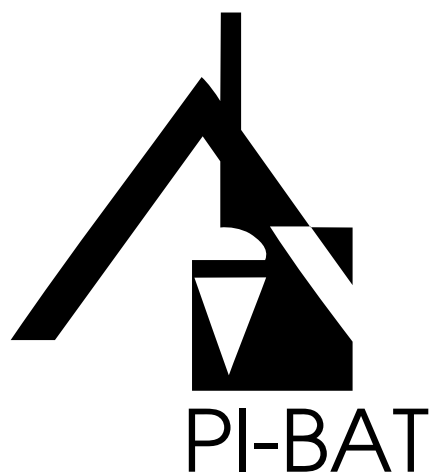


Réfection des ouvrages en béton

Entretien et rénovation des constructions – Génie civil



Réfection des ouvrages en béton

Jusque dans le courant des années 70, où pour la première fois des dégâts sont apparus sur des ouvrages âgés de quelques années seulement, le béton armé était considéré comme étant le mode de construction le plus durable. Pendant les années 70 et 80, le développement de l'art de construire en béton armé a été marqué par le souci d'améliorer la durabilité, surtout pour les ouvrages soumis à des influences extérieures défavorables. Résultat de nombreuses expériences, un principe s'est peu à peu imposé: les ouvrages existants en béton armé doivent être régulièrement inspectés, évalués et entretenus, afin d'éviter toute limitation de l'aptitude au service et de la sécurité structurale. Pour cela on dispose de méthodes de protection et de réfection qui ont fait leurs preuves; cependant, leur mise en œuvre exige étude préalable et planification.

La présente publication «Réfection des ouvrages en béton» représente dans ce cadre une aide importante et même indispensable. Elle est conçue de manière modulaire et l'ordre des chapitres correspond à la démarche appliquée le plus souvent pour traiter judicieusement un problème de réfection. L'introduction trace une vue d'ensemble et définit la terminologie; elle donne les références aux normes, aux buts et aux limites de la publication.

Le chapitre «Principes pour la protection contre la corrosion des armatures» s'articule autour de la recherche des causes de la dégradation, afin de pouvoir en déduire les mesures de réfection les

mieux adaptées pour faire face au cas de corrosion spécifique constaté. Avec les principes de réfection, ce sont les possibilités d'action sur les causes des dégâts constatés qui sont traitées. Les procédés usuels sont passés en revue: élimination des zones de béton dégradé et reprofilage, procédés électriques (déminéralisation, réalcalinisation, protection cathodique contre la corrosion), mise en œuvre d'inhibiteurs. Dans de nombreux cas il s'avère indispensable de compléter la protection du béton contre les agents extérieurs agressifs par un système de protection des surfaces. Quel système choisir et comment? Ce problème du choix est complété par un aperçu de la démarche systématique préconisée par les directives de la commission allemande du béton armé (Richtlinien des deutschen Ausschusses für Stahlbeton).

Un chapitre détaillé est consacré au «Choix des mesures de réfection et des systèmes de protection des surfaces». Il présente les étapes d'une réfection en prenant en considération les exigences spécifiques à l'ouvrage et, en se référant aux principes exposés, il propose une démarche systématique pour parvenir à la solution de réfection optimale. Le dernier chapitre donne la liste des principaux points auxquels il faut veiller lors de l'exécution, de la direction et du contrôle des travaux.

«Réfection des ouvrages en béton»: un document qui a sa place sur la table de travail de chaque ingénieur confronté aux problèmes d'étude et d'exécution de réfections d'ouvrages en béton armé.

ISBN 3-905234-85-8

Edition originale: ISBN 3-9052234-71-8

1994, 145 pages
Form. 724.462 f

Réfection des ouvrages en béton

Associations de soutien

- SIA Société suisse des ingénieurs et des architectes
UTS Union technique suisse
VSS Union suisse des professionnels de la route

La présente documentation «Réfection des ouvrages en béton» a été élaborée par un groupe de travail du programme d'impulsions PI-BAT – Entretien et rénovation des constructions, groupe thématique génie civil.

Nous remercions ici tous les spécialistes, qu'ils soient praticiens, enseignants ou chercheurs, pour leurs précieuses informations et leurs conseils avisés. La mise au point définitive du document a pris en considération les prises de position très constructives faites à la suite d'une large consultation.

Membres du groupe de travail «Réfection des ouvrages en béton»

- W. Birchmeier, ingénieur EPFL/SIA, Lausanne
- P. Lehmann, CES, ingénieur civil, Sarnen
- P. Matt, ingénieur-conseil, Ittigen
- A. Steiger, ingénieur-conseil, Lucerne (élaboration de la publication)

Membres du groupe d'experts

- K. Alpiger, Schneller Schmidhalter Ritz, Brigue
- H.J. Fehr, LFEM (EMPA), Dübendorf
- A. Hächler, LPM AG Baustoffprüfinstitut, Beinwil am See
- Dr F. Hunkeler, Société suisse pour la protection contre la corrosion, Zurich
- D. Judex, AG Heinrich HATT-HALLER, Zurich
- C. Meuli, Office fédéral des routes, Berne
- U. Reber, président VBK (Verband Bautenschutz-Kunststoffe am Bau), Reprojet AG, Zurich
- R. Schefer, Basler & Hofmann, Zurich
- R. Suter, Dr ès sciences techniques, Schindelholz & Dénériaz, Bulle

Direction du groupe de travail

- P. Matt, ingénieur-conseil, Ittigen

Illustrations

Les illustrations proviennent en partie des auteurs. Les caricatures ont été dessinées par M. Imdorf,

Lucerne. Pour les illustrations tirées de publications, l'origine est mentionnée dans les légendes. Par ailleurs, les sociétés suivantes ont généreusement mis un grand nombre d'illustrations à notre disposition :

- AGV-Betonsanierungs AG, Emmen
- Basler & Hofmann, Zurich
- ECBIS AG, Allschwil
- Helbling Ingenieurunternehmung AG, Zurich
- Locher & Cie AG, Zurich

Nous remercions ici très chaleureusement toutes les sociétés qui ont mis des illustrations à notre disposition.

Edition française

Direction des cours

- René Suter, Dr ès sciences techniques, Schindelholz & Dénériaz SA, Bulle

Traduction

- W. Birchmeier, ingénieur, Lausanne
- L. Girard, ingénieur, Ecublens

Coordination

- Andreas Schmid, architecte EPFL/SIA, Dommartin

Révision rédactionnelle

- Jean-Claude Scheder, Bercher

Mise en page et photocomposition

- Consortium DAC/City Comp SA, Lausanne et Morges

ISBN 3-905234-85-8

Edition originale: ISBN 3-905234-71-8

Copyright © 1994 Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne.

Reproduction d'extraits autorisée avec indication de la source.

Diffusion : Coordination romande du programme d'action «Construction et Energies», EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne (N° de commande 724.462 f)

Form. 724.462 f 05.94 1000 U19615

Avant-propos

D'une durée totale de 6 ans (1990-1995), le programme d'action «Construction et Energie» se compose des trois programmes d'impulsions suivants:

PI-BAT – Entretien et rénovation des constructions
RAVEL – Utilisation rationnelle de l'électricité
PACER – Energies renouvelables

Ces trois programmes d'impulsions sont réalisés en étroite collaboration avec l'économie privée, les écoles et la Confédération. Leur but est de favoriser une croissance économique qualitative. Dans ce sens ils doivent conduire à une plus faible utilisation des matières premières et de l'énergie, avec pour corollaire un plus large recours au savoir-faire et à la matière grise.

Le programme PI-BAT répond à la nécessité qu'il y a d'entretenir correctement les constructions de tous types. Aujourd'hui une partie toujours plus grande des bâtiments et des équipements de génie civil souffrent de défauts techniques et fonctionnels en raison de leur vieillissement ainsi que de l'évolution des besoins et des sollicitations. Si l'on veut conserver la valeur de ces ouvrages, il y a lieu de les rénover, et pour ce faire on ne peut s'appuyer sur l'empirisme. Le programme d'impulsions PI-BAT ne se limite pas aux aspects techniques et d'organisation, il s'étend également au cadre juridique, qui jusqu'ici était essentiellement tourné vers les constructions neuves. Le programme couvre ainsi les trois domaines suivants: bâtiments, génie civil et problèmes apparentés à la rénovation.

Si l'on veut conserver les qualités techniques et architecturales de nos bâtiments et si l'on souhaite préserver des quartiers, voire des villages, des connaissances nouvelles doivent être apportées aux nombreuses personnes concernées: propriétaires, autorités, concepteurs, entrepreneurs et collaborateurs de tous niveaux.

Cours, manifestations, publications, vidéos, etc.

Le PI-BAT cherche à atteindre ces objectifs par l'information, la formation et le perfectionnement des fournisseurs et des demandeurs de prestations dans le domaine de la rénovation. Le transfert de connaissances est axé sur la pratique quotidienne; basé essentiellement sur des manuels et des cours,

il comprend également d'autres types de manifestations. Le bulletin «Construction et Energie», qui paraît trois fois l'an, fournit des détails sur toutes ces activités.

Chaque participant à un cours, ou autre manifestation du programme, reçoit une publication spécialement élaborée à cet effet. Toutes ces publications peuvent également être obtenues en s'adressant directement à la Coordination romande du programme d'action «Construction et Energie» EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne.

Compétences

Afin de maîtriser cet ambitieux programme de formation, il a été fait appel à des spécialistes des divers domaines concernés; ceux-ci appartiennent au secteur privé, aux écoles, ou aux associations professionnelles. Ces spécialistes sont épaulés par une commission qui comprend des représentants des associations, des écoles et des branches professionnelles concernées.

Ce sont également les associations professionnelles qui prennent en charge l'organisation des cours et des autres activités proposées. Pour la préparation de ces activités une direction de projet a été mise en place; elle se compose de MM. Reto Lang, Andreas Bouvard, Ernst Meier, Rolf Saegesser, Andreas Schmid, Dieter Schmid, Richard Schubiger, Hannes Wuest et Eric Mosimann de l'OFQC. Une très large part des activités est confiée à des groupes de travail, ceux-ci sont responsables du contenu de même que du maintien des délais et des budgets.

Publication

La réfection des ouvrages en béton est une tâche complexe. En se basant sur l'analyse des dégâts et sur l'évaluation de l'état, l'ingénieur doit rechercher la solution optimale en tenant compte de nombreuses conditions spécifiques. Les connaissances relatives à la réfection des ouvrages en béton armé se sont fortement accrues ces dernières années. Elles permettent aujourd'hui d'appliquer une démarche systématique pour l'étude et la préparation d'une réfection. En plus d'indications générales sur cette démarche, la publication donne des informations actuelles et utiles sur les principes de réfection fondamentaux ainsi que sur les différents procédés de réfection.

La présente publication a fait l'objet d'une procédure de consultation, elle a également été soumise à l'appréciation des participants au cours pilote, ce qui a permis aux auteurs d'effectuer les modifications nécessaires. Ceux-ci ont toutefois gardé leur liberté d'appréciation pour les questions où les avis divergeaient. Ils assument donc aussi la responsabilité de leurs textes. Des améliorations sont encore possible et des suggestions éventuelles peuvent être adressées soit au directeur du cours, soit directement à l'Office fédéral des questions conjoncturelles.

Pour terminer nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de la présente publication.

Office fédéral des questions
conjoncturelles
Service de la technologie

Dr B. Hotz-Hart
Vice-directeur

Table des matières

1	Introduction	9
1.1	Généralités	11
1.2	PI BAT– Entretien et rénovation	13
1.3	Public cible	14
1.4	Terminologie	15
1.5	Réfection du béton	16
1.6	Normes, directives	18
1.7	Buts et limites de la documentation	20
2	Principes pour la protection contre la corrosion des armatures	23
2.1	Introduction	25
2.2	Vue d'ensemble	26
2.3	Principes de réfection en cas de corrosion due à la carbonatation du béton	28
2.4	Principes de réfection dans les cas de corrosion due aux effets de chlorures	35
3	Procédés de réfection	41
3.1	Elimination des zones de béton dégradé et reprofilage	43
3.2	Protection cathodique contre la corrosion (KKS)	51
3.3	Déminéralisation électrochimique (ECE)	53
3.4	Réalcalinisation électrochimique (ER)	56
3.5	Inhibiteurs	58
4	Systèmes de protection des surfaces	61
4.1	Introduction	63
4.2	Imprégnations	67
4.3	Enduits	70
4.4	Systèmes de protection des surfaces selon RiLiDAfStB	73
5	Choix des mesures de réfection et du système de protection des surfaces	77
5.1	Introduction	79
5.2	Etat existant	80
5.3	Conditions et exigences spécifiques à l'ouvrage	81
5.4	But de la réfection	89
5.5	Choix des procédés et des systèmes	90
5.6	Choix des produits	98
6	Exécution	101
6.1	Indications pour les soumissions	103
6.2	Essais préalables	104
6.3	Démolition	105
6.4	Préparation du support	112
6.5	Traitement de cure	113
6.6	Contrôles de la qualité	114
6.7	Dossier de l'ouvrage	116

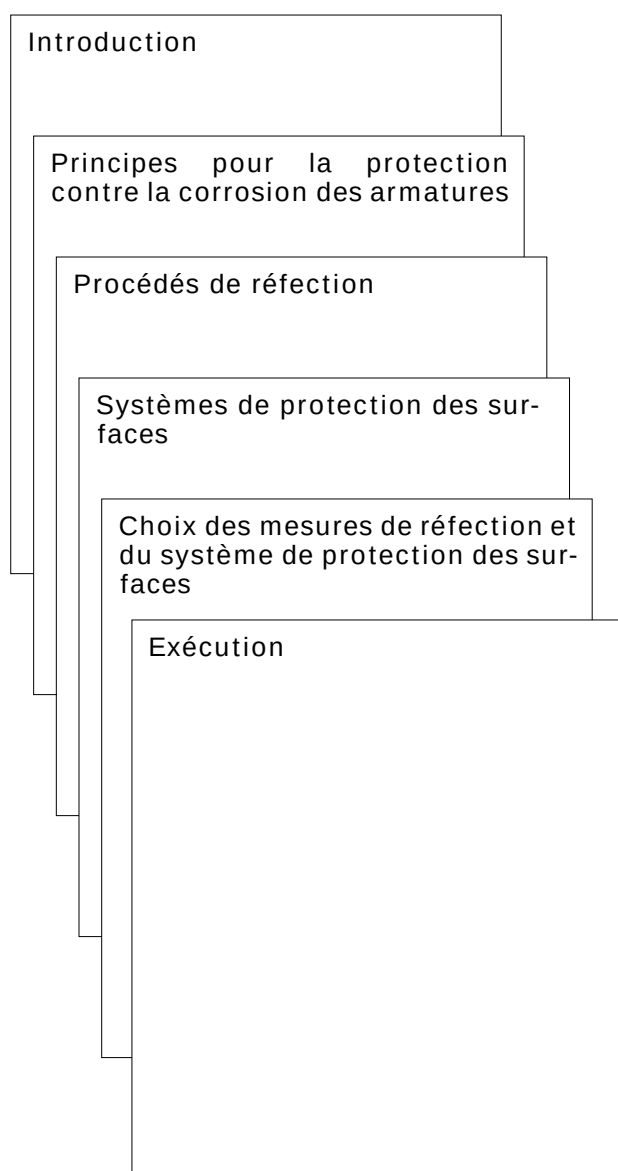
Annexes	117
Annexe A – Terminologie	119
Annexe B – Béton projeté	127
Annexe C – Tableau des températures du point de rosée	131
Annexe D – Procédés électrochimiques	133

Bibliographie	135
---------------	-----

Publications du Programme d'impulsions PI-BAT	139
---	-----

Structure de la documentation

La documentation est structurée de manière modulaire. Les différents éléments qui la composent sont traités dans un ordre qui correspond à la démarche la plus usuelle lorsque l'on aborde un tel problème. Les premiers chapitres présentent les données fondamentales, les suivants le déroulement du processus de réfection. Ce manuel est centré sur les problèmes de la corrosion des armatures, la cause la plus fréquente des dégâts dans les constructions en béton.



