.

La prévention cathodique (1 → 2 → 3, Figure 28) permet de protéger les structures contre une corrosion par les chlorures grâce à une diminution moindre du potentiel.

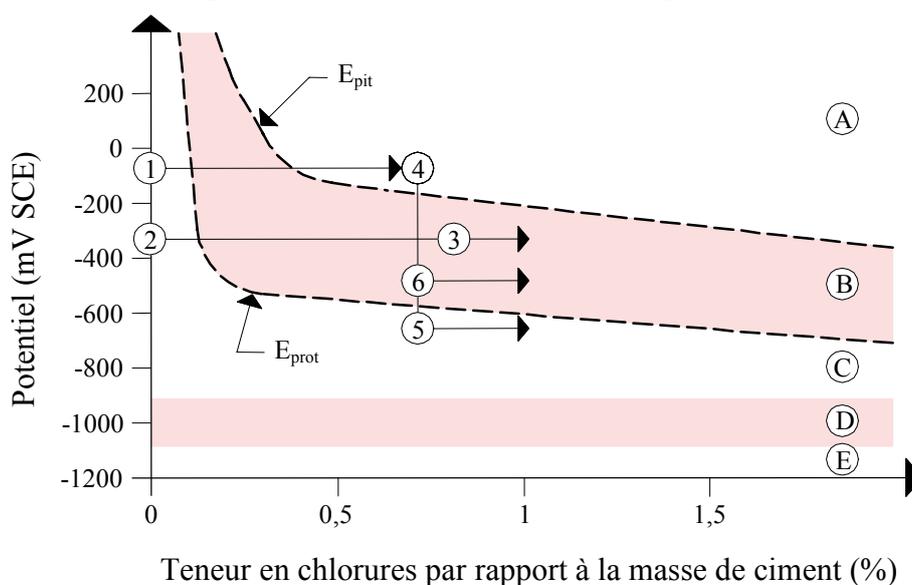


Figure 28: L'évolution de la protection et de la prévention cathodiques en présence de chlorures [46, 47]

Il existe deux types de protection cathodique (PC):

- par courant imposé;
- par anodes sacrificielles.

Dans le cas de **PC par courant imposé**, le pôle négatif d'une source de courant est connecté à l'armature (cathode) et le pôle positif à un matériau conducteur insensible à la corrosion, appliqué sur ou dans la surface de béton (anode externe). Ce dispositif génère un courant électrique continu qui part de l'anode, parcourt le béton et aboutit à la cathode. Le potentiel de l'armature s'en trouve abaissé.

Dans le cas de **PC par anodes sacrificielles**, un métal moins noble que le fer (par ex. zinc ou aluminium) est mis en contact direct avec l'acier d'armature. Il se forme de la sorte une cellule galvanique où le béton joue le rôle d'électrolyte et où le métal le moins noble est dissous (il se sacrifie) tandis que l'autre gagne des électrons, ce qui abaisse le potentiel de l'armature. Etant donné les faibles tensions galvaniques provoqués et la résistivité électrique généralement élevée du béton « sec », cette méthode ne peut être utilisée que pour protéger des structures enterrées ou submergées (où une teneur en humidité plus élevée réduit la résistivité électrique). Les anodes sacrificielles ont une durée de vie limitée.

8.1.2.2 Paramètres

Les zones anodiques sont généralement choisies entre 50 et 100 m². La tension d'alimentation doit toujours être inférieure à 50 V CC, en cas de danger pour l'homme et les animaux, elle doit même être inférieure à 24 V CC. Le système est conçu de manière telle (taille des zones anodiques, tension ou courant imposés,...) que l'on obtienne une intensité de 0,2 à 20 mA/m² de surface d'acier et typiquement de 10 mA/m² [46, 48].

8.1.2.3 Contrôle et critères

Le fonctionnement du système peut être vérifié à tout moment par un contrôle des courants et des tensions d'alimentation de chaque zone anodique.

Les électrodes de référence permettent de vérifier l'efficacité du traitement. Le système constitue une protection suffisante pour les armatures si une des exigences suivantes est satisfaite [46] (Figure 29):

- un potentiel acier/béton "instant-off" ($E_{\text{instant off}}$, mesuré entre 0,1 s et 1 s après coupure du circuit en courant continu) inférieur à -720 mV par rapport à une électrode Ag/AgCl/0,5 M KCl;
- décroissance du potentiel ΔE_{cor} pendant une période maximale de 24 h d'au moins 100 mV à partir de la coupure;
- décroissance du potentiel pendant une longue période (typiquement 24 h ou plus) d'au moins 150 mV à partir du courant coupé.

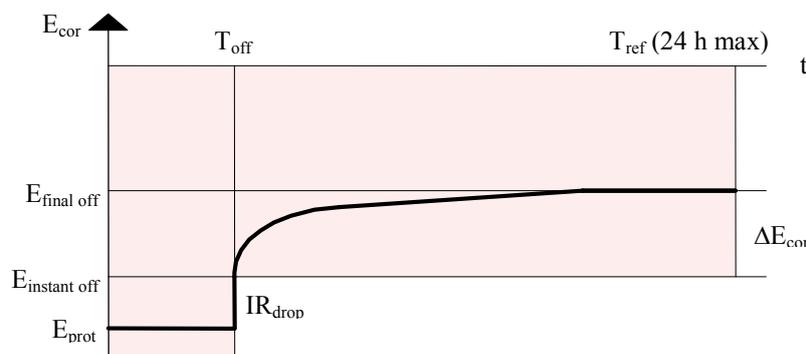


Figure 29: Critères pour la protection cathodique ($\Delta E_{\text{corr}} > 100 \text{ mV}$) [48]

Aucun potentiel acier/béton à courant coupé inférieur à -1100 mV par rapport à $\text{Ag}/\text{AgCl}/0,5\text{M KCl}$ ne doit être admis pour les aciers simples des armatures du béton ou à -900 mV pour les aciers de précontrainte.

Cette mesure et d'autres (température, humidité relative) doivent être effectuées une fois tous les trois mois pendant la première année et une fois tous les 6 à 12 mois au cours des années suivantes. Cela peut être réalisé par un contrôle à distance (télégestion). Il est conseillé de procéder au moins une fois par an à un contrôle de l'installation in situ.

8.1.3 Extraction des chlorures

8.1.3.1 Généralités

L'extraction des chlorures peut être appliquée à des structures où l'on constate la présence de corrosion initiée par des chlorures provenant de l'environnement. Les structures où les chlorures ont été ajoutés lors du gâchage du béton ne peuvent être traitées par ce procédé. Ce traitement n'a pas d'effet notable sur les chlorures se trouvant à l'arrière des armatures. Une description de l'extraction de chlorures est donnée dans le projet de norme prTS 14038-2 [49].