Introduction

Présentation générale du problème, y compris les définitions des notions de base, avec des références aux normes et aux directives. Définition des buts de la documentation, du public cible et des limites du manuel.

Principes pour la protection contre la corrosion des armatures

La réfection a pour but de stopper la corrosion des armatures. Un but qui n'est atteignable que si les mesures envisagées sont choisies en fonction de la nature des dégâts et du processus de corrosion.

Procédés de réfection

Dans le cadre d'une réfection, différents procédés peuvent être appliqués pour éliminer les dégâts constatés. En voici quelques-uns qui seront développés: démolition/reprofilage, procédés électrochimiques (protection cathodique contre la corrosion, extraction des sels, réalcalinisation), mise en œuvre d'inhibiteurs.

Systèmes de protection des surfaces

Dans de nombreux cas, il est nécessaire de prévoir une protection supplémentaire du béton contre des agents extérieurs agressifs, sous forme d'une protection superficielle. Ce chapitre passe en revue les principes de base, et les directives de la commission allemande du béton armé («Deutscher Ausschuss für Stahlbeton»).

Choix des mesures de réfection et du système de protection des surfaces

Les étapes d'une réfection seront choisies en fonction des conditions spécifiques. Une démarche systématique, pour déterminer la solution de réfection optimale, est proposée en se basant sur ces principes.

Exécution

Ce chapitre expose les principaux points auxquels il faut veiller pour la conduite et la surveillance de l'exécution.

1. Introduction

1.1	Généralités	11
1.2	PI BAT – Entretien et rénovation	13
1.3	Public cible	14
1.4	Terminologie	15
1.5	Réfection du béton	16
1.6	Normes, directives	18
1.7	Buts et limites de la documentation	20

1. Introduction

1.1 Généralités

Dès sa découverte en 1850 par Hyatt aux USA, et suite au premier brevet français de Monier en 1867, la construction en béton armé, après quelque temps d'hésitation, s'est généralisée au XX^e siècle. Jusque vers les années 70, où des dégâts sont apparus sur des ouvrages âgés de quelques années seulement, le béton armé était considéré comme étant le mode de construction le plus durable. Cette opinion était justifiée par le fait que l'alcalinité de la pâte de ciment protégeait les armatures de manière durable, par passivation de la surface de l'acier. Mais les dégâts observés ont fait prendre conscience que des influences extérieures pouvaient limiter cette protection.

Pendant les années 70 et 80, le développement de l'art de construire en béton armé a été marqué par le souci d'améliorer la durabilité, surtout pour les ouvrages soumis à des influences extérieures défavorables. Il s'est ainsi avéré que la durabilité désirée pouvait être obtenue dans de nombreux cas par des mesures relativement simples telles que, par exemple, le maintien d'un recouvrement de béton d'épaisseur et de compacité suffisantes.

Lors de la réalisation d'ouvrages en béton armé, une attention suffisante n'a pas toujours été accordée à ces principes, et c'est malheureusement encore le cas aujourd'hui. Les influences extérieures sur les constructions en béton armé se sont par ailleurs fortement accentuées depuis les années 60, en particulier en raison du recours massif aux sels de déverglaçage sur les routes. Conséquence de cette pratique: une augmentation des dégâts dans les constructions en béton armé et limitation de leur durabilité. La réfection des ouvrages attaqués doit être entreprise à temps afin de stopper le développement des dégâts par des mesures de protection, de manière à éviter, à moyen ou long terme, toute limitation de l'aptitude au service ou de la sécurité structurale. Les premiers dégâts constatés, il a fallu développer des méthodes de réfection et de protection complémentaires.

Au début des années 90, après une période de développement d'environ 10 ans, des méthodes de haut niveau sont proposées à l'ingénieur pour les réfections et la protection des ouvrages en béton armé. Bien des lacunes sont comblées par la recherche et le développement. Il reste cependant toujours des questions non résolues, comme le



Figure 1.1
Pont en béton armé sur la Sihl, construit au début de l'utilisation du béton armé



Figure 1.2
Au cours des années 30 et 40, le béton armé est de plus en plus utilisé également dans le bâtiment



Figure 1.3
L'une des principales applications du béton armé : les ponts modernes

manque d'expérience à long terme sur les systèmes de réparation du béton, en particulier la question de la liaison de l'ancien béton avec les couches rapportées fait encore l'objet de nombreuses controverses. Un autre problème non encore résolu concerne la compatibilité des produits appliqués avec l'environnement, au stade de leur fabrication et de leur application, ainsi que l'élimination des éléments d'ouvrages réparés (revêtements p. ex.).

1.2 PI BAT – Entretien et rénovation

L'objectif du programme d'impulsions «Entretien et rénovation des constructions», décidé en automne 1988 par l'Assemblée fédérale, est de réunir les expériences et les connaissances dans le domaine de l'entretien des ouvrages existants, qu'elles soient tirées de la recherche ou de la pratique, ainsi que de mettre ces connaissances à disposition des personnes directement concernées par ces travaux. Ce programme devrait combler certaines lacunes dans les connaissances des praticiens du bâtiment, aujourd'hui encore principalement orientés vers la construction neuve. L'objectif du programme n'est cependant pas de traiter tous les problèmes liés à l'entretien des bâtiments de manière exhaustive. Leur importance économique en détermine, entre autres, les axes principaux.

Le cours et la publication «Réfection des ouvrages en béton» constituent la suite d'une série de projets de PI BAT dans le domaine du génie civil. La publication «Le diagnostic des ouvrages de génie civil» (19) fournit les références nécessaires pour déterminer les bases d'une réfection. Celle de «Techniques d'auscultation des ouvrages de génie civil» (18) traite des techniques et des procédés d'auscultation actuellement à disposition de l'ingénieur dans l'appréciation de l'état d'un ouvrage. La brochure «Protection des ouvrages de génie civil» (16) présente la protection superficielle des matériaux et particulièrement les possibilités de protections complémentaires des ouvrages existants en béton armé.

D'autres publications de PI BAT, (figure 1.6), ont trait aux problèmes spécifiques du diagnostic des bâtiments d'habitation ou de bureaux.



Figure 1.4
Le programme d'impulsions PI BAT «Entretien et rénovation des constructions»

Protection
des ouvrages de génie civil (16)

Le diagnostic
des ouvrages de génie civil (19)

Techniques d'auscultation
des ouvrages de génie civil (18)

Maintenance de routes
à grand débit en exploitation (17)

Figure 1.5
Publications PI BAT déjà parues sur le thème du diagnostic et de la réfection des ouvrages en béton armé

Diagnostic sommaire MERIP
Evaluation de l'état et estimation du coût des
immeubles (14)

Méthodes de relevés
Techniques de relevés, modalités, évaluation des
coûts (15)

Classification
des éléments d'entretien et de rénovation (12)

Figure 1.6
Publications PI BAT sur le diagnostic des bâtiments



Figure 1.7
La publication «Réfection des ouvrages en béton»
s'adresse à l'ingénieur chargé du projet

1.3 Public cible

Le cours et la publication «Réfection des ouvrages en béton» s'adressent en premier lieu aux ingénieurs en génie civil chargés de l'étude, de projets, d'établissement de soumissions et de la conduite de travaux de réfection d'ouvrages en béton armé. Les ingénieurs attachés au maître de l'ouvrage ou à l'entreprise trouveront dans cette publication la description du déroulement systématique des opérations et les conditions auxquelles il faut veiller lors de la préparation et de l'exécution d'une réfection d'un ouvrage en béton armé. En outre, cette brochure est à même de faciliter la compréhension entre les différents participants à une opération de réfection.

1.4 Terminologie

Un accord préalable sur la terminologie constitue une condition essentielle à la compréhension mutuelle entre les participants à un projet. Un certain nombre de termes relatifs à la phase d'un projet de réfection trouvent leur définition dans les normes SIA (par exemple dans la norme SIA 103, «Règlement pour les prestations et les honoraires des ingénieurs» [31]). La recommandation SIA 169 «Maintenance des ouvrages de génie civil» donne des références pour les ouvrages existants. On y trouve les termes propres à la surveillance, l'inspection, l'entretien et la rénovation des ouvrages (figure 1.8).

L'un des objectifs de la révision de la recommandation SIA 169 est d'harmoniser les différentes terminologies qui sont actuellement utilisées par la SIA ou la VSS. Les mêmes termes devraient pouvoir s'appliquer dans le bâtiment et les installations techniques du bâtiment. Un groupe de travail indépendant a publié en 1992 une proposition pour une nouvelle terminologie (27) approuvée tant par la SIA que par la VSS, qui sera prochainement introduite dans les normes.

La présente publication se réfère cependant encore principalement à la terminologie mise au point dans la recommandation SIA 169 en vigueur (figure 1.8).

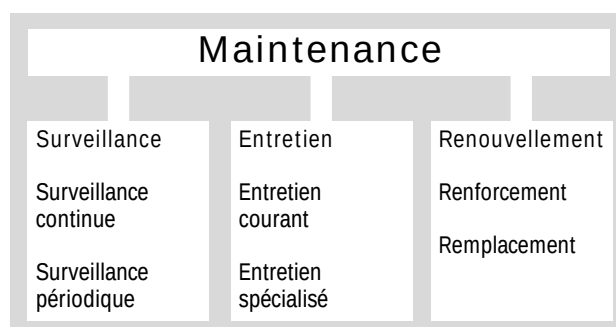


Figure 1.8
La maintenance des ouvrages de génie civil selon la Recommandation SIA 169 (1987)

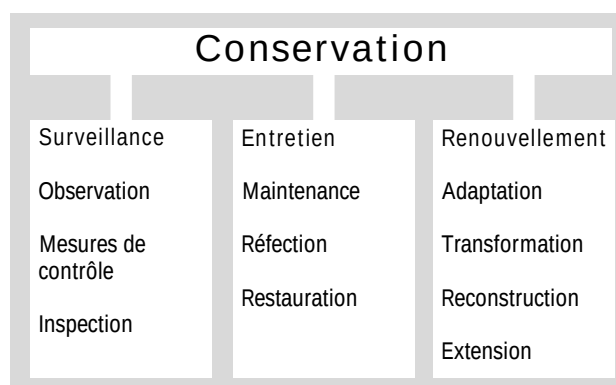


Figure 1.9
La maintenance des ouvrages selon la proposition 1992 (27) et le projet de norme SIA 169, 1993 (en consultation)

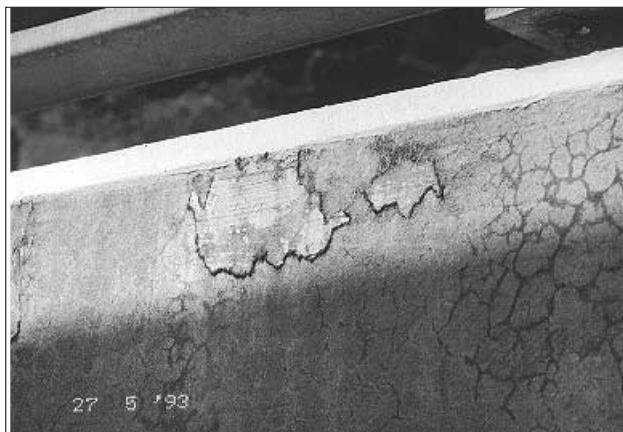


Figure 1.10
La corrosion des armatures se manifeste par des dégâts reconnaissables à l'examen visuel



Figure 1.11
Une inspection permet de découvrir les dégâts à temps

1.5 Réfection du béton

Une protection insuffisante des armatures contre la corrosion est généralement la principale cause de la diminution de la durabilité d'une construction en béton armé. La corrosion active des armatures conduit à une diminution de l'aptitude au service ou même de la sécurité structurale d'une construction. Des dégâts à la surface du béton dus à l'abrasion, aux intempéries ou aux sels de déverglaçage, peuvent déjà nécessiter des travaux de réfection, mais ce type de dommages n'est toutefois pas traité dans la présente publication.

Les mesures de réfection ont pour but de reconstituer la durabilité d'un élément d'ouvrage en fonction des exigences prescrites et de garantir l'aptitude au service et la sécurité structurale pour la durée de vie prévue.

L'envergure de la réfection dépend principalement des différences entre l'état existant et l'état exigé de l'ouvrage. Dans les cas où la protection contre la corrosion des armatures n'est que peu endommagée, la durabilité exigée peut à la rigueur être obtenue uniquement par des mesures de protection complémentaire appliquées à la surface du matériau. Là où les dégâts à la protection contre la corrosion sont déjà plus avancés, les mesures seront plus conséquentes. La réparation exigera le remplacement du béton endommagé et la suppression du processus de corrosion par des méthodes électrochimiques ou autres.

Lors de réfection, comme pour toutes les tâches de l'ingénieur, une démarche systématique s'impose. La solution du problème commence par la récolte des données (état existant), l'analyse des dégâts et la détermination des causes des dommages; ce n'est qu'après avoir défini les objectifs et les autres conditions, que l'on peut passer à l'établissement du projet détaillé et à la réfection proprement dite.