Comme anode externe, on utilise le plus souvent des treillis en titane, avec pour électrolyte une substance aqueuse. De l'eau de ville ou de l'hydroxyde de calcium peuvent être utilisés comme électrolyte, par exemple dans des bassins ou dans une pulpe aqueuse qui peut être projetée sur des surfaces.

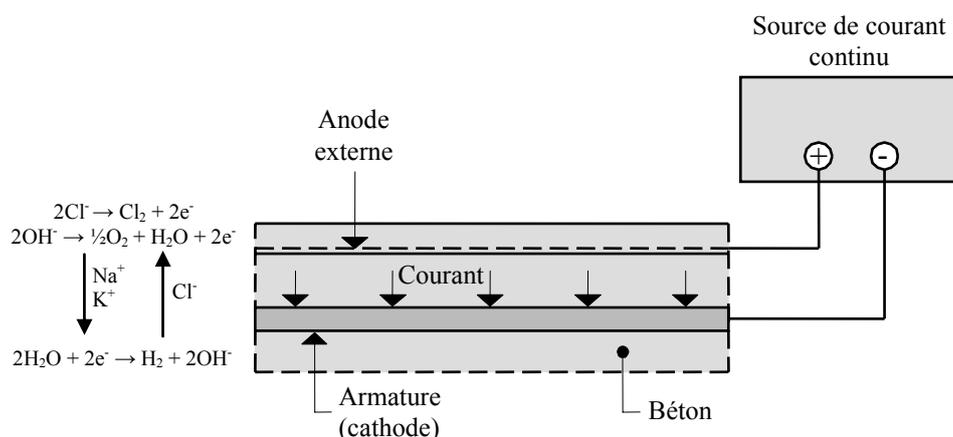


Figure 30: Schéma de l'extraction électrochimique de chlorures

Sous l'effet du courant, les ions chargés négativement présents dans les pores, dont les chlorures, migrent de l'armature vers la surface du béton. L'importance de ce phénomène

dépend de la densité de courant ainsi que de la concentration et de la mobilité des ions. En même temps, des ions hydroxyles se forment autour de l'armature, rendant le béton plus alcalin.

Après le traitement, le matériau peut être enlevé simplement et la surface originale du béton n'est pas altérée par le traitement. Cette méthode est donc particulièrement adaptée pour le traitement de bâtiments avec une valeur architecturale particulière, comme des monuments protégés.

8.1.3.2 Paramètres

Chaque zone anodique est définie de manière à fournir une densité de courant uniforme à l'armature. Généralement, une zone anodique ne dépasse pas 30 m² ou est parcourue par une intensité inférieure à 100 A [49]. Pour des raisons de sécurité, la tension d'alimentation ne peut pas dépasser 50 V CC. Le courant d'une densité de 1 A/m² de surface d'acier est appliqué pendant quelques semaines ou quelques mois. Un maximum de 10 A/m² est respecté pour éviter toute désolidarisation dans la surface de contact acier-béton.

8.1.3.3 Contrôle et critères

Pendant le traitement, une inspection de routine doit être effectuée quotidiennement. Au cours de cette inspection, les tensions et courants d'alimentation sont notés et l'électrolyte est vérifié (avec appoint éventuel). Le courant total (A.h/m²) est également évalué. Il est également conseillé de déterminer la teneur en chlorures aux endroits pour lesquels les données sont déjà connues afin de vérifier l'efficacité du processus d'extraction.

Le traitement est arrêté lorsqu'on a atteint le profil et la concentration en chlorures souhaités (par ex. maximum 0,4 % de chlorures non liés par rapport à la masse de ciment [49] à proximité immédiate de l'armature). Dans le projet de norme prTS 14038-2 [49], il est mentionné qu'en raison de la nature inégale des bétons (types de ciment, enrobages,...), aucune corrélation n'existe entre l'extraction et les mesures électriques.

8.1.4 Réalcalinisation

Cette méthode a pour but d'augmenter le pH du béton carbonaté au voisinage des armatures, ce qui permet de rétablir la couche de passivation protectrice autour des aciers.

Comme anode externe, on utilise le plus souvent des treillis en acier ou en titane. Des fibres cellulosiques y sont appliquées et sont imprégnées d'un électrolyte alcalin comme le Na₂CO₃ 1M [50]. Un courant électrique amène les substances alcalines dans le béton alors que dans le même temps, des substances alcalines (OH⁻) sont également formées par électrolyse à la surface de l'armature. La norme NBN CEN/TS 14038-1: 2005 [51] traite de la réalcalinisation du béton armé. La densité du courant ne peut pas dépasser 4 A/m² et est appliquée pendant 100 heures au minimum.

La réalcalinisation est liée à la densité de courant et à l'intégrale de la charge sur le temps. Le traitement s'arrête généralement lorsqu'une charge de 200 A.h/m² a été fournie aux armatures, ce qui correspond à des durées de traitement d'environ 8 jours lorsque la densité est de 1 A/m². L'efficacité du traitement doit être démontrée au moyen de mesures de pH (avec la phénolphthaléine ou la thymolphthaléine) dans chaque zone anodique [50, 51].

Après le traitement, le treillis et la pâte peuvent être enlevés et la surface originale du béton n'est pas altérée par le traitement. Cette méthode est donc adaptée pour le traitement des bâtiments avec une valeur architecturale particulière, comme des monuments protégés.

La réalcalinisation étant très peu appliquée, nous ne nous y attarderons dès lors pas davantage.

8.2 LUTTE CONTRE LA CORROSION PAR DES INHIBITEURS

8.2.1 Domaine d'application

Les inhibiteurs de corrosion devraient avoir une action ralentissante sur la corrosion des armatures dans le béton. Ils peuvent être mélangés de manière préventive dans le béton frais ou être introduits par après à la surface pour réparer une construction avec armatures corrodées. Leur utilisation comme additif dans du béton frais est bien mieux documentée que leur application comme méthode de réparation.

Nous n'aborderons que l'usage des inhibiteurs comme méthode de réparation.

Comparée à d'autres méthodes de réparation, l'utilisation d'inhibiteurs présente des avantages évidents, comme un moindre coût et de plus faibles nuisances. Ils peuvent être appliqués dans les circonstances suivantes:

- comme réparation quand la corrosion des armatures a déjà commencé mais qu'une réparation structurelle n'est pas nécessaire. Les inhibiteurs à appliquer à la surface du béton permettent alors de ne pas devoir enlever et remplacer le béton;
- en complément aux systèmes de réparation traditionnels, comme les revêtements anti-corrosion des armatures;
- comme composant du mortier ou béton de réparation (à ajouter à l'eau de gâchage).

Dans le premier cas, l'inhibiteur constitue une méthode de réparation en soi alors que dans les autres cas, il fait partie d'une autre méthode de réparation.