Les intervenants seront conscients en l'occurrence qu'il n'est pas possible d'agir comme on le ferait dans le cas d'une construction neuve. L'utilisation d'un ouvrage existant pose un certain nombre de conditions préalables à prendre en considération dès le début du travail.

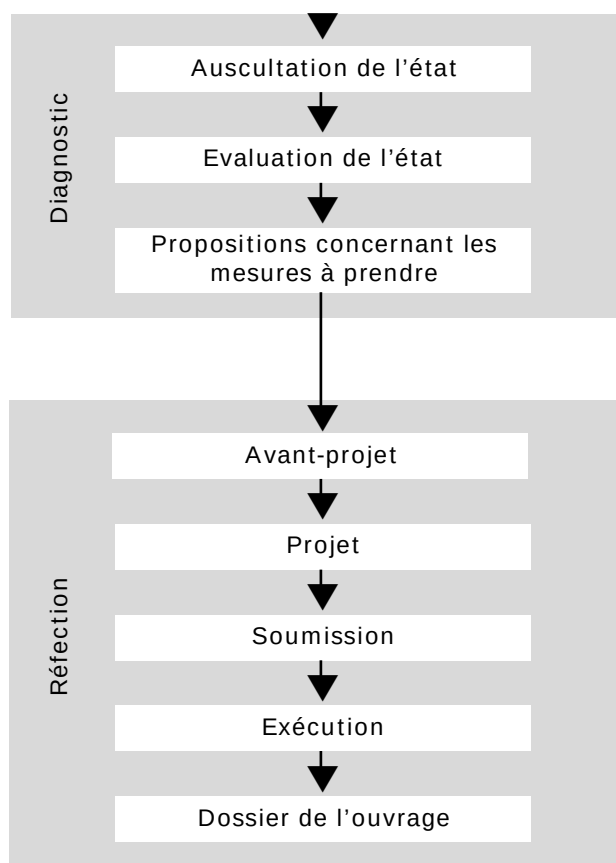


Figure 1.12
Étapes de la marche à suivre, de l'auscultation à la réfection



Figure 1.13
Les fournisseurs de produits sont à l'origine du développement des premières techniques de réparation du béton



Figure 1.14
D'autres impulsions ont été apportées par les entreprises qui ont développé des outillages et des procédés spécifiques

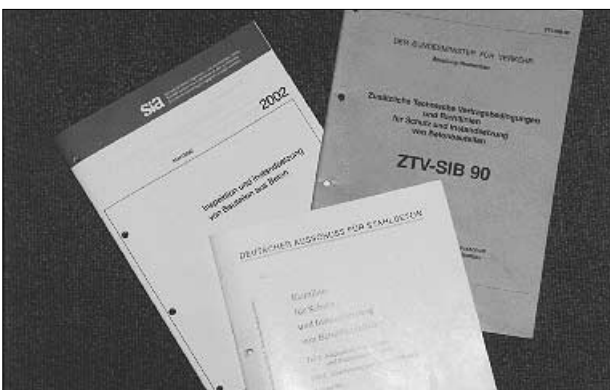


Figure 1.15
Ce n'est qu'au cours de ces dernières années que les premières normes et directives ont apporté une aide complémentaire à l'ingénieur

1.6 Normes, directives

La technique de réparation des ouvrages en béton armé ne s'est développée que dans le courant des années 80. De nombreuses questions restent aujourd'hui encore sans réponse et des constats de longue durée impliquant les nouvelles technologies font défaut.

Le développement des matériaux et des techniques de réparation du béton armé reposait, il y a quelques années encore, entre les mains des fournisseurs des produits. Les nouveaux produits pour la protection superficielle et pour le remplacement du béton ont, pour la plupart, été développés par des entreprises innovatrices à partir de produits existants. A la fin des années 80, les utilisateurs, ingénieurs et maîtres d'ouvrage, ont également commencé à s'intéresser à ce problème, de manière globale, soulevant des questions nouvelles, aujourd'hui partiellement résolues. Celles-ci ont mis en branle, à la même époque, différents projets de recherche, en Suisse et à l'étranger.

L'approche relativement nouvelle de ces problèmes se reflète dans la pauvreté des moyens existants à disposition de l'ingénieur. Il n'y a pas de normes spécifiques sur ce thème en Suisse, et la littérature sur le sujet est mince: en 1985, le groupe suisse WTA-CH (Groupe scientifique et technique pour la restauration des monuments et des constructions) publie une fiche technique, «Entretien des ouvrages en béton, protection et réparation» (41). En 1990, paraît la documentation SIA 2002, «Inspection et remise en état des éléments de construction en béton» (38). Ces deux publications donnent de nombreuses indications sur des problèmes particuliers ainsi que sur la marche à suivre en général. Elles ne contiennent cependant pas de données sur la démarche systématique à appliquer, ni sur les exigences et les essais des produits.

C'est aussi en 1990 que sont édictées en Allemagne les deux directives suivantes:

- Conditions techniques et directives complémentaires pour la protection et la réparation d'éléments d'ouvrages en béton (4), du Ministère fédéral des transports («Zusätzliche technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen» ZTV-SIB 90).

- Directives pour la protection et la réparation d'éléments d'ouvrages en béton [6], de la commission allemande pour le béton armé («Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen», RiLiDAfStB).

C'est la première fois que des directives préconisent une démarche systématique allant du projet jusqu'à l'exécution, en passant par le choix des produits, avec les critères à considérer pour le projet, ainsi que les exigences détaillées pour le projet et l'exécution. Bien que ces deux documents, traitant de domaines semblables, divergent sur différents points, ils représentent néanmoins un grand progrès en direction de l'uniformisation des méthodes et des possibilités de comparaison des produits offerts. Les principes de ces directives sont actuellement pris en considération pour l'élaboration de normes internationales (24). Il faut toutefois s'attendre à des modifications par rapport aux règles appliquées en Allemagne, essentiellement dans le domaine des essais des matériaux. Dans ce cadre, les dernières expériences allemandes, celles d'autres pays joueront un rôle. On peut ainsi escompter que, dans le cadre du CEN (Comité européen de normalisation), dans un délai de 2 à 4 ans, des normes ou des directives applicables dans toute l'Europe seront disponibles.

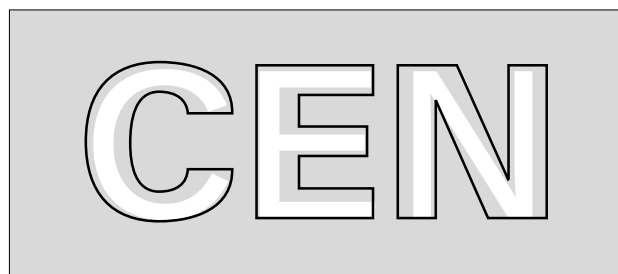


Figure 1.16
Dans quelques années, des normes valables dans toute l'Europe (CEN : Comité Européen de Normalisation) remplaceront les diverses directives nationales

1.7 Buts et limites de la publication

La publication et le cours «Réfection des ouvrages en béton» de PI BAT, s'adressent aux ingénieurs confrontés au projet, à la préparation et à la réalisation de mesures de réfection d'ouvrages en béton armé. Ils présentent les conditions qui sont dignes d'être prises en considération et un choix de solutions possibles. L'application d'une démarche systématique est privilégiée pour la recherche de solution, basée sur le relevé de l'état de l'ouvrage et un diagnostic établi en liaison avec les causes des dégâts; s'ensuivent les mesures de réfection adéquates qui s'appuient sur des objectifs clairement définis. Les produits seront choisis en fonction des exigences spécifiques de la réfection projetée et leur application respectera toutes les prescriptions des fournisseurs de produits. L'obtention des caractéristiques définies sera régulièrement contrôlée pendant l'exécution au moyen d'essais. La présente documentation est basée sur la démarche systématique selon les directives RiLiDafStB [6].

Le cours et la publication sont toutefois limités aux principaux éléments de la réfection du béton. Parmi les différentes mesures de protection des armatures contre la corrosion, nous avons retenu celles de protection des surfaces (imprégnation et revêtement

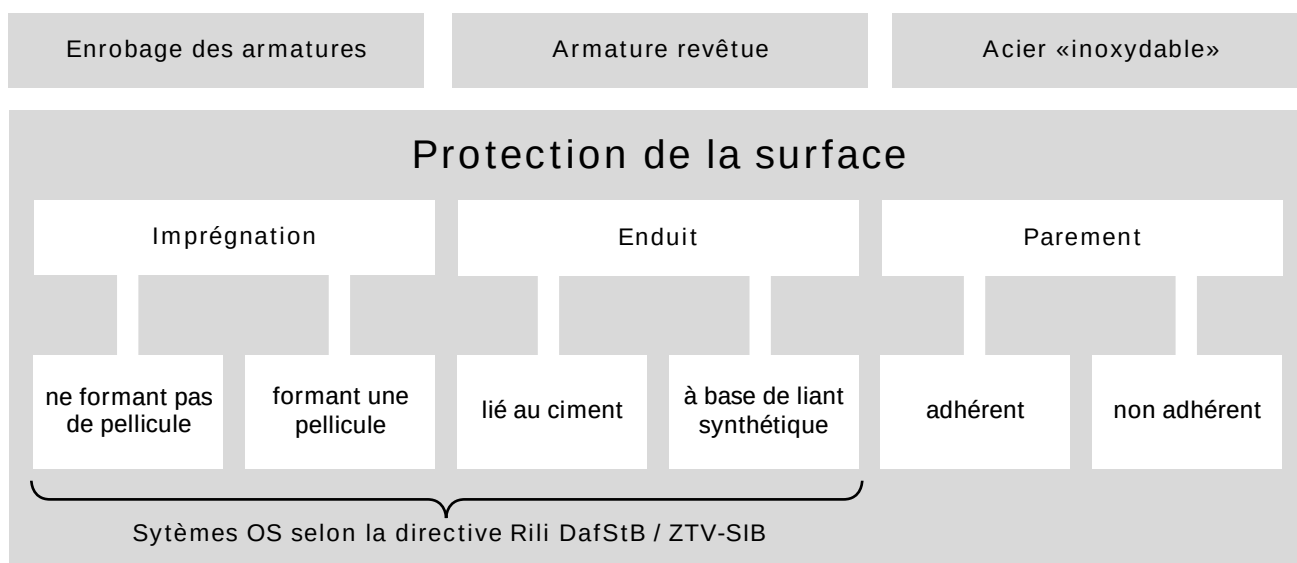


Figure 1.17
Mesures pour la protection des armatures contre la corrosion (sans les procédés électrochimiques)

R Repasivation		W Limitation de la teneur en eau		C Armatures revêtues		CP Protection cathodique contre la corrosion	
carb.	Cl ⁻	carb.	Cl ⁻	carb.	Cl ⁻	carb.	Cl ⁻
R1		Enduit		Elimination et reprofilage		Avec anode active	
		W	W-Cl	C	C-Cl		
Elimination et reprofilage							
R2	R-Cl						
ER	ECE						
Inhibiteurs							



Figure 1.19

Il est admis que les participants au cours connaissent déjà les mécanismes des dégradations et les systèmes de protection des surfaces. Le traitement d'un travail de réfection de béton est aussi basé sur une auscultation préalable et son évaluation

La présente publication présuppose que les résultats d'une étude sur l'état de l'ouvrage, y compris l'appréciation de ces résultats, sont connus des participants au cours ou des lecteurs de cette publication, et que ces derniers savent comment exploiter ces informations. Elle ne fournit pas non plus de données de base sur les mécanismes de dégradation ou sur les systèmes de protection superficielle, tous sujets qui seront développés dans d'autres documentations de PI BAT.

2. Principes pour la protection contre la corrosion des armatures

2.1	Introduction	25
2.2	Vue d'ensemble	26
2.3	Principes de réfection en cas de corrosion due à la carbonatation du béton	28
2.3.1	Principe de réfection R: repassivation	29
2.3.2	Principe de réfection W: protection contre la corrosion par la limitation de la teneur en eau du béton	32
2.3.3	Principe de réfection C: protection contre la corrosion par revêtement de l'armature	33
2.3.4	Vue d'ensemble des principes de réfection dans les cas de corrosion par carbonatation	34
2.4	Principes de réfection dans les cas de corrosion due aux effets de chlorures	35
2.4.1	Principe de réfection R-Cl: rétablissement du milieu alcalin	36
2.4.2	Principe de réfection W-Cl: limitation de la teneur en eau	37
2.4.3	Principe de réfection C-Cl: revêtement de l'armature	38
2.4.4	Principe de réfection CP: protection cathodique contre la corrosion	39
2.4.5	Vue d'ensemble des principes de réfection dans les cas de corrosion par les chlorures	40

2. Principes pour la protection contre la corrosion des armatures

2.1 Introduction

La corrosion des armatures est la principale cause des dégâts infligés aux ouvrages en béton armé.

Les méthodes de lutte contre la corrosion des armatures partent de l'analyse des processus de corrosion. Trois conditions préalables, remplies simultanément, sont à même de déclencher ce processus (figure 2.1):

1. Présence d'un milieu conducteur, par exemple d'un électrolyte sous forme d'un béton humide.
2. Perte de l'efficacité de la couche de passivation à la surface de l'acier, du fait de la carbonatation du béton ou de la présence d'ions de chlorures.
3. Pénétration de l'oxygène jusqu'à l'armature à travers le béton poreux et partiellement fissuré.

Chacun de ces principes de protection des armatures contre la corrosion que nous allons décrire se propose d'annihiler l'une ou l'autre de ces conditions afin de stopper le processus de corrosion.

Ces principes se basent sur des cas types de processus de corrosion, mais souvent, dans la pratique, les dommages constatés résultent de la combinaison de plusieurs agents.

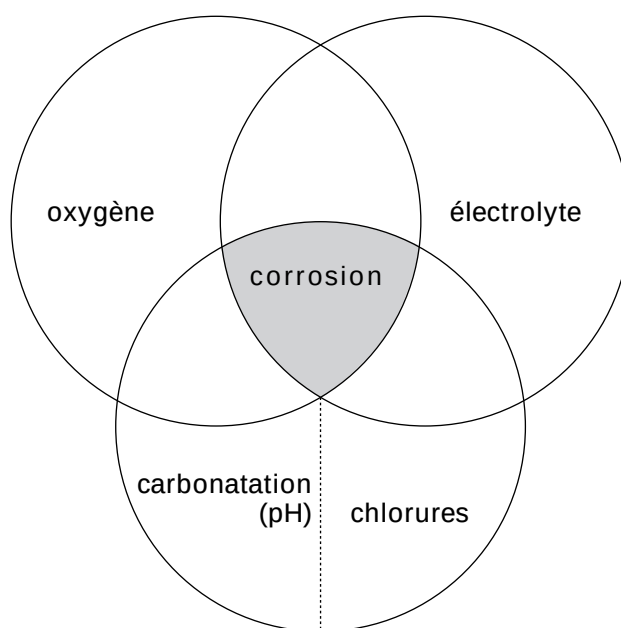


Figure 2.1
Conditions nécessaires pour déclencher la corrosion des armatures

2.2 Vue d'ensemble

La figure 2.2 tirée – et traduite – d'un projet de norme internationale (24) donne une vue d'ensemble des quatre principes fondamentaux R, C, CP et W pour la protection contre la corrosion des armatures.