8.2.2 Limitations

Comme déjà mentionné, l'application des inhibiteurs comme méthode de réparation à la surface d'une construction corrodée est bien moins documentée que leur application comme additif au béton. Cela est dû au fait que l'application comme méthode de réparation présente différentes difficultés:

- l'inhibiteur doit d'abord pénétrer dans les pores et capillaires du béton et atteindre l'armature avec un dosage requis pour être efficace. De plus, la teneur en inhibiteur requise sur l'armature dépend de la concentration locale en chlorures. Un dosage correct de l'inhibiteur à la surface est par conséquent très difficile voire impossible.
- les inhibiteurs peuvent se composer de plusieurs éléments. Ces composants peuvent se comporter de manière différente lors du transport dans le béton. Certains peuvent se lier chimiquement à des composants du ciment et devenir indisponibles [45].
 - on peut dès lors rencontrer de grandes différences de concentration des inhibiteurs au niveau de l'armature. Là où la concentration d'inhibiteurs présents est trop faible, l'armature peut se corroder plus rapidement.
- les inhibiteurs dans le béton peuvent être lixiviés, quelle que soit la manière dont ils se sont infiltrés. Pour ces raisons, l'utilisation de nitrites comme inhibiteur de corrosion est interdite pour des constructions en contact avec de l'eau potable.
- c'est la concentration à obtenir au niveau des armatures qui est spécifiée et non un volume de solution à appliquer par m² de béton. Des moyens fiables sont nécessaires pour démontrer que ces concentrations sont réellement obtenues et maintenues pendant un temps suffisamment long. Actuellement, il n'existe pas de méthodes analytiques permettant de mesurer la concentration en inhibiteur. Une

analyse correcte est également rendue plus difficile si certains composants de l'inhibiteur sont liés à d'autres éléments du béton.

8.2.3 Matériaux

8.2.3.1 Nitrites

L'utilisation de nitrites de calcium comme inhibiteur de corrosion pour les applications de réparation est restée assez limitée jusqu'à présent, alors qu'elle a déjà fait l'objet d'études approfondies comme adjuvants au béton. Les expériences montrent que le nitrite de calcium est efficace avec peu de chlorures et de faibles vitesses de corrosion. Aucun résultat à long terme n'est cependant disponible.

Un inconvénient des nitrites est qu'ils sont toxiques.

8.2.3.2 Monofluorophosphate de sodium (Na_2PO_3F , MFP)

Le MFP ne peut pas être utilisé comme adjuvant dans du béton frais car il réagirait avec les ions de calcium pour donner du phosphate de calcium. Cet inhibiteur peut uniquement être utilisé sur du béton durci, sur des structures qui commencent à se corroder en raison de la carbonatation, sans dégradation visible; ils n'ont aucune influence sur le béton attaqué par les chlorures [45].

Des concentrations très élevées et des temps de traitement très longs sont nécessaires pour réduire significativement la corrosion.

8.2.3.3 Inhibiteurs organiques

Les inhibiteurs organiques commercialisés sont composés d'amines, d'alcanolamines, de sels avec des acides organiques et inorganiques et des émulsions d'esters, d'alcools et d'amines. Le mécanisme d'action de ces inhibiteurs organiques se ferait par absorption sur la surface du métal, résultant en la formation d'un film organique sur la surface d'acier.

Des essais avec des inhibiteurs organiques, avec différentes concentrations de chlorures, n'ont donné jusqu'à présent aucune preuve de leur efficacité. Il en va de même pour le béton carbonaté [45].

8.3 INJECTION DE FISSURES

8.3.1 Domaine d'application

Une des fonctions les plus importantes de l'enrobage du béton est la protection des armatures. Tout béton armé est fissuré. Pour autant que l'ouverture, la profondeur et la répartition de ces fissures restent dans certaines limites, en rapport avec l'agressivité de l'environnement, il s'agit d'un phénomène normal et l'armature est suffisamment protégée [13]. Des erreurs de conception ou d'exécution peuvent par contre entraîner des fissures plus importantes dans le béton.

L'ouverture la plus faible de fissures qui peut être remplie par une injection d'un coulis, doit être spécifiée par le fabricant. Les valeurs suivantes sont proposées dans la norme NBN EN 1504-5: 2005 [37]: 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm, 0,5 mm, 0,8 mm.

Avant l'injection, la cause de la formation des fissures doit être éliminée et la fissure doit être stabilisée (par ex. après le retrait). En cas de fissures actives avec une variation d'ouverture supérieure à 10%, l'injection ne convient pas [52]. La fissure peut dans ce cas éventuellement être transformée en joint.

L'injection des fissures peut être appliquée aux fins suivantes:

- la réparation de l'étanchéité de la construction;
- l'empêchement de l'infiltration de substances agressives dans le béton qui peuvent provoquer la corrosion de l'armature;
- la restitution des propriétés mécaniques du béton.

Dans certains cas, cette méthode est également appliquée pour des raisons esthétiques. La méthode est utilisée selon les Principes 1 et 4 du Tableau 5. Pour l'injection des vides dans le béton, les mêmes considérations sont d'application que pour les fissures.

8.3.2 Coulis d'injection

Pour les coulis d'injection, la viscosité, la réactivité et le comportement en présence d'eau sont des propriétés déterminantes de l'adéquation de ce matériau à une application particulière. On distingue les matériaux d'injection à base de résines synthétiques et ceux à base de liants hydrauliques:

- à base de résines:
 - résine époxy, d'une viscosité de 50 à 1000 mPa.s;
 - résine polyuréthane, d'une viscosité de 200 à 300 mPa.s;
 - résines qui forment un gel à base d'acrylamide ou de polyuréthane, avec une viscosité inférieure à 10 mPa.s;
- à base de liants hydrauliques d'une très grande finesse.

Le coulis d'injection doit résister à d'éventuelles variations de l'ouverture de la fissure, tant durant l'injection que lors du durcissement. Les matériaux d'injection sont classés selon leur application (U) et leur ouvrabilité (W) [37].

8.3.2.1 Application (U)

Dans la classification, la lettre U est toujours donnée en premier, suivie d'une lettre entre crochets:

- F: remplissage des fissures pour transfert des forces
 - F1: résistance à l'adhérence $> 2 \text{ N/mm}^2$
 - F2: résistance à l'adhérence $> 0,6 \text{ N/mm}^2$
- D: remplissage ductile des fissures
 - D1: imperméable à $2 \times 10^5 \text{ Pa}$
 - D2: imperméable à $7 \times 10^5 \text{ Pa}$ (applications spéciales)
- S: remplissage des fissures avec gonflement
 - S1: imperméable à $2 \times 10^5 \text{ Pa}$
 - S2: imperméable à $7 \times 10^5 \text{ Pa}$ (applications spéciales)

8.3.2.2 Ouvrabilité (W)

La lettre W est suivie par 3 ou 4 groupes de chiffres:

- 1^{er} groupe (un seul numéro): largeur de fissure minimum autorisée, en dixièmes de millimètre (1 – 2 – 3 – 5 – 8);
- 2^{ème} groupe (un ou plusieurs chiffres): degré d'humidité de la fissure (1: sec, 2: humide, 3: mouillé, 4: écoulement d'eau);
- 3^{ème} groupe (2 chiffres): température d'utilisation minimum et maximum;
- 4^{ème} groupe (un chiffre, uniquement pour U(F)):
 1. fissures soumises aux mouvements quotidiens supérieurs de 10 % ou 0,03 mm, pendant le durcissement

2. fissures soumises aux mouvements quotidiens inférieurs de 10 % ou 0,03 mm, pendant le durcissement

8.3.2.3 Exemple

Par exemple, la classification U(F1) W(1) (1/2) (5/30) (1) désigne un produit d'injection:

- pour le remplissage transmettant les efforts des fissures;
- susceptible d'être injecté dans des fissures de 0,1 mm, sèches ou humides;
- pouvant être utilisé de 5 °C à 30 °C;
- utilisable pour les fissures soumises à des mouvements quotidiens supérieurs à 10 % ou 0,03 mm pendant le durcissement.

8.3.3 Exécution

Les travaux d'injection ne peuvent être réalisés qu'après un diagnostic préalable approfondi de la structure. Ce diagnostic doit permettre d'identifier la cause et les caractéristiques des fissures, de déterminer les propriétés du béton, de décrire les buts de l'injection et de déterminer le degré de remplissage souhaité.

Le matériau et la méthode d'injection les plus adaptés pourront être choisis sur la base de ces informations.

Les fissures souillées peuvent être nettoyées en les rinçant à l'eau ou en soufflant à l'air comprimé sans huile, selon le coulis d'injection qui sera utilisé.

Figure 31: Injection de fissures

Le matériau d'injection doit être suffisamment visqueux et doit être injecté dans la fissure avec une légère surpression. Pour ce faire, des injecteurs sont prévus sur la surface le long des fissures à remplir. Pour le pompage, on utilise le plus souvent une pompe à cylindres mais pour les grandes quantités, des pompes électriques ou à air comprimé existent également. Les deux composants du coulis d'injection peuvent être mélangés au préalable ou uniquement dans le pistolet d'injection,

Des injecteurs sont fixés sur la fissure à intervalle équivalent à la profondeur de la construction. La fissure est ensuite colmatée. L'injection doit toujours commencer par l'injecteur le plus bas afin de pousser le coulis de bas en haut et d'éjecter l'air de la fissure au fur et à mesure qu'elle se remplit. Une légère surpression maîtrisée permet de remplir la fissure jusqu'au trou de forage suivant. On suppose que la fissure est remplie en profondeur dès que le coulis d'injection apparaît à l'avant. L'excédent qui coule de la fissure doit être enlevé rapidement.

Une fois que le coulis d'injection est suffisamment durci, les injecteurs sont enlevés et les trous sont éventuellement bouchés avec un mortier de réparation. La pompe utilisée doit être nettoyée à l'aide d'un solvant adapté.

8.4 RENFORCEMENT STRUCTUREL

8.4.1 Domaine d'application

Des renforcements structurels peuvent être appliqués pour rétablir les propriétés structurelles d'une construction ou pour obtenir une construction plus solide (construction adaptée à une nouvelle charge d'utilisation plus importante). Dans certains cas, la réparation ou l'agrandissement de la section de béton par coulage ou injection de béton peut constituer une solution. Une consolidation structurelle exige souvent une adaptation du système d'armature.

Dans tous les cas, le dimensionnement d'une consolidation structurelle doit être laissé à l'appréciation d'un bureau d'études compétent.

8.4.2 Armature complémentaire

Si la corrosion réduit considérablement la section de l'armature, la solution la plus simple consiste à éliminer les barres altérées et à les remplacer par de nouvelles. Lors de l'enlèvement de l'armature, il convient de veiller à ne pas mettre en danger la stabilité de la construction. Il est important de veiller à ce que le recouvrement nécessaire avec l'armature existante soit respecté et à ce que la nouvelle barre soit mise en œuvre avec un enrobage suffisant.

Cette méthode peut également être utilisée lorsque l'on constate lors d'un contrôle de stabilité, que l'armature présente (dans une moindre mesure) est insuffisante.

8.4.3 Postcontrainte extérieure

Si l'armature existante est fortement insuffisante ou si l'on constate que la précontrainte existante est réduite, une structure peut être consolidée par la pose d'une postcontrainte extérieure. Il s'agit d'un système composé de torons qui sont fixés à la construction à l'aide de points d'ancrage et de supports en dehors de la section du béton. Le dimensionnement d'un tel système et son exécution appartiennent aux techniques traditionnelles de précontrainte. Pour plus d'informations, nous vous renvoyons à la littérature correspondante.

Si l'on opte pour une telle solution, lors de l'étude préliminaire une attention toute particulière devra être accordée à la résistance de la construction, surtout aux endroits où les ancrages et les points de support à la construction existante doivent être fixés.

8.4.4 Armature collée

Depuis les années 70, des structures peuvent être consolidées par le collage de plats sur le béton. Initialement, ces plats étaient en acier. Depuis quelques années, cette technique est appliquée de manière plus régulière avec des matériaux composites à base de fibres et de résine synthétique. On parle souvent de plats en fibres de carbone, même si d'autres fibres sont utilisées.

Nous distinguons deux systèmes dans cette méthode de renforcement, à savoir le collage des plats (métalliques ou en matériau composite) ou la pose de « tissus composites ». Dans ce dernier cas, les fibres sont enroulées autour de la partie de construction à renforcer et sont ensuite imprégnées de résine synthétique. Il faut veiller à ce que cette résine assure une adhérence suffisante à la surface ainsi qu'une bonne liaison des fibres entre elles.

Figure 32: Armature collée

Les exigences auxquelles doivent satisfaire les colles pour un tel renforcement sont reprises dans la norme NBN EN 1504-4 [53]. Le guide d'agrément G0026 de l'UBAtc [36] reprend ces exigences et renforce les prescriptions normatives auxquelles doivent satisfaire les éléments de consolidation. On trouvera dans le bulletin *fib* 14 [54] un aperçu complet du renforcement avec des armatures collées. Ce document étudie également plus avant le dimensionnement d'un tel renforcement. Ce dimensionnement doit être calculé par des bureaux d'études compétents.

Les renforcements ne peuvent être réussis que si la structure existante peut supporter ce renforcement. Une attention particulière à quelques facteurs spécifiques doit donc être accordée lors de l'inspection de l'élément à consolider. Il convient notamment de vérifier si la planéité et la rugosité de la surface permettent le collage des renforcements. Une surface

courbe (concave) ne convient généralement pas, en raison du risque de détachement, pour un renforcement par collage de plats, il faut dans ce cas recourir aux tissus composites. La surface doit également être suffisamment brute pour obtenir une adhérence optimale. En raison des types de colle utilisés, il convient également de veiller à ce que le degré d'humidité du béton ne constitue pas un obstacle à une bonne adhérence. Les nids de graviers sont généralement des zones plus faibles qui ne conviennent pas non plus à la pose d'un renforcement. Même là où il n'y a pas d'anomalies visibles, la cohésion de la surface en béton doit être contrôlée (§ 3.2.2.2). La résistance du béton sera d'ailleurs déterminante pour la mesure dans laquelle les propriétés structurelles de la construction peuvent être élargies.

Lors du choix d'un renforcement avec plat collé, il convient de tenir compte du fait que, sans protection adaptée supplémentaire, ces systèmes ne présentent qu'une résistance au feu limitée.

Il existe également des systèmes où les plats de renforcement sont précontraints.

9 MESURAGE DES REPARATIONS DE BETON

Les méthodes de mesurage à utiliser ainsi que les étapes où ils sont effectués doivent être prescrits clairement dans le cahier des charges. En effet, des discussions surgissent trop souvent, à l'issue d'une réparation de béton, quant à la manière de mesurer le travail fourni. En l'absence d'instructions claires dans le cahier des charges, il apparaît bien souvent que les différentes parties avaient une idée tout à fait différente des méthodes de mesurage mentionnées dans le contrat.

En principe, on peut généralement faire référence à la norme belge NBN B06-001 (1982) [55] pour les mesurages dans les bâtiments. Cette norme décrit toutes les phases d'un processus de construction ainsi que leur méthode de mesurage. Or, comme la réparation de béton est une spécialisation récente en construction, plusieurs de ses éléments ne figurent pas dans cette norme. Il est important de bien se mettre d'accord sur ces activités avant le début des travaux.

En ce qui concerne les techniques connues depuis longtemps, on pourrait quand même faire éventuellement référence à la norme susmentionnée. Ainsi celle-ci consacre-t-elle un chapitre entier aux travaux de peinture (chapitre 30) [55]. C'est dans le but de compléter et d'explicitier ce chapitre que le CSTC a publié en 1986 le fascicule 30 "Peinture" du "Métré du bâtiment". Pourtant, dans certains cas les deux documents ne suffisent pas pour permettre de trancher une réparation de béton. Ainsi ils ne mentionnent pas de méthodes utilisées pour la préparation de la surface.

Des méthodes de mesurage différentes peuvent être convenues pour les autres travaux de réparation. Il est difficile de dire de but en blanc quelle est la meilleure méthode à utiliser, car tout dépend généralement des conditions spécifiques du chantier. S'il s'agit de réparations à l'aide de mortier, on peut mesurer la surface réparée. Dans certains cas, cependant, on préfère déterminer le volume réparé ou les matières premières consommées.

On applique aussi différentes méthodes de mesurage en cas d'injection de fissures. Dans certains cas, on opte pour un mesurage de la longueur des fissures tandis que, dans d'autres cas, la préférence va à une détermination du volume injecté.

On nous a rapporté des cas où l'on a établi un décompte séparé pour le temps de travail et les matériaux consommés.

On peut trouver des exemples de méthodes de mesurage dans le cahier des charges type de la FEREB [56], ou dans les cahiers des charges types du LIN [57] et du MET [58]. On peut

déduire de ces descriptions qu'il n'est pas facile d'établir une règle de mesurage claire pour les différents éléments d'une réparation de béton. Le groupe de travail qui a préparé la présente Note d'information technique souhaite que soit rédigé un fascicule du métré du bâtiment axé spécifiquement sur la réparation de béton et il prendra les initiatives nécessaires à cette fin.

9.1 DESCRIPTIF POUR CAHIER DES CHARGES SELON FEREB [56]

Selon le cahier des charges neutre pour les réparations de béton publié en 2004 par la FEREB, le maître de l'ouvrage doit déterminer au préalable le code de mesurage. Ce cahier des charges neutre mentionne les postes suivants du métré. Les références à d'autres parties du cahier des charges neutre n'ont pas été reprises dans le présent récapitulatif.

- Préparation du chantier
 - Echafaudages - avec ou sans filet de protection
 - à exprimer en location mensuelle ou hebdomadaire
 - par m² ou par m³ suivant le type de projet.
 - Déplacement - éventuel de l'échafaudage à la pièce.
 - Protection des zones non traitées (fenêtres, portes,...) en m² de surface à protéger.
 - Démontage et remontage de conduites, câbles, accessoires,... à exprimer en mct ou à la pièce.
 - Mise en place de structures particulières de protections (auvents,..) en m² ou à la pièce.
- Préparation du support
 - Nettoyage du support à exprimer en m², avec un minimum de 0,01 m² par zone, à moins qu'un nettoyage isolé soit nécessaire, le minimum étant alors de 0,05 m² (un seul nettoyage dans un cercle, ayant un rayon de 1 m)
 - Sondage des surfaces et marquage des zones à traiter à exprimer en m², avec un minimum de 0,05 m² par zone
 - Essais à réaliser sur support nettoyé (traction, prises d'échantillons,...) à prévoir en prix unitaire et en quantités.
- Décapages et réparations.
 - Trait à la disqueuse de min.10 mm sur le pourtour des zones à réparer, par mct.
 - Décapage et réparation en m² avec un minimum de 0,01 m² par zone, jusqu'au béton non carbonaté, à moins qu'un décapage/réparation isolé soit nécessaire, le minimum étant alors de 0,05 m² (un seul décapage/réparation dans un cercle, ayant un rayon de 1 m)
 - Profondeur de carbonatation moyenne, par section.
 - Décapage des armatures, suivant profondeur de la carbonatation
 - Dégagement de l'armature sur la partie superficielle. Mesurage au mct de surface traité (avec un minimum de 0,20 m par zone).

- Dégagement de l'armature sur tout le pourtour. Mesurage au mct de surface traité (avec un minimum de 0,20 m par zone).
- Réparation du béton.
 - Passivation des armatures mises à nu. Mesurage au mct traité (avec un minimum de 0,10 m par zone).
 - Remplacement d'armatures pour toute diminution visible de section, conformément à la NBN 1504, au kg d'armature placée avec un minimum de 1kg par zone.
 - Fourniture et mise en oeuvre du mortier de réparation suivant Guide d'Agrément G0007 et fiche technique du produit, y compris les éventuels coffrages nécessaires, au dm³ avec un minimum de 1 dm³ par zone.
- Traitement de surface
 - Fourniture et mise en oeuvre d'un mortier d'égalisation suivant guide G0007(2002) et fiche technique du produit, en "x" mm d'épaisseur moyenne, en "y" couches au m² de surface traitée, avec un minimum de 0,05 m² par zone.
 - Fourniture et mise en oeuvre d'un micro mortier suivant guide G0008 (2002) et fiche technique du produit en "x" mm d'épaisseur moyenne, en "y" couches, au m² de surface traitée, avec un minimum de 0,05 m² par zone
 - Fourniture et mise en oeuvre d'un revêtement de protection suivant guide G0008 (2002) et fiche technique du produit en "x" μm d'épaisseur moyenne, en "y" couches, au m² de surface traitée, avec un minimum de 0,05 m² par zone
- Essais et contrôles après travaux
 - Essais destructifs (traction, carottages,...) à la pièce ou en somme réservée.
 - Essais non destructifs (sondage au marteau, ultrasons,...) à la pièce ou en somme réservée.
 - Contrôles des épaisseurs de couches de protection, d'après les consommations de produits (voir fiches techniques) par pièce ou en somme réservée.
- Test de présence de chlorures.
 - Test de contrôle afin d'avoir la certitude que la dégradation du béton n'est pas due à une contamination de chlorures, par pièce ou en somme réservée.