Ce tableau met en évidence l'objectif poursuivi: interrompre le processus de corrosion en neutralisant un ou deux vecteurs de corrosion dans le cas d'un revêtement de l'armature.

Théoriquement, une possibilité supplémentaire de protection pourrait consister en un revêtement de la surface du béton, empêchant la pénétration de l'oxygène jusqu'aux armatures. Dans la pratique, ce procédé n'est cependant pas maîtrisé et ne peut être retenu.

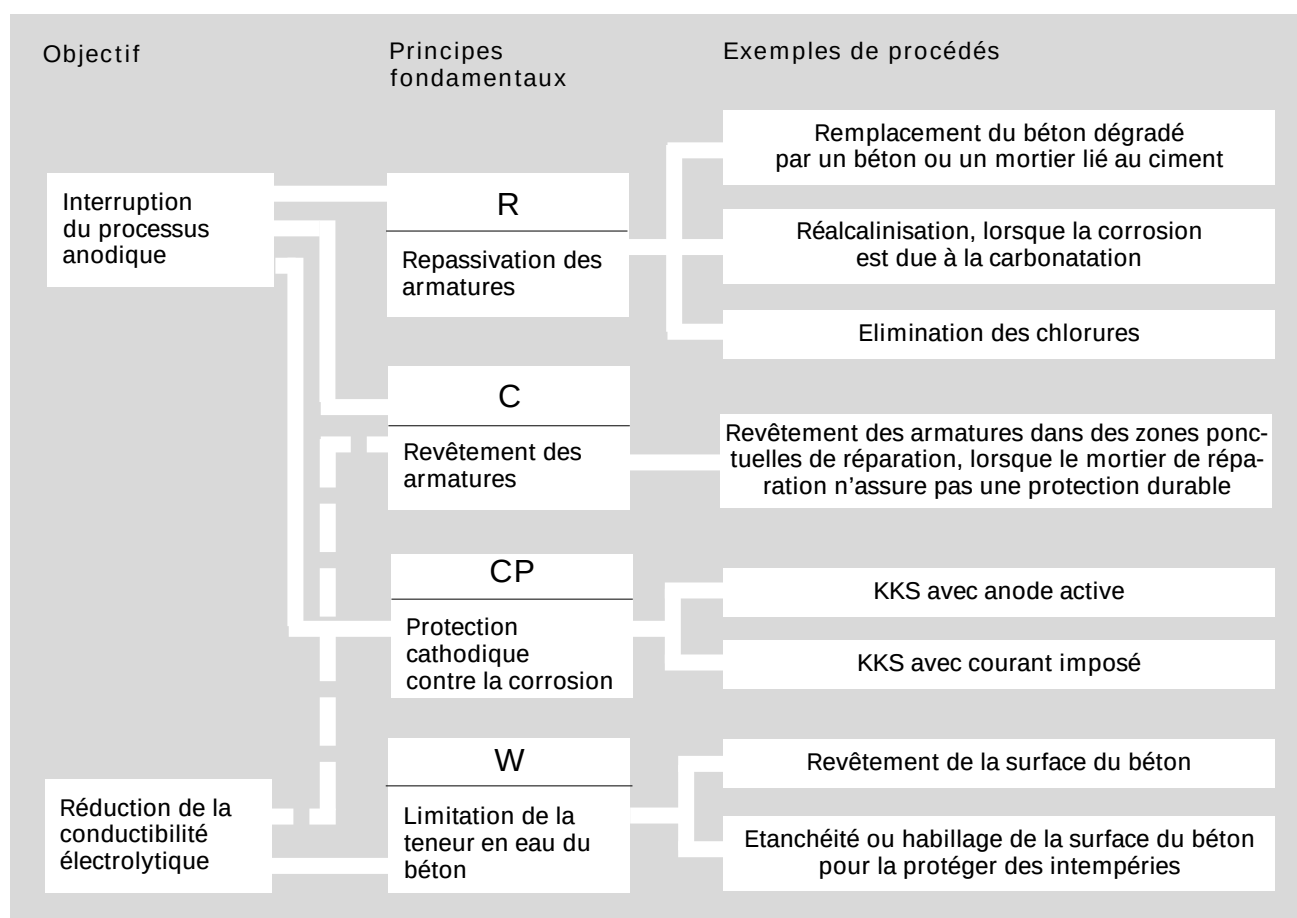


Figure 2.2
Principes fondamentaux et exemples pour la protection des armatures contre la corrosion (24)

Les méthodes de réfection valables dans les cas de corrosion des armatures à la suite de la carbonatation du béton ou de la présence de chlorures sont exposés dans les chapitres 2.3 et 2.4 suivants. Le chapitre 3, Procédés de réfection, détaille chacun des procédés utilisés dans la pratique: démolition du béton altéré et reprofilage, protection cathodique contre la corrosion KKS, déminéralisation électrochimique ECE, réalcalinisation électrochimique ER, ou inhibiteurs.

Une autre remarque préalable s'avère indispensable. La plupart des réfections avec démolition du béton altéré et remplacement par du béton «sain» affaiblissent l'ouvrage, non du fait des propriétés physico-chimiques (valeur du pH, teneur en chlorures), mais en raison des résistances. Dans la plupart des cas, l'application d'une couche de béton de remplacement sur l'ancien béton pose des problèmes (problèmes de liaison [21], Menn [30]). Ce risque, lié à la démolition du béton altéré et au reprofilage, sera considéré au moment du choix du procédé de réfection et de la détermination de la zone à démolir.

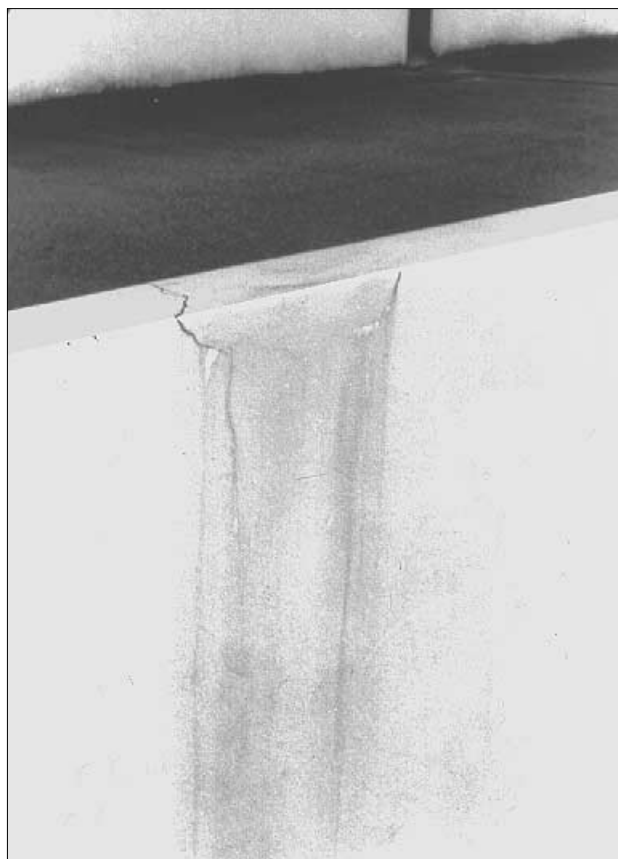


Figure 2.3
Le reprofilage d'un béton «sain», après élimination des parties détériorées, est une mesure à risque dont le succès n'est assurée que lorsqu'elle est exécutée avec le plus grand soin. De nouveaux dégâts, tels ceux illustrés sur la photo, réapparaissent fréquemment.

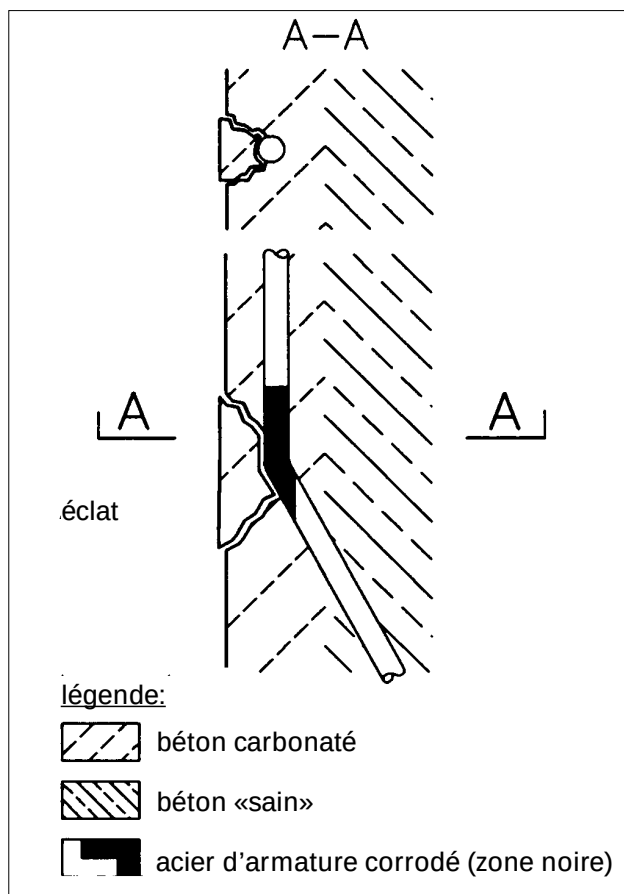


Figure 2.4
Situation de départ pour la réparation en cas de corrosion due à la carbonatation (24)

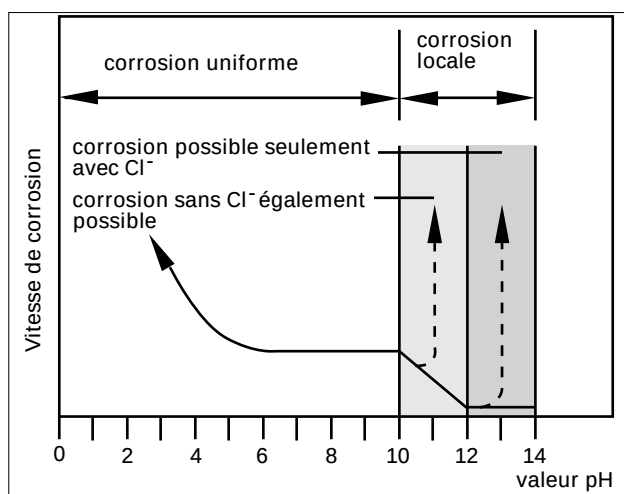


Figure 2.5
Vitesse de corrosion des armatures en fonction de la valeur du pH de l'eau des pores (1)

2.3 Principes de réparation en cas de corrosion due à la carbonatation du béton

Ce chapitre présente les principes de base applicables dans les cas de corrosion due à la carbonatation du béton. Ces principes, présentés séparément ci-après, sont résumés dans un tableau général au chapitre 2.3.4 (figure 2.11). La possibilité d'exécuter une réalcalinisation par voie électrochimique et d'obtenir une repassivation de la surface des aciers est traitée au chapitre 3.2, Réalcalinisation électrochimique. En principe, l'application d'une protection cathodique contre la corrosion (KKS) est également possible dans les cas de corrosion due à la carbonatation du béton.

Il faut être conscient que la profondeur de carbonatation peut fortement varier d'un endroit à l'autre, en raison des qualités différentes du béton.

Dans tous les cas, des exigences seront fixées qui prennent en considération les risques d'une nouvelle carbonatation. Les systèmes de remplacement du béton et les couches de protection superficielle doivent présenter une protection contre la carbonatation suffisamment grande pour prévenir toute nouvelle attaque jusqu'à la fin de la durée de vie prévue de l'ouvrage rénové. Lors de l'appréciation des risques, il faut savoir que le déclenchement d'une corrosion active exige toujours une pénétration d'eau en quantité suffisante. La carbonatation seule, sans corrosion des armatures, ne justifie pas des mesures de réparation! Les risques liés à la démolition du béton altéré et au reprofilage ont déjà été signalés au chapitre 2.2.

Les différents principes de réparation sont exposés à l'aide de schémas qui présentent l'état final après exécution des travaux. La figure 2.4 illustre la situation de départ pour un cas type. L'armature pénétrant dans la couche superficielle montre jusqu'à quelle profondeur minimale une démolition du béton altéré et un dérouillage de l'armature sont indispensables.

2.3.1 Principe de réfection R: repassivation

Le principe de base R a pour objectif de recréer la couche de passivation à la surface de l'acier, couche qui le protégera contre la corrosion pour le reste de la durée de vie de l'ouvrage. Ce principe trouve avant tout son application lorsque l'armature est encore intacte, c'est-à-dire lorsque la corrosion ne l'a encore que faiblement attaquée et qu'elle peut encore être protégée sans devoir être remplacée.

Pour faciliter la compréhension, rappelons le processus et les effets de la carbonatation:

L'alcalinité de la pâte de ciment (ciment Portland) provoque la formation d'une couche de passivation stable à la surface des aciers. Lors de la carbonatation, le CO_2 de l'air réagit avec l'hydroxyde de calcium $\text{CA}(\text{OH})_2$ du béton pour former du carbonate de calcium CaCO_3 , ce qui libère de l'eau. Au cours de cette réaction chimique, la valeur du pH diminue d'environ 12,6 à 9. La couche de passivation autour de l'acier d'armature devient instable, et sa protection est ainsi perdue (figure 2.5).

La figure 2.6 illustre le principe de base R. L'application d'une couche de mortier ou de béton lié au ciment (par exemple de béton projeté) provoque une augmentation de la valeur du pH dans l'eau des pores de la zone carbonatée, par diffusion et absorption capillaire. La condition de réalisation d'une repassivation durable de l'armature est que le béton ou le mortier de réfection présente lui-même une résistance à la carbonatation suffisante (dosage en ciment, compacité).

Le principe de réfection R (reconstitution du milieu alcalin) est en général subdivisé en deux solutions: R1 (réalcalinisation de toute la surface avec du béton ou du mortier alcalin lié au ciment Portland), et R2 (améliorations locales avec du mortier ou du béton alcalin [6], [24]).

Une réalcalinisation du béton carbonaté ainsi qu'une repassivation de la surface des aciers peuvent également être obtenues par réalcalinisation électrochimique ER. Le procédé est décrit au chapitre 3.2.

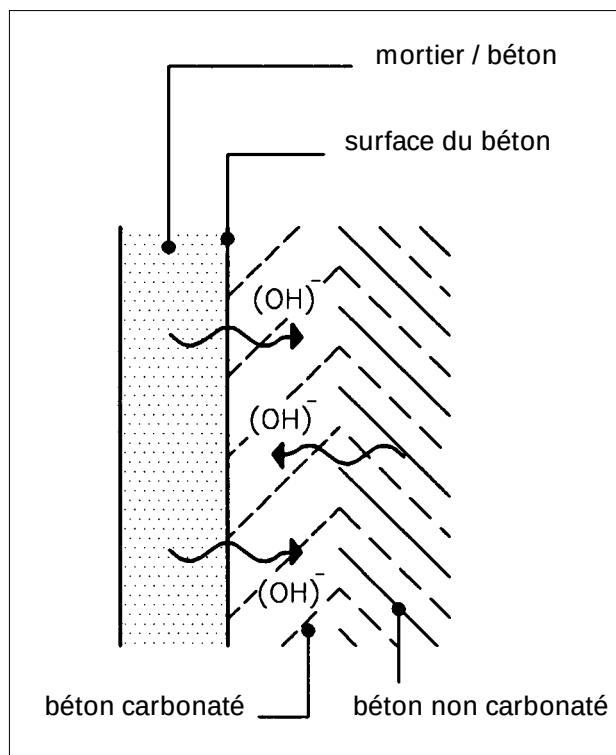
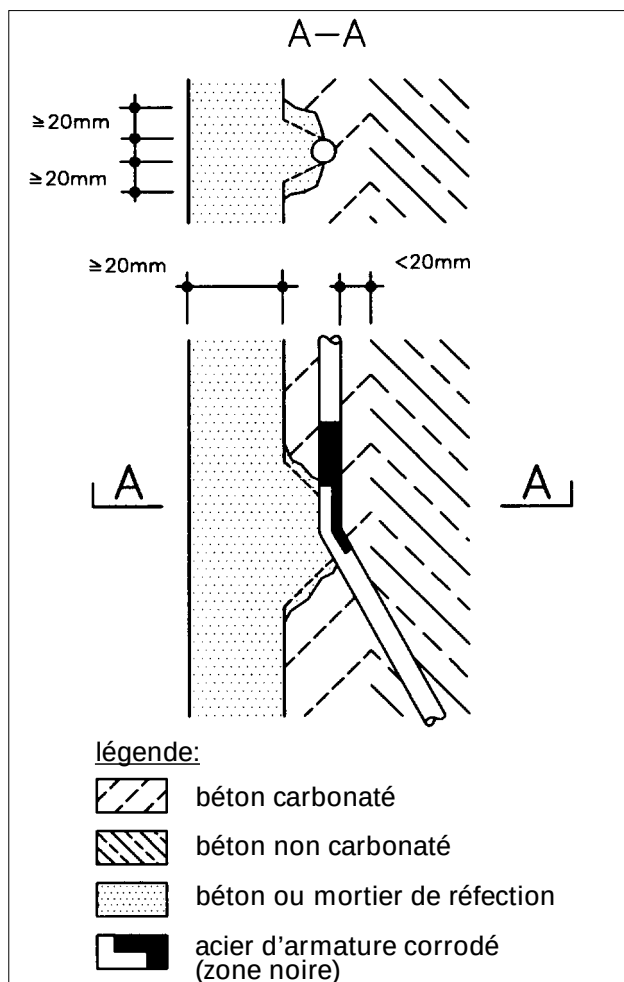


Figure 2.6
Réalcalinisation par diffusion de ions (OH^-) dans la zone du béton carbonaté (24)



Solution R1 (figure 2.7)

Réalcalinisation de toute la surface avec du béton ou du mortier alcalin:

Avec la solution R1, on réalise un revêtement à base de mortier ou de béton lié au ciment sur la zone à améliorer ainsi que sur toute la surface du béton. Le revêtement peut être appliqué aussi bien sur la surface du béton existant que sur des zones découpées de grande surface. Le béton ne doit être enlevé que pour autant qu'il soit fissuré ou désagrégué du fait de la corrosion des armatures, ou qu'il présente une résistance insuffisante comme support pour la nouvelle couche de mortier ou de béton. Le procédé ne s'impose que dans la mesure où le front de carbonatation n'a pas pénétré à plus de 20 mm derrière l'armature. Si c'est le cas, le béton doit être enlevé jusqu'au niveau de cette armature. La solution de principe R1 s'applique surtout lorsque l'épaisseur du béton de recouvrement des armatures est insuffisante. En général, elle n'est pas recommandée dans les cas où la corrosion des armatures est déjà intervenue, du fait d'une carbonatation profonde, même avec un recouvrement en béton suffisant (recouvrement de béton de 2 à 3 cm).

Pour le reprofilage des zones endommagées (éclatements) et la couche d'enduit, il faut utiliser un mortier suffisamment alcalin (ciment Portland). Dans les zones dégagées, les particules de rouille à la surface des armatures seront éliminées avant le reprofilage. Le degré de propreté de la surface de l'acier doit correspondre approximativement aux exigences pour les aciers d'armatures dans les constructions neuves (légère rouille admissible).

Solution R2 (figure 2.8)

Ce procédé ne prévoit qu'une amélioration locale à l'aide de béton ou de mortier alcalin:

La solution de principe R2 est indiquée lorsqu'on est en présence de zones de corrosion de surfaces strictement limitées. C'est le cas, par exemple, en présence de carbonatation profonde mais locale, ou d'un manque de recouvrement de béton également localisé. Cette méthode prévoit d'enlever tout le béton carbonaté autour de l'armature (également hors des zones corrodées) et de le remplacer par un béton ou un mortier alcalin lié au ciment. Pour le nettoyage des armatures, l'enlèvement des particules de rouille suffit (cf. exigences applicables à la solution R1). Lors de telles réparations locales, on veillera au risque de formation de macro-piles dans la zone de contact entre le mortier de remplacement et le béton ancien. Un manque de soin dans l'application du procédé risque de provoquer plus de problèmes qu'il n'en résoudra.

En général, lors de l'application du principe de réfection R, il est recommandé de recouvrir toute la surface du béton pour améliorer la résistance à la carbonatation. La durabilité limitée de cette mesure doit être prise en considération dans le plan d'entretien. Pour que la solution R2 soit applicable, il faut que l'épaisseur de recouvrement des armatures, également dans les zones des réparations locales, assure une résistance contre la carbonatation suffisante pour la durée d'utilisation envisagée.

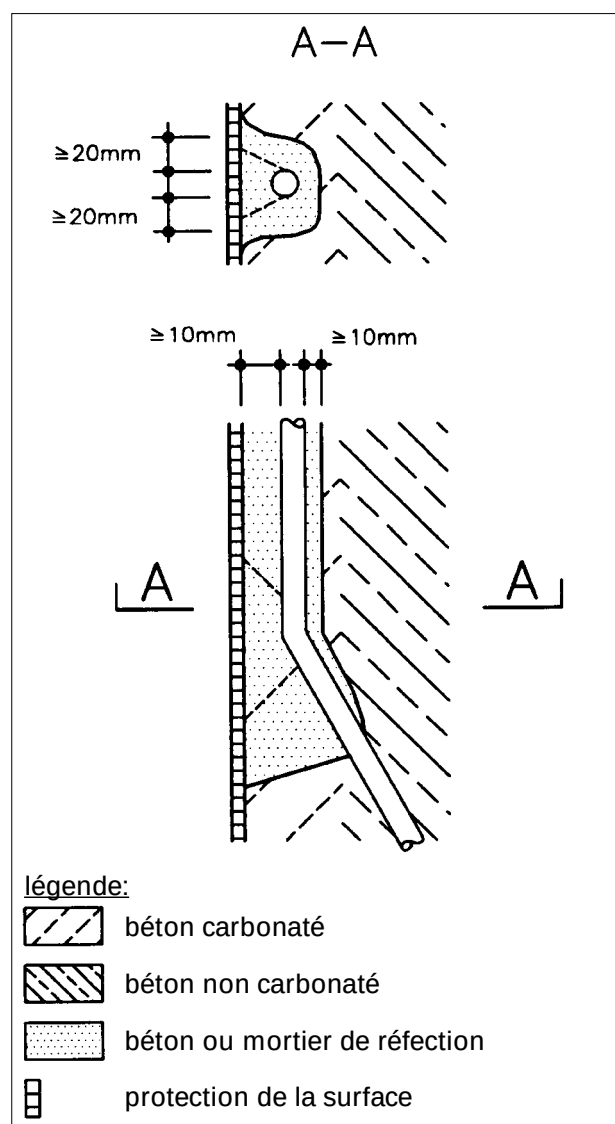


Figure 2.8
Schéma type du principe de réfection R2 (24), situation de départ voir figure 2.4

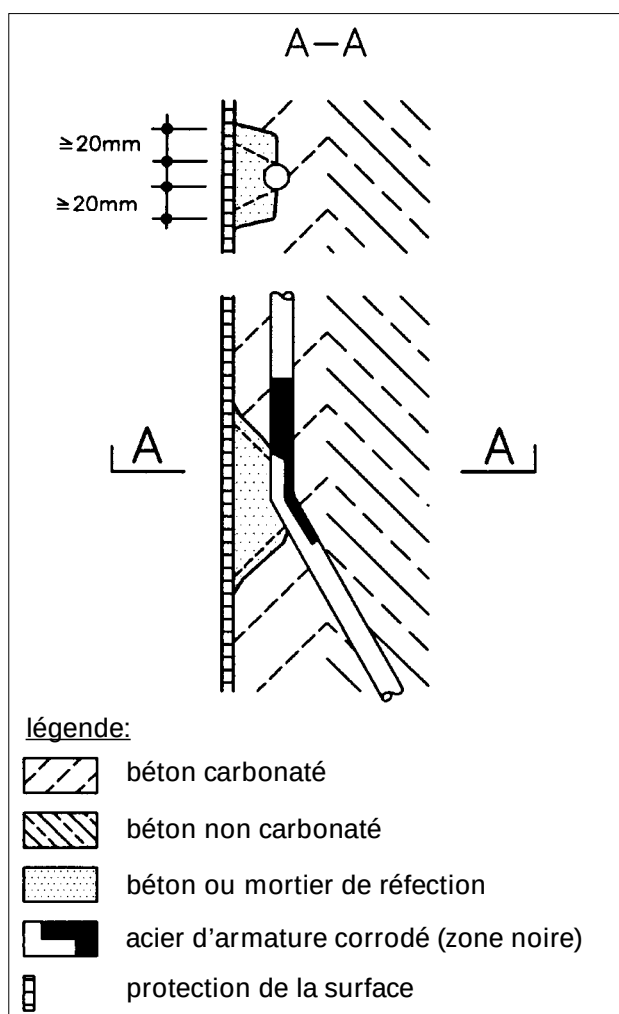


Figure 2.9
Schéma type du principe de réfection W (24), situation de départ voir figure 2.4

2.3.2 Principe de réfection W: protection contre la corrosion par la limitation de la teneur en eau du béton

Avec le principe de réfection W (figure 2.9), on réduit la conductibilité électrolytique du béton par un abaissement ou un équilibre de sa teneur en eau. Le courant de corrosion est ainsi réduit et la corrosion freinée. On s'efforce de passer d'un milieu extérieur humide à un milieu intérieur sec.

Le béton est protégé contre l'humidité de l'environnement par un système de protection des surfaces approprié. On n'enlève les couches extérieures du béton que lorsque leur solidité est insuffisante. Avant le reprofilage (avec un mortier alcalin), les armatures mises à nu seront nettoyées des particules de rouille non adhérentes. D'autres mesures ne sont pas nécessaires, le processus électrolytique de la corrosion étant interrompu.

Une imprégnation hydrophobe est envisageable comme système de protection des surfaces. Elle agira de manière à éloigner l'eau tombant directement sur la surface, tout en maintenant la capacité de diffusion de la vapeur d'eau. Il est important de s'assurer qu'aucune infiltration d'eau ne soit possible par l'arrière du mur ou par les fondations.

Outre l'imprégnation hydrophobe, d'autres systèmes de protection des surfaces sont conçus pour empêcher l'eau de pénétrer le béton. Mais leur application est plus coûteuse et ils présentent le désavantage d'une diffusion de vapeur plus faible.

Il faut toutefois signaler qu'une imprégnation hydrophobe qui éloigne l'eau d'une surface, avec la même perméabilité au gaz, peut, selon les circonstances, augmenter les risques de carbonatation du béton.

Lors de réfection basée sur le principe de réfection W, l'efficacité de la protection des surfaces sur le processus de corrosion doit être contrôlée par prélèvement d'échantillons, au moyen de mesures de potentiel ou grâce à des électrodes de mesures (détecteurs) fixées à demeure, ainsi que par une surveillance visuelle régulière. Cette surveillance est recommandée en raison de l'efficacité encore douteuse d'un traitement de surface sur le degré de corrosion. La protection des surfaces sera régulièrement entretenue et renouvelée.

2.3.3 Principe de réfection C: protection contre la corrosion par revêtement de l'armature

On ne devrait recourir au principe de réfection C que lorsque les principes R et W sont inapplicables du fait de conditions particulières.

Le principe de réfection C vise à protéger l'armature contre la corrosion, pendant la durée de vie de l'ouvrage, par un revêtement isolant contre l'électricité. Une armature encore intacte ou échangeable est une condition préalable à la mise en œuvre de ce système. L'application d'un béton de remplacement de type alcalin n'est plus nécessaire en raison du revêtement approprié des aciers d'armature.

Dégager complètement l'acier d'armature: l'expérience a montré qu'il fallait dégager un espace libre d'au moins 20 mm de chaque côté de l'armature, et d'au moins 10 mm derrière celle-ci. Nettoyer la surface de l'acier jusqu'au degré de propreté SA 2 1/2 (voir chapitre 3.1) avec un procédé de décapage par projection (voir chapitre 5.3). Cette mesure est indispensable pour l'exécution d'un revêtement correct. Protéger ensuite l'armature par un revêtement organique adéquat utilisé en construction métallique, de préférence à base de résine époxy.

Dans les cas normaux, le principe de réfection C est en général combiné avec le principe W, ce qui n'est pas obligatoire quand le béton peut être enlevé jusqu'à une profondeur suffisamment grande pour qu'une dépassement demeure exclue dans les zones non remises en état.