9.2 DESCRIPTIF POUR CAHIER DES CHARGES SELON LE LIN [57]

Zie info te verkrijgen van DW

9.3 DESCRIPTIF POUR CAHIER DES CHARGES SELON LE MET [58]

Sauf prescriptions contraires des documents d'adjudication, le paiement se fait sur la base des postes suivants:

- mise à disposition de moyens d'accès (échafaudage, ...): le prix est donné sur base d'un forfait pour le montage et le démontage et par journée pour l'utilisation
- décapage du support: m²
- dégagement derrière les armatures: m d'armatures dégagées

- remplacement d'armatures (y compris ancrages): kg
- passivation des armatures et traitement préalable suivant prescriptions du fournisseur du produit: m d'armatures traitées
- fourniture et mise en oeuvre de la couche d'accrochage: m²
- fourniture du mortier emballé (y compris stockage): kg
- mise en place du mortier (y compris préparation de la surface, préparation des produits, mise en oeuvre): m².

Le code de mesurage des surfaces à décaper ou à traiter est le suivant:

- placement ou tracé d'une grille pourvue de mailles carrées de 10 cm de côté devant la zone à mesurer
- comptage des mailles dont plus de la moitié de la surface couvre la zone à mesurer
- multiplication du nombre de mailles par 0,01 m² afin d'obtenir la surface en m².

10 CERTIFICATION

Des guides d'agrément ont été rédigés pour la plupart des produits de réparation du béton. Les fabricants peuvent obtenir un agrément ATG pour leurs produits. Cet agrément s'accompagne d'une certification, ce qui veut dire qu'un organisme externe vérifie que le produit satisfait bien aux exigences du guide d'agrément et que le produit ultérieur reste conforme à ces exigences. De ce fait, les utilisateurs de ces produits n'ont plus besoin de tester systématiquement les caractéristiques des produits sur chaque chantier.

Depuis la parution des normes de produit européennes, les produits utilisés pour la réparation et la protection du béton doivent porter le marquage "CE" pour pouvoir être mis en vente sur le marché européen. Les critères exigés pour le marquage CE sont généralement moins détaillés que ceux qui figuraient dans les guides d'agrément. Pour continuer à faire reconnaître un niveau de qualité identique pour leurs produits de réparation, les fabricants auront la possibilité de compléter le marquage CE avec un agrément BENOR. Celui-ci permettra de certifier des caractéristiques complémentaires à celles couvertes par le marquage CE ou selon des critères plus stricts.

Le marquage CE sera obligatoire pour tous les produits décrits dans les normes de la série NBN EN 1504, à partir de 1 janvier 2009.

En complément à cette certification des produits de réparation, il existe un groupe de travail relatif à un "Règlement d'application pour la certification de processus des entreprises qui effectuent des réparations de béton" [REF]. Pour cet agrément, on envisage 3 niveaux de connaissance différents.

- Niveau de qualification A: Entreprises qui travaillent suivant des cahiers des charges prescrivant les techniques à mettre en oeuvre (techniques généralement acceptées et à l'aide de produits certifiés BENOR). Les entreprises qui y satisfont disposent d'un "**Certificat de qualification Réparation du béton**".
- Niveau de qualification B: Entreprises qui satisfont au niveau de qualification A et qui, en plus, déterminent la technique de réparation à appliquer, y compris le choix des produits et des systèmes, et ce en fonction des dégradations indiquées par le donneur d'ordre ou son préposé (localisation et origine). Les entreprises qui y satisfont disposent d'un "**Certificat de processus Réparation du béton**".

- Niveau de qualification C: Entreprises qui satisfont au niveau de qualification B et qui, en outre, établissent le diagnostic des dégradations, élaborent la stratégie de réparation et d'exécution, qui rédigent le cahier des charges complet et, le cas échéant, exécutent ou gèrent elles-mêmes l'ensemble du projet. Les entreprises qui y satisfont disposent d'un "**Certificat de processus intégral Réparation du béton**". Ce niveau de qualification est également destiné aux bureaux d'études et aux architectes qui travaillent dans le secteur de la réparation du béton.

C'est uniquement en imposant les mêmes exigences de qualité élevées aux différentes parties qui collaborent à une réparation de béton que l'on pourra obtenir un résultat final de qualité. C'est pourquoi il est souhaitable que les maîtres d'ouvrages qui font appel aux entrepreneurs possédant le niveau de qualification 1 disposent eux-mêmes d'une Certification de processus intégral Réparation du béton.

11 CONTÔLE ET ENTRETIEN APRÈS UNE RÉPARATION DE BÉTON

La NBN ENV 1504-9 ne laisse aucun doute à ce sujet. Un entretien régulier et planifié est indispensable si l'on veut obtenir une réparation durable du béton. On remettra à cette fin des instructions en la matière au propriétaire ou au gérant lors de la réception. Les possibilités d'entretien et de contrôle sont en effet des éléments à prendre en compte lors du choix de la méthode.

On peut trouver quelques indications quant aux fréquences des entretiens dans le "Guide pratique pour l'entretien des bâtiments" du CSTC [REF]. Toutefois, dans ce guide, seuls le béton en tant qu'élément de la façade, les enduits et les peintures sont quelque peu pertinents pour la réparation du béton.

On peut prévoir les prestations d'entretien suivantes pour le béton:

- Inspection annuelle de l'aspect, éventuellement précédée d'un nettoyage
- Si un traitement hydrofuge a été appliqué, application d'une nouvelle couche tous les cinq ans
- Inspection et réparation éventuelle des joints et des joints de dilatation tous les trois ans
- Réparation locale du béton dans les zones endommagées

Les peintures qui ne seraient plus en bon état, c'est à dire les peintures qui ne possèdent plus leurs caractéristiques initiales, doivent recevoir une nouvelle couche. Les changements de teinte éventuels n'ont pas toujours une incidence sur les caractéristiques de protection de la peinture. Un contrôle annuel de la surface peinte est souhaitable. S'il faut appliquer une nouvelle couche, il faudra aussi vérifier que cela ne restreint pas trop l'étanchéité à la vapeur de l'ensemble des couches (ancienne et nouvelle).