Dans la plupart des cas il sera judicieux d'appliquer un système de protection des surfaces complémentaire sur toute la surface du béton, pour augmenter la résistance à la carbonatation. Un tel revêtement sera régulièrement contrôlé, entretenu et renouvelé.

Dans la pratique, le revêtement des armatures reste une mesure problématique, car l'adhérence du revêtement ne peut être garantie aux endroits où l'acier n'a pas pu être suffisamment nettoyé (points de croisement, etc.). Un revêtement total et sans défaut n'est possible que dans des cas très favorables. Il faut donc formuler des réserves en ce qui concerne la durabilité d'une réfection effectuée selon le principe C. Les armatures revêtues conduisent par ailleurs à des potentiels fortement négatifs qui ne facilitent pas l'établissement ultérieur de mesures de potentiel.

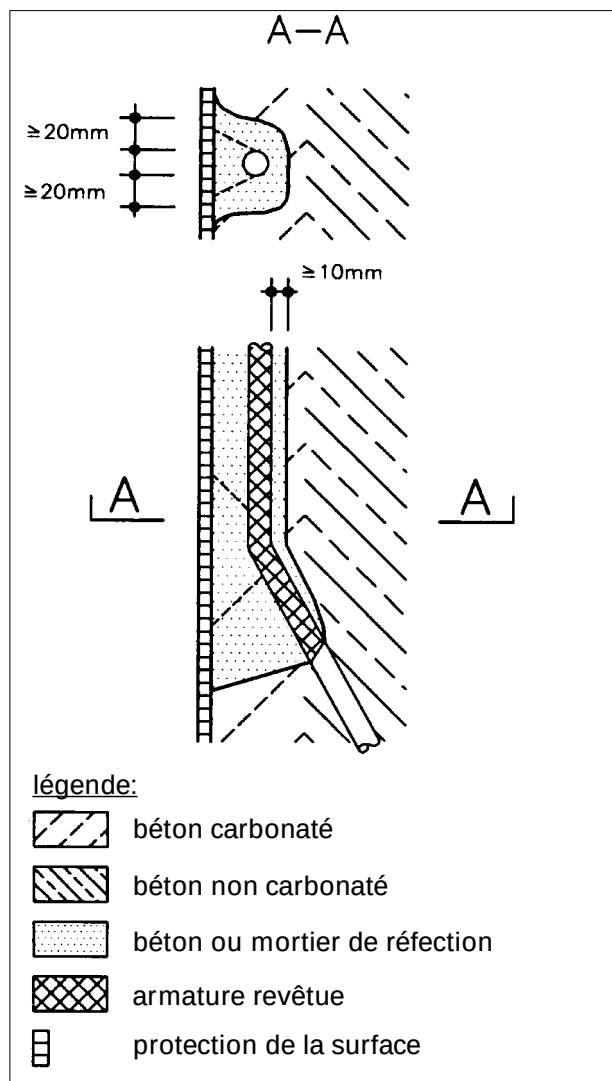


Figure 2.10
Schéma type du principe de réfection C (24), situation de départ voir figure 2.4

2.3.4 Vue d'ensemble des principes de réparation dans les cas de corrosion par carbonatation

Les principes de réparation résumés dans la figure 2.11 sont traités de manière détaillée aux chapitres 2.3.1 à 2.3.3.

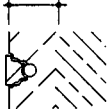
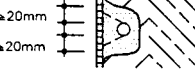
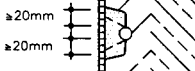
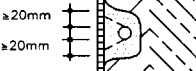
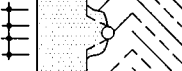
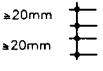
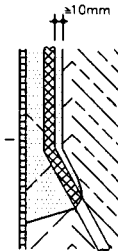
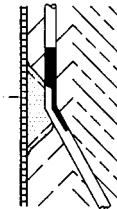
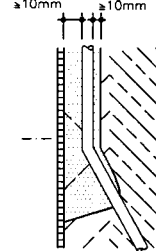
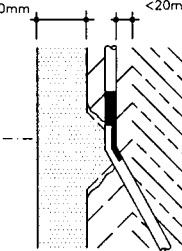
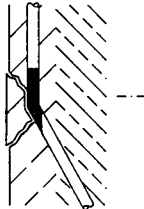
type du dégât	R1	R2	W	C	
	repassivation	repassivation	limitation de la teneur en eau	revêtement de l'armature	
	béton ou mortier sur toute la surface	réfection ponctuelle	enduit de surface		
béton carbonaté   					
remplacement du béton	seulement les zones fissurées et éclatées	●		●	
	toutes les zones dépassivées		●		●
traitement de la surface de l'acier	Sa 2 ¹ / ₂ + enduit	non recommandé	non recommandé	pas nécessaire	●
	dérouillage suffit	●	●	●	
mortier ou béton de réfection	alcalin avec capacité «tampon»	●	●		
	alcalinité non exigée			●	●
protection complémentaire de la surface du béton	non exigée	●	●		●
	conseillée		●		●
	exigée			●	

Figure 2.11

Principes de réparation dans les cas de corrosion due à la carbonatation (24) (les mesures adéquates sont indiquées par le signe ●; les procédés électrochimiques ainsi que les inhibiteurs ne sont pas représentés, voir chapitre 3.2 à 3.5)

2.4 Principes de réfection dans les cas de corrosion due aux effets de chlorures

Nous présentons brièvement dans ce chapitre les principes de réfection dans les cas de corrosion par les chlorures. Les systèmes sont décrits de manière plus détaillée au chapitre 3, Procédés de réfection. Le procédé de déminéralisation électrochimique ECE et celui par application d'inhibiteurs feront l'objet des chapitres 3.3 et 3.5.

Dans la corrosion par les chlorures, il faut considérer les aspects complémentaires aux cas de corrosion par carbonatation. Dans ce cadre, il est impératif de s'assurer que la protection des surfaces empêchera efficacement de nouvelles pénétrations de chlorures.

La corrosion déclenchée par les chlorures conduisant à des attaques locales et ponctuelles (corrosion perforante), le nettoyage de l'armature prend toute son importance. Les parties corrodées seront nettoyées de toutes traces de rouille et de chlorures par lavage à l'eau sous haute pression.

Lors de la réparation de dégâts, on veillera au problème des liaisons du fait de la démolition du béton dégradé et du reprofilage (liaison avec l'ancien béton). Les risques seront soigneusement évalués.

Il est recommandé de surveiller le comportement des zones réparées. Les mesures de potentiel mises à part (attention: impossible en présence de revêtement isolant de l'électricité!), on peut également d'installer dans l'ouvrage des détecteurs aux endroits réparés. Concurrément aux mesures de potentiel, ces détecteurs permettent de surveiller le potentiel de corrosion des armatures et, par conséquent, les modifications du degré de corrosion.

Les principes de réfection dans les cas de corrosion par les chlorures sont résumés dans le tableau général au chapitre 2.4.5 (figure 2.17).

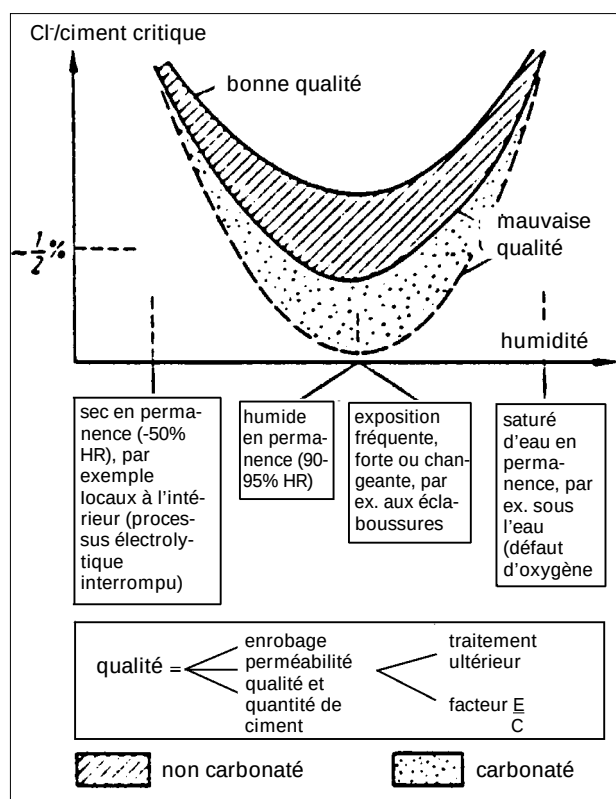


Figure 2.12
Influences de la qualité du béton et des conditions de l'environnement sur la teneur critique en chlorures (26). Comme le montre cette figure, la teneur critique en chlorures qui déclenche la corrosion n'est pas une constante. Pour fixer la teneur critique en chlorures, par exemple pour déterminer la profondeur de démolition, on prendra en considération, en plus des influences indiquées, l'état de corrosion existant, la sécurité structurale, ainsi que les risques liés au remplacement du béton

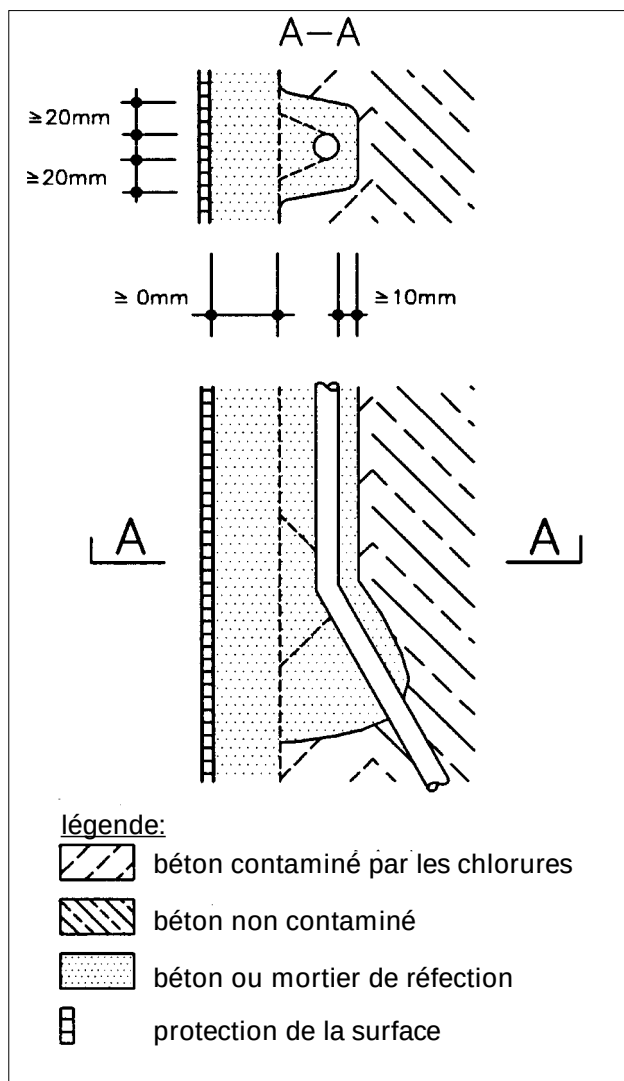


Figure 2.13
Schéma type du principe de réfection R-Cl (24) (situation de départ voir figure 2.4)

2.4.1 Principe de réfection R-Cl: rétablissement du milieu alcalin

Le principe de base R-Cl (figure 2.13) a pour objectif de rétablir la couche de passivation à la surface de l'acier et de stopper ainsi le processus de corrosion. Lors de dépassivation par l'action des chlorures, le principe de réfection R indiqué en cas de carbonatation est inapplicable. Dans ce cas le béton doit être enlevé partout où la teneur en chlorures dans la zone des armatures a dépassé les valeurs limites, indépendamment des endroits où la corrosion des armatures est apparue (figure 2.12).

La profondeur de couche à enlever sera déterminée de manière à garantir qu'ultérieurement aucune concentration critique de chlorures, dans la zone des armatures, ne soit possible du fait de la migration de chlorures par voie aqueuse et par diffusion (10). Avant le reprofilage avec un mortier alcalin, l'armature mise à nu sera nettoyée de toute rouille et de tous chlorures au moyen d'un jet d'eau à haute pression. Cette technique permet d'atteindre le degré de propreté Sa 2, même si à l'examen visuel l'aspect ne correspond pas à l'échantillon de comparaison normalisé.

Une protection de la surface du béton contre les chlorures, au moyen d'un revêtement, s'impose lorsque la surface du béton demeure exposée aux chlorures.

2.4.2 Principe de réfection W-CI: limitation de la teneur en eau

Comme pour la réfection de dégâts survenus par carbonatation, le principe de réfection W-CI (figure 2.14) a pour objectif de réduire la conductibilité électrolytique du béton par une réduction ou un équilibrage de sa teneur en eau; de cette manière on réduira le courant de corrosion par une plus grande résistance électrique et la corrosion s'en trouvera ralentie, voire stabilisée.

Comme les chlorures dans le béton augmentent la conductibilité électrolytique – s'ajoutant à celle due à la présence d'eau –, les mesures de protection des surfaces seront suffisamment efficaces pour ramener la teneur en eau à un niveau plus bas que dans les cas de corrosion par carbonatation.

En raison de ces exigences élevées et de l'insuffisance des connaissances sur l'efficacité et la durabilité de cette mesure, le principe de réfection W-CI fait l'objet de plusieurs réserves.

Le procédé ne doit être appliqué qu'une fois l'efficacité de la protection démontrée sur des surfaces d'essai. Cette preuve sera fournie par des mesures de potentiel ou par des détecteurs installés à l'intérieur de la surface.

Ce système exige que le béton ne soit enlevé que dans les zones dégradées par des éclats, fissurées, etc. Il est recommandé de nettoyer les armatures mises à nu au moyen de jet d'eau sous haute pression. En ce qui concerne l'alcalinité du béton de reprofilage, il n'y a rien de particulier à entreprendre.

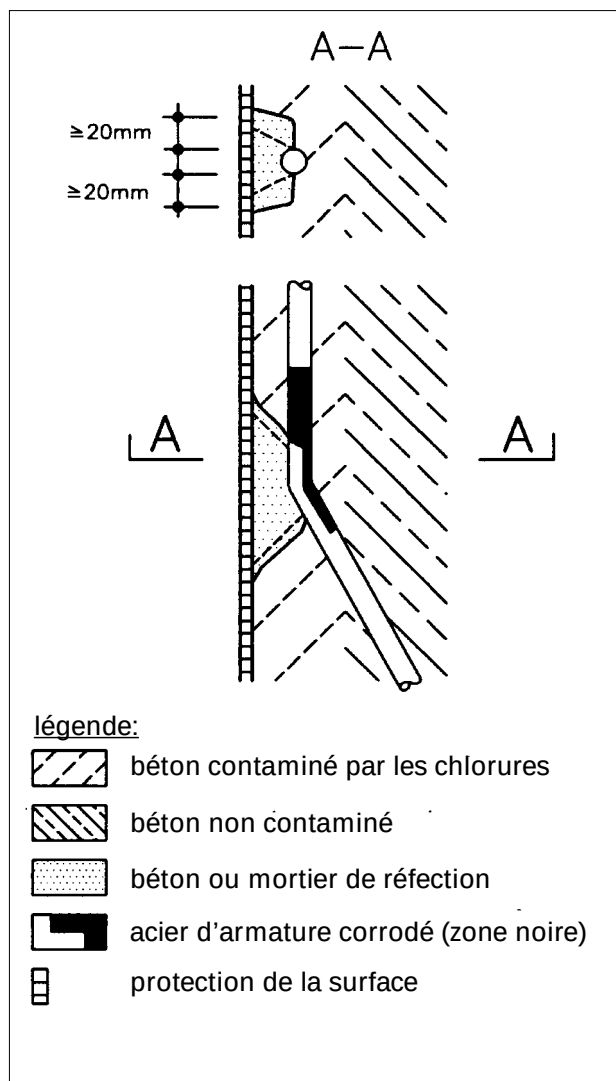


Figure 2.14
Schéma type du principe de réfection W-CI (24) (situation de départ voir figure 2.4)

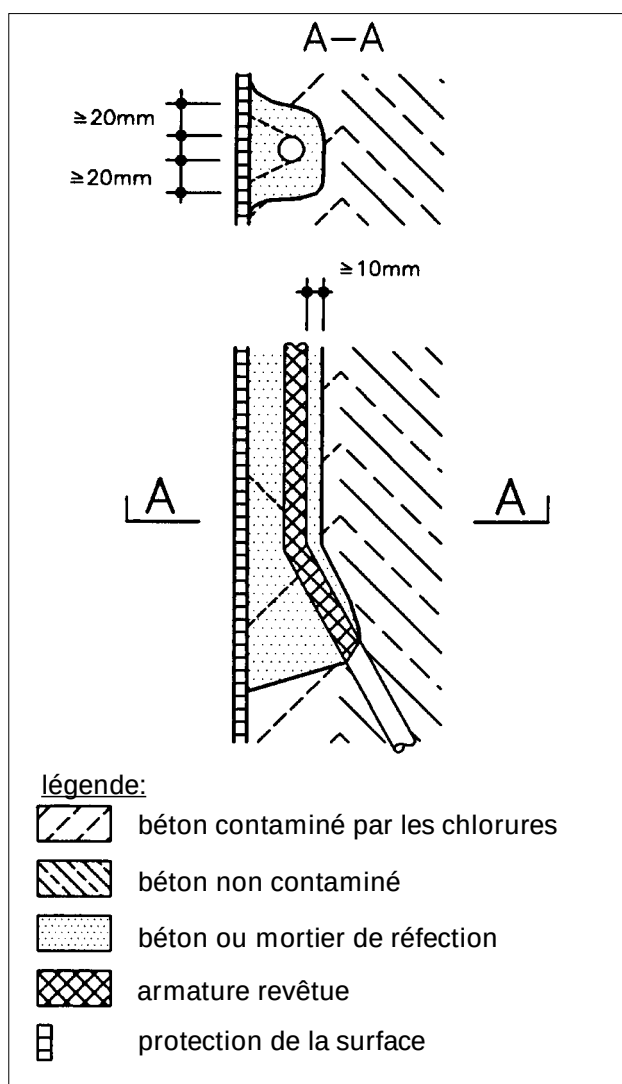


Figure 2.15
Schéma type du principe de réparation C-Cl (24) (situation de départ voir figure 2.4)

2.4.3 Principe de réparation C-Cl: revêtement de l'armature

Le principe de réparation C-Cl (figure 2.15) entre en jeu lorsqu'on ne peut recourir aux principes de réparation R-Cl et W-Cl. Les possibilités d'application dépendent des conditions locales.

Le principe de réparation C-Cl a pour objectif d'interrompre le transfert d'électrons à la surface de l'acier et de stopper la dégradation du fer, au moyen d'un revêtement isolant de l'électricité à la surface de l'acier. C'est pourquoi l'exigence d'un environnement alcalin peut être abandonnée.

De même que pour l'application du principe de réparation C (corrosion à la suite de carbonatation), dans les cas de corrosion par les chlorures, on dégage l'armature suffisamment pour la nettoyer jusqu'au degré de propreté Sa 2 1/2; vient ensuite l'application d'un revêtement conformément aux règles de la construction métallique. Afin d'enlever tous les chlorures, on utilise un jet d'eau à haute pression. Pour les revêtements des aciers, on conseille des produits à base de matières organiques, de préférence à base de résine époxy.

Il faut toutefois émettre certaines réserves en ce qui concerne la durabilité de ce revêtement difficile à appliquer in situ (voir chapitre 2.3.3). Le principal problème est de garantir la durabilité de l'adhérence du revêtement sur la surface de l'acier et d'obtenir une pellicule continue.

2.4.4 Principe de réfection CP: protection cathodique contre la corrosion

Le principe de réfection par protection cathodique (figure 2.16) entre en ligne de compte dans les cas de corrosion par les chlorures. La figure 2.2 montre que deux procédés peuvent être appliqués: celui à courant imposé issu d'une source de courant externe, ou le procédé à anode active. C'est le premier de ces procédés qui est utilisé le plus fréquemment. Le processus de la protection cathodique contre la corrosion fait l'objet d'une description complète au chapitre 3.2.

Le grand avantage de la protection cathodique contre la corrosion est de n'exiger aucune démolition du béton, c'est-à-dire que les parties «saines» de la construction restent indemnes. Seul le béton des zones éclatées ou fissurées doit être enlevé. Les armatures mises à nu seront dérouillées avant le reprofilage. Afin d'assurer la conductibilité requise, le reprofilage sera exécuté avec un mortier ou un béton lié au ciment. La protection cathodique contre la corrosion demande une étude et une exécution très soignées. Le choix sera dicté par la solution la mieux adaptée à l'objet traité (voir chapitre 3.2).

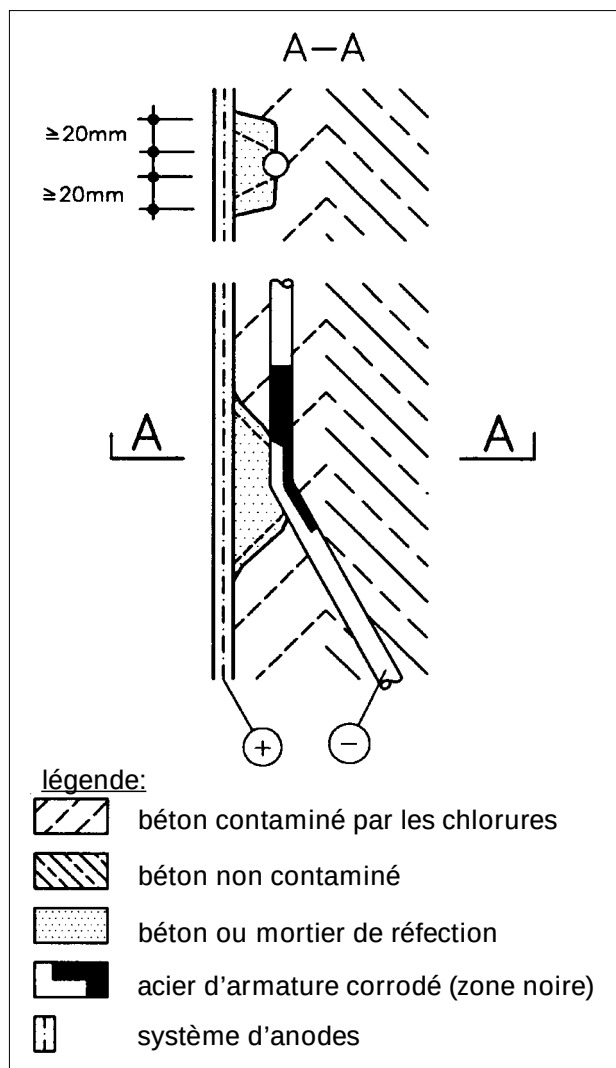
Une surveillance régulière des systèmes de protection cathodique contre la corrosion s'avère nécessaire, à l'image des autres systèmes de réfection dans les cas de corrosion par les chlorures.

Protection cathodique contre la corrosion avec courant imposé:

L'action de la protection cathodique contre la corrosion par courant imposé se base sur la polarisation de l'armature, avec des anodes inertes, par un courant induit extérieur. L'efficacité et la durabilité de la protection dépendent essentiellement de la conductibilité du béton et de la durée de vie des anodes.

Protection cathodique contre la corrosion avec anodes actives:

Dans le cas de la protection cathodique contre la corrosion avec anodes actives, les transferts d'électrons résultent de la mise en place d'un métal non noble (anode active). L'anode active, en zinc par exemple, se corrode en lieu et place de l'acier des armatures. Vu que dans ce cas, c'est l'anode qui est «consommée», la protection se trouve limitée dans le temps. C'est pourquoi cette méthode n'entre pratiquement pas en ligne de compte.



2.4.5 Vue d'ensemble des principes de réfection dans les cas de corrosion par les chlorures

Les principes de réfection résumés dans la figure 2.17 sont traités de manière détaillée aux chapitres 2.4.1 à 2.4.4.

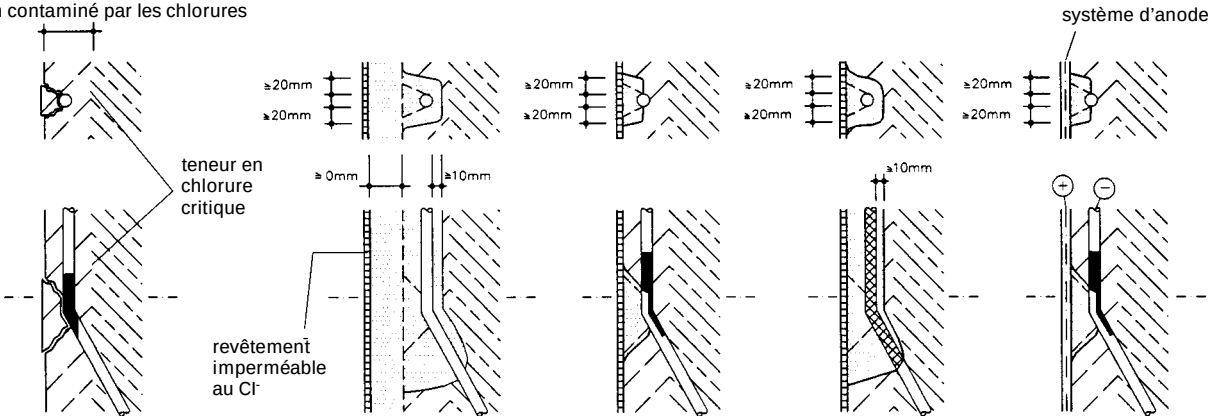
type du dégât				
	R	W	C	CP
	repassivation	limitation de la teneur en eau	revêtement de l'armature	protection cathodique
	réfection avec béton ou mortier alcalin	enduit de surface		
Béton contaminé par les chlorures 				
remplacement du béton	seulement les zones fissurées et éclatées	●		●
	toutes les zones dépassivées	●	●	
traitement de la surface de l'acier	Sa 2 ^{1/2} + enduit	enduit non recommandé	pas nécessaire	enduit exclu
	dérouillage suffit	● y compris rouille dans les cavités	● y compris rouille dans les cavités	●
mortier ou béton de réfection	alcalin avec capacité «tampon»	●		● conducteur
	alcalinité non exigée		●	
protection complémentaire de la surface du béton	non exigée			●
	exigée (impermeables aux Cl ⁻)	●	●	

Figure 2.17

Principes de réfection dans les cas de corrosion due aux effets des chlorures (24) (les mesures adéquates sont indiquées avec le signe ●; les procédés électrochimiques ainsi que les inhibiteurs ne sont pas représentés, voir chapitre 3.2 à 3.5)

3. Procédés de réparation

3.1	Elimination des zones de béton dégradé et reprofilage	43
3.1.1	Introduction	43
3.1.2	Elimination des zones de béton dégradé	44
3.1.3	Reprofilage	45
3.2	Protection cathodique contre la corrosion (KKS)	51
3.2.1	Introduction	51
3.2.2	Mécanisme	51
3.2.3	Projet, exécution et surveillance	52
3.3	Déminéralisation électrochimique (ECE)	53
3.3.1	Introduction	53
3.3.2	Mécanisme	53
3.3.3	Projet, exécution et surveillance	54
3.4	Réalcalinisation électrochimique (ER)	56
3.4.1	Introduction	56
3.4.2	Mécanisme	56
3.4.3	Projet, exécution et surveillance	57
3.5	Inhibiteurs	58
3.5.1	Introduction	58
3.5.2	Mécanisme	58
3.5.3	Projet, exécution et surveillance	59

3. Procédés de réfection

3.1 Elimination des zones de béton dégradé et reprofilage

3.1.1 Introduction

Le procédé de réfection par élimination des zones de béton dégradé et reprofilage s'applique à tous les principes de réfection. Il permet d'éliminer les bétons imbibés de chlorures ou carbonatés. La démolition des zones de béton dégradé (figure 3.1) s'impose également lorsque le béton de la zone extérieure présente une résistance insuffisante pour recevoir par exemple un nouveau revêtement. Les procédés de démolition des zones de béton dégradé interviennent également pour la mise à nu des armatures ainsi que pour la préparation du support en vue de l'application de mesures de réfection.

L'élimination des zones de béton dégradé consiste à enlever le béton là où cela se révèle nécessaire, à préparer le fond et/ou de mettre à nu les armatures afin d'assurer les conditions appropriées à l'application correcte d'un système de réfection.