La fréquence des contrôles et des entretiens doit être choisie de manière à pouvoir limiter au maximum la gêne qu'entraînent les réparations éventuelles des dégâts.

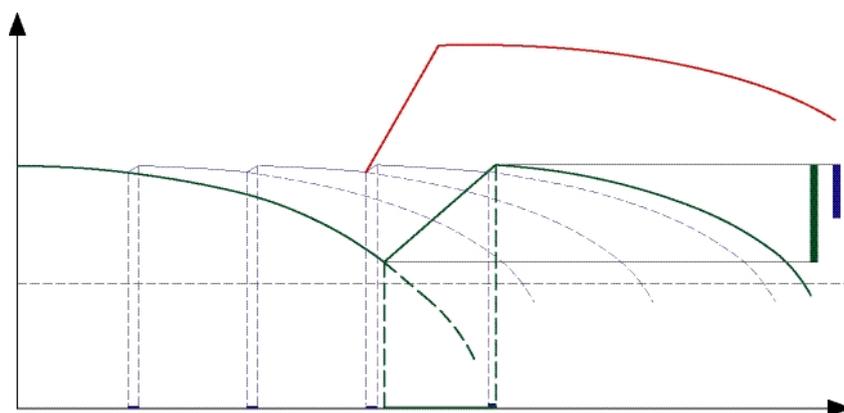


Figure 33: Schéma des coûts entretien – réparation

Compte tenu de la fréquence des contrôles proposée par le Guide pratique, on peut conseiller de procéder à une inspection visuelle par an pour les structures en béton réparées. Quand on constate une dégradation, il faut la réparer dès que possible de manière judicieuse. Un diagnostic est chaque fois nécessaire. Il va de soi que la plupart des données du dossier de réparation initial peuvent être réutilisées.

En ce qui concerne la fréquence d'entretien des matériaux utilisés, il convient de consulter les informations communiquées à ce niveau par les fabricants. Il faut aussi tenir compte de l'état de la structure au moment des travaux de réparation. Il faudra intensifier la fréquence si l'on est obligé de travailler sur un support en béton de moindre qualité, afin d'obtenir quand même la même une durabilité équivalente.

Outre les contrôles périodiques, on peut aussi opter pour un monitoring en continu de la structure, principalement si les zones à contrôler sont difficilement accessibles. On peut intégrer à cette fin des capteurs dans la structure (p. ex. pour mesurer l'humidité, la corrosion); ils pourront contribuer à déceler très tôt une nouvelle dégradation, voire à l'éviter. En cas de protection cathodique, il est nécessaire de prévoir un contrôle permanent, afin de pouvoir adapter automatiquement l'intensité du courant dans le système. À l'heure actuelle, beaucoup de ces systèmes peuvent aussi être réglés à distance.

12 ANDERE LITERATUUR

WTCB: Kursus-Konferentie nr 55: Beton in gebouwen – Schade – Diagnose – Herstelling, 1988, Brussel

CEB: CEB-Bulletin 243: Strategies for testing and assessment of concrete structures – Guidance Report, Mei 1998, Lausanne

CUR/ Betonvereniging: Publicatie 172, 2de herziene uitgave: Duurzaamheid en onderhoud van betonconstructies, 1998, Gouda

BUtgb: Goedkeuringsleidraden...

13 REFERENCES

- 1 Ministère Wallon de l'Équipement et des Transports, Circulaire n° MET/576-b-5. Bruxelles, MET, 1990
- 2 BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE (BIN): NBN ENV 1504-9, Producten en systemen voor de bescherming en herstelling van betonconstructies - Definities, eisen, kwaliteitsborging, conformiteitsbeoordeling - Deel 9: Algemene principes voor het gebruik van producten en systemen. September 1997, Brussel België
- 3 DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN): DIN 4150, Erschütterungen im Bauwesen. Einwirkungen auf bauliche Anlagen – Teil 3. Februari 1999, Berlin Duitsland
- 4 Desmyter J., Potoms G., Demars P., Jacobs J.: De alkali-silica reactie. Brussel, WTCB, WTCB-tijdschrift, nr. 2, 2001
- 5 BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE: NBN EN 206-1: 2001, Beton – Deel 1: Specificaties, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit. Brussel, BIN, 2001
- 6 Belgische Beton Groepering/Fonds voor Vakopleiding in de Bouwnijverheid: Betontechnologie, Cursus betontechnologie. Brussel, B.B.G./F.V.B., 1994
- 7 Loutz S., Dinne K.: Vervuiling en verwerking van steenachtige materialen door micro-organismen. Brussel, WTCB, WTCB-tijdschrift, nr.2, 2000
- 8 Pierard J., Dieryck V.: De krimp van jong speciaal beton. Brussel, WTCB, WTCB-dossier, nr. 2, 2004
- 9 COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON - CEB Bulletin No. 192 - Diagnosis and assessment of concrete structures - State of the art report, Lausanne, 1989
- 10 COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON - CEB Bulletin No. 183 - Durable concrete structures - Design guide, Lausanne, 1992
- 11 COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON - CEB-Bulletin 243: Strategies for testing and assessment of concrete structures – Guidance Report, Mei 1998, Lausanne
- 12 Jacobs J., Pollet V., Vyncke J.: Strategien voor het testen en beoordelen van betonconstructies. Brussel, WTCB, WTCB-tijdschrift, nr. 4, 1998
- 13 BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE: NBN EN 1992-1-1:2005, Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen, Brussel, BIN, 2005
- 14 De Mets G., Wagneur M.: Kursus-Konferenties nr 55: Beton in gebouwen – Schade – Diagnose – Herstelling. Brussel, WTCB, 1988

-
- 15 BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE: NBN EN 12504-2, Beproeving van beton in constructies - Deel 2: Niet-destructief onderzoek - Bepaling van de terugslagwaarde. Brussel, BIN, 2001
 - 16 RILEM Recommendation CPC-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth. London, Materials and Structures, vol. 21, nr. 126, 1988
 - 17 CEN: prEN 14630, Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method. 2006
 - 18 BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE: NBN B15-250, Proeven op beton – Chemisch onderzoek van verharde mortel en beton. Brussel, BIN, 1991
 - 19 Recommendations of RILEM TC 178-TMC: “Testing and modelling chloride penetration in concrete”. Analysis of total chloride content in concrete – Recommendation. Paris, Materials and Structures, vol 35, nr. 253, 2002
 - 20 BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE: NBN EN 1542, Producten en systemen voor de bescherming en herstelling van betonconstructies – Proefmethoden – Meting van de hechtsterkte door directe trekkracht. Brussel, BIN, 1999
 - 21 American Society for Testing and Materials: ASTM C876-91, Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. ASTM International, USA, 1999
 - 22 Recommendations of RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. Paris, Materials and Structures, vol. 33, nr. 234, 2000
 - 23 BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE: NBN EN 12504-1, Beproeving van beton in constructies - Deel 1: Boorkernen - Monsterneming, onderzoek en bepaling van de druksterkte. Brussel, BIN, 2000
 - 24 BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE: NBN B15-220, Proeven op beton - Bepaling van de druksterkte. Brussel, BIN, 1970
 - 25 BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE: NBN EN 12390-7, Beproeving van verhard beton – Deel 7: Dichtheid van verhard beton. Brussel, BIN, 2000
 - 26 BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE: NBN B 15-217, Proeven op beton - Wateropsorping door capillariteit. Brussel, BIN, 1984
 - 27 BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE: NBN EN 480-5:2005, Hulpstoffen voor beton, mortel en injectiemortel - Beproevingmethoden - Deel 5: Bepaling van de capillaire wateropneming
 - 28 Belgische Unie voor de technische goedkeuring in de bouw: Goedkeurings- en certificeringsleidraad nr. G0007: Herstellmortels op basis van hydraulische bindmiddelen. Brussel, BUtgb, 2002
 - 29 Belgische Unie voor de technische goedkeuring in de bouw: Goedkeurings- en certificeringsleidraad nr. G0013: Harsgebonden Herstellmortels. Brussel, BUtgb, 1997

-
- 30 BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE: NBN EN 14487-1:2006, Spuitbeton - Deel 1: Definities, eisen en conformiteit. Brussel, BIN, 2006
 - 31 Belgische Unie voor de technische goedkeuring in de bouw: Goedkeurings- en certificeringsleidraad nr. G0019: Spuitbeton. Brussel, BUtgb, 2001
 - 32 BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE: NBN EN 1504-2:2005, Producten en systemen voor het beschermen en herstellen van betonconstructies - Definities, eisen, kwaliteitsborging en conformiteitsbeoordeling - Deel 2: Oppervlaktebeschermingssystemen voor beton. Brussel, BIN, 2005
 - 33 Belgische Unie voor de technische goedkeuring in de bouw: Goedkeurings- en certificeringsleidraad nr. G0008: Bekledingen ter bescherming van betonoppervlakken, blootgesteld aan weersinvloeden maar niet aan verkeer. Brussel, BUtgb, 2002
 - 34 Belgische Unie voor de technische goedkeuring in de bouw: Goedkeurings- en certificeringsleidraad nr. G0017: Beschermings- en/of waterdichte en/of waterondoorlaatbare bekledingen van betonoppervlakken in permanent of semi - permanent contact met water. Brussel, BUtgb, 2004
 - 35 Belgische Unie voor de technische goedkeuring in de bouw: Goedkeurings- en certificeringsleidraad nr. G0027: Hydrofobe impregnatie en impregnatie van betonoppervlakken, blootgesteld aan weersinvloeden. Brussel, BUtgb, 2005
 - 36 Belgische Unie voor de technische goedkeuring in de bouw: Goedkeurings- en certificeringsleidraad nr. G0026: Gelijkde wapeningen. Brussel, BUtgb, 2004
 - 37 BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE: NBN EN 1504-5:2005, Producten en systemen voor de bescherming en herstelling van betonconstructies - Definities, eisen, kwaliteitsborging, conformiteitsbeoordeling - Deel 5: Injecteren van beton. Brussel, BIN, 2004
 - 38 Belgische Unie voor de technische goedkeuring in de bouw: Goedkeurings- en certificeringsleidraad nr. G0011: Bescherming van de wapening in geval van depassivatie door carbonatie bij een dekking van minder dan 10 mm. Brussel, BUtgb, 1996
 - 39 Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving/Betonvereniging: Duurzaamheid en onderhoud van betonconstructies. Gouda, Stichting CUR, Publicatie 172, 1998
 - 40 Belgische Unie voor de technische goedkeuring in de bouw: Bijlage B aan de Goedkeurings- en certificeringsleidraad nr. G0007: Herstelmortels op basis van hydraulische bindmiddelen. Brussel, BUtgb, 2003
 - 41 Belgische Unie voor de technische goedkeuring in de bouw: Goedkeurings- en certificeringsleidraad nr. G0008: Bekledingen ter bescherming van betonoppervlakken, blootgesteld aan weersinvloeden maar niet aan verkeer. Brussel, BUtgb, 2002
 - 42 CEN: prEN 14487-2. Sprayed concrete - Part 2: Execution
 - 43 **ACI, BRE, Concrete Society, ICRI: Concrete Repair Manual – Second Edition,**

-
- 44 PTV 501: Produits de cure
- 45 European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research: COST Action 521, Corrosion of steel in reinforced concrete structures – Final report. Brussel, EC, 2003
- 46 BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE: NBN EN 12696: Protection cathodique de l'acier dans le béton: une nouvelle norme européenne. Brussel, BIN, 2001
- 47 Bertolini L., Elsener B., Pedeferi P., Polder R., Corrosion of Steel in Concrete – Prevention, Diagnosis, Repair. Italy, 2003
- 48 Belgische Unie voor de technische goedkeuring in de bouw: Goedkeurings- en certificeringsleidraad nr. G0016: Kathodische bescherming door opgelegde stroom van wapening in gewapend beton blootgesteld aan de lucht. Brussel, BUtgb, 2000
- 49 CEN: prCEN/TS 14038-2: 2003, Electrochemical re-alkalisation and chloride extraction treatments for reinforced concrete – Part 2: chloride extraction, 2003
- 50 Pollet V., Dugniolle E., Vyncke J.: Realkalisatie van beton. Brussel, WTCB, WTCB tijdschrift, nr. 4, 1999
- 51 BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE: NBN CEN/TS 14038-1: 2005, Electrochemical realkalisation and chloride extraction treatments for reinforced concrete – Part 1: realkalisation. Brussel, BIN, 2005
- 52 Dereymaeker J.: Herstellen van beton d.m.v. scheurinjecties. Antwerpen, Het Ingenieursblad, nr.1-2, 1996
- 53 BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE: NBN EN 1504-4:2005, Producten en systemen voor de bescherming en herstelling van betonconstructies - Definities, eisen, kwaliteitsborging, conformiteitsbeoordeling - Deel 4: Constructieve hechting. Brussel, BIN, 2005
- 54 Fédération International du Béton, Bulletin 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures – Technical report. Switzerland, FIB, 2001
- 55 BELGISCH INSTITUUT VOOR NORMALISATIE: NBN B06-001: Metingen voor gebouwen – Meetmethoden voor hoeveelheden. Brussel, BIN, 1982
- 56 Association belge des spécialistes dans la réparation du béton: DEGRADATION DU BETON – Texte neutre pour cahier des charges concernant la réparation de dégradations mécaniques et/ou de béton carbonaté. Bruxelles, FEREB, 2004
- 57 LIN
- 58 MET