L'armature mise à nu après la démolition sera, selon son état, traitée ou remplacée. Pour dérouiller les surfaces corrodées des aciers, on n'utilisera que des procédés mécaniques à l'exclusion de procédés chimiques ou thermiques. Les particules de rouille seront enlevées des surfaces d'acier qui ne doivent pas être revêtues, leur degré de propreté corres-

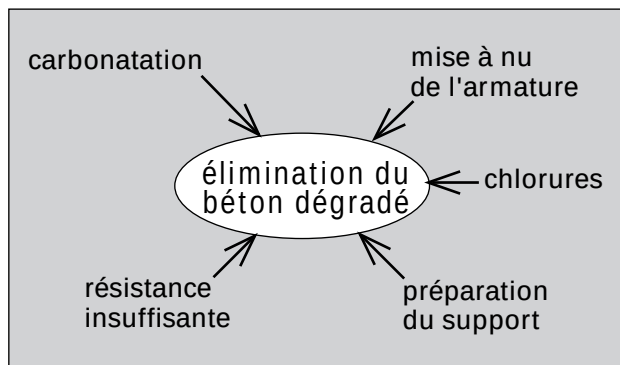


Figure 3.1
Conditions et problèmes pour la mise en œuvre d'un procédé de démolition

Figure 3.2
Préparation des surfaces par projection selon la norme ISO 8505-1 (39)

Désignation	Notion ISO	Définition (texte ISO officiel)
Sa 2	Décapage soigné	Examinée à l'œil nu, la surface doit être exempte de toute trace d'huile, de graisse et de saleté, ainsi que de presque tous les matériaux peu adhérents tels que calamine, rouille, peinture et particule étrangère. Les agents contaminants résiduels doivent bien adhérer. Voir photographies B Sa 2, C Sa 2 et D Sa 2 dans ISO 8501-1
Sa 2 1/2	Décapage très soigné	Examinée à l'œil nu, la surface doit être exempte de toute trace d'huile, de graisse et de saleté, ainsi que de tous matériaux tels que calamine, rouille, peinture et particule étrangère. Toute trace restante de contamination doit ne laisser que de légères marques sous forme de taches ou de traînées. Voir photographies A Sa 2 1/2, B Sa 2 1/2, C Sa 2 1/2 et D Sa 2 1/2 dans ISO 8501-1
Sa 3	Décapage jusqu'à propreté de l'acier évaluable visuellement	Examinée à l'œil nu, la surface doit être exempte de toute trace d'huile, de graisse et de saleté, ainsi que de tous matériaux tels que calamine, rouille, peinture et particule étrangère. Elle doit présenter une couleur métallique uniforme. Voir photographies A Sa 3, B Sa 3, C Sa 3 et D Sa 3 dans ISO 8501-1

pendant approximativement à celui exigé pour les aciers d'une construction neuve. Les surfaces d'acier qui doivent être revêtues auront, après traitement, le degré minimal de propreté normalisé Sa 2 1/2. Le degré de propreté requis pour les armatures, en fonction des principes de réfection, est résumé dans les tableaux 2.11 et 2.17.

Finalement, les endroits démolis seront reprofilés. On peut alors reconstituer les anciennes formes et surfaces, ou appliquer une couche supplémentaire de mortier ou de béton sur toute la surface de l'ouvrage.

Afin d'assurer le succès de la réfection, les travaux d'élimination des zones de béton dégradé et de reprofilage doivent être préalablement spécifiés par l'auteur du projet (exigences et essais).

3.1.2 Elimination des zones de béton dégradé

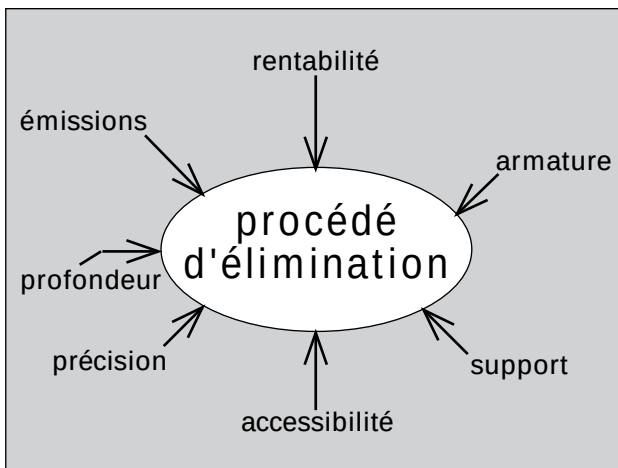


Figure 3.3
Caractéristiques déterminant le choix du procédé d'élimination

La profondeur de démolition dépend de la teneur en chlorures, de la corrosion des armatures, de la profondeur de carbonatation, de la qualité du béton et de l'enrobage des armatures. Cette profondeur de démolition ainsi que les exigences relatives à la mise à nu des armatures découlent du principe de réfection appliqué. Ces profondeurs sont définies au chapitre 2 pour les différents principes de réfection (voir tableaux 2.11 et 2.17). La sécurité structurale de l'ouvrage, ou de la partie de l'ouvrage restera assurée dans tous les cas.

Après avoir fixé la profondeur de démolition, il faut choisir le procédé de démolition des zones de béton dégradé approprié. Ce choix dépend à la fois de cette profondeur de démolition, et d'autres conditions (figure 3.3) telles que les nuisances provoquées (bruit, déchets, poussières, boues), l'accessibilité et le coût, toutes variables qui peuvent jouer un rôle important (voir également figure 6.12 au chapitre 6).

Le procédé de démolition des zones de béton dégradé est également déterminable par les exigences relatives à la rugosité du support, et par la précision exigée pour la démolition. Certains procédés de démolition n'entrent plus en considération lorsque les armatures doivent être mises à nu, car ils ne permettent pas de ménager suffisamment les aciers.

La définition de la rugosité du support est difficile, car il n'existe pas encore de moyens reconnus et applicables permettant de mesurer la rugosité d'un support avec surface inclinée. Pour les surfaces horizontales, le procédé de répartition de sable sur la surface (méthode de la tache de sable ou «sand patch test») peut être utilisé. Le rapport de recherche de l'OFR (3) contient une proposition pour la détermination de la rugosité de surfaces inclinées. La rugosité garantira un bon ancrage du système appliqué sur le support existant. La texture de la surface autorisera une application correcte du système choisi (béton de remplacement, revêtement, etc.) sans entraîner une consommation excessive de matériaux: un revêtement mince, par exemple, nécessite une rugosité moindre que celle d'un mortier projeté.

Il est important de garantir un support exempt de parties désolidarisées ou tendres (par exemple pellicule de ciment), de fissures parallèles à la surface ou formant des cuvettes dans la zone proche de la surface, ainsi que de décollements ou de matériaux étrangers (ancien revêtement, etc.). Il s'agit là de conditions sine qua non au succès d'un procédé de réfection.

Lors de l'application du principe de réfection C – revêtement des armatures –, l'acier d'armature sera mis à nu (voir chapitre 2) aussi loin qu'il existe des traces de corrosion. On enlèvera le béton tout autour de l'armature sur une distance de 1 à 2 cm, quand bien même seules des zones limitées sont endommagées.

3.1.3 Reprofilage

Pour le reprofilage, on dispose de différents types de bétons et de mortiers de réfection. Ils permettent de remplir les cavités en cas de dégâts localisés, d'augmenter l'épaisseur de recouvrement du béton comme de renforcer la section de l'ouvrage (21). En fonction de l'application, le béton, ou le mortier de réfection doit satisfaire aux exigences des classes de sollicitation M1 à M4 (figures 3.5 et 3.6). La définition des classes de sollicitation est tirée du document RiLiDAfStB (6). Comme il s'agit à proprement parler de classes de résistances, le terme classe de sollicitation peut créer une certaine confusion. L'application se fait à la truelle de maçon, par projection ou de manière conventionnelle par coffrage.

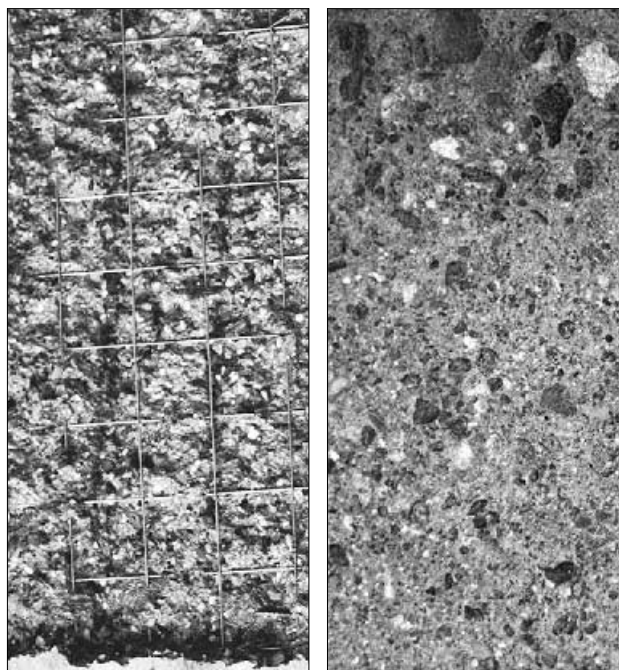


Figure 3.4
Surfaces de béton après démolition par jets d'eau à très haute pression (à gauche) ou par projection de sable et d'eau (à droite)

Classe	Preuve exigible pour		Principaux domaines d'application
	Résistance à la carbonatation	Fonction structurale	
M1	-	-	Dégâts limités localement
M2	x	-	Principe de repassivation; sollicitations dynamiques pendant et après l'application
M3	x	x	Zone importante constructivement et statiquement; sollicitations dynamiques pendant et après l'application
M4	x	-	Sols industriels, résistance à l'usure élevée; sollicitations dynamiques pendant et après l'application
x preuve exigée - preuve non exigée			

Figure 3.5
Définition des classes de sollicitations (résumé tiré de (6))

Critères	M1	M2	M3	M4
Exigences minimales, adéquates pour des réparations ponctuelles	x	x	x	x
Résistance à la carbonatation		x	x	x
Capacité de stockage contre la pénétration des chlorures		x	x	x
Sollicitations dynamiques		x	x	x
Exigences élevées du point de vue constructif et statique			x	
Exigences élevées du point de vue de la résistance mécanique à l'abrasion				x

Figure 3.6
Attribution des critères aux classes de sollicitations (6)

Classe de sollicitation M1:

Les mortiers et bétons destinés au remplissage des trous du support en béton présenteront une solidité suffisante pour servir de support au système de protection des surfaces OS prévu. Leur mode d'emploi indique pour quel système de protection des surfaces OS et pour quel type d'application le béton ou le mortier est prévu.

Classe de sollicitation M2:

En complément aux exigences requises pour la classe M1, il faut fixer des valeurs minimales de résistance à la carbonatation et de maintien de la zone tampon contre la pénétration des chlorures; en cas de sollicitations dynamiques garantir une application et un durcissement à toute épreuve.

Classe de sollicitation M3:

En complément aux exigences requises pour la classe M2, d'autres contraintes définissent les caractéristiques de résistance et de déformation, l'adhérence aux aciers d'armature préalablement traités, l'adhérence au support en béton, l'influence de l'humidité et de la température, ainsi que le comportement au feu.

Classe de sollicitation M4:

En complément aux exigences fixées pour la classe M2, des limites à atteindre pour les résistances mécaniques et les résistances à l'usure.

Bétons et mortiers de réfection:

Les bétons et mortiers de réfection sont subdivisés en bétons et mortiers liés au ciment et en bétons et mortiers à base de résine réactive. Dans les paragraphes qui suivent, ils seront décrits séparément: entre parenthèses, les abréviations selon la référence bibliographique (4).

a) Bétons et mortiers liés au ciment:

Pour le reprofilage on utilise essentiellement les bétons et mortiers liés au ciment sous forme de bétons et de mortiers à base de ciment seul, ou de mortiers et de bétons de ciment modifié par adjonction de matières synthétiques. Le liant utilisé est le ciment Portland. Le ciment détermine l'alcalinité du béton, laquelle assure la protection contre la corrosion de l'armature.

Les bétons et mortiers liés au ciment sont largement utilisés dans les travaux de réfection. Leur plasticité ajoutée à l'aspect économique lors d'application sur de grandes surfaces sont à la base du succès du béton projeté pour les réfections. Quand, pour des raisons esthétiques, un aspect de béton coffré est exigé, on peut recourir à un béton de parement coffré. Pour les reprofilages localisés, on utilise souvent les mortiers à base de ciment avec adjonction de matières synthétiques. L'aspect économique détermine parfois le choix du mortier; aussi, pour des applications en grandes surfaces, on préférera les produits liés exclusivement au ciment. Au contraire, pour des applications en petites surfaces (là où le rapport prix du matériau/coût de la main d'œuvre est moindre), l'utilisation de produits plus chers, améliorés par des matières synthétiques, est envisageable, car ils offrent des avantages lors du traitement ultérieur.

Béton projeté (40)

Le béton projeté trouve son application traditionnelle dans les travaux souterrains. Du fait de ses avantages (facilité de mise en forme, application en couche mince, flexibilité d'emploi, etc.), le béton projeté ne doit actuellement plus être écarté pour les travaux de réfection. Le béton projeté fait l'objet d'un chapitre dans la norme SIA 162 (32) depuis la révision partielle de 1993. Les exigences qui y sont fixées doivent être respectées. Il est subordonné à la même classification que le béton normal, son

Type de mortiers et de bétons	max. (mm)	Epaisseur des couches (mm)	
		min.	max.
Bétons (selon norme SIA 162) ¹⁾	>4	30	-
Mortiers au ciment	≤4	20	40
Bétons et mortiers modifiés par des matières synthétiques	>4	30	-
	≤4	10	40
Bétons et mortiers liés par des résines réactives	>4	15	40
	≤4	5	15

¹⁾ Pour les réfections, en dérogation à la norme SIA 162, la limite entre le béton et le mortier est donnée par un diamètre des granulats de 4 mm

Figure 3.7
Valeurs indicatives de l'épaisseur des couches appliquées en grandes surfaces (6)

Classe A : Béton projeté sans rôle porteur (par exemple protection de talus, remplissage de fractures, support d'étanchéité)
Classe B : Béton projeté à rôle porteur temporaire
Classe C : Béton projeté à rôle porteur permanent
Classe D : Béton projeté répondant à des caractéristiques particulières (par exemple étanchéité, résistance aux agents chimiques)

Figure. 3.8
Classes de béton projeté selon la norme SIA 198 (1993) (36)



Figure 3.9
Réfection par application de béton projeté par voie sèche.
Cette technique exige une largeur d'échafaudages importante!

application avec un procédé par projection étant mentionnée comme propriété particulière. Une définition plus complète du béton projeté est contenue dans la norme SIA 198 (36). Celle-ci distingue quatre classes (figure 3.8 et annexe B). L'utilisation de béton projeté des classes C et D implique des essais préalables systématiques et concluants.

Le béton projeté s'applique par voie sèche ou humide. Pour les travaux de réfection, on préfère le procédé par voie sèche. L'apport d'eau au mélange sec amené par air comprimé ne se fait qu'à la buse. Le mélange est projeté sous haute pression sur le support et simultanément compacté. Chaque passage correspond à une couche d'une épaisseur de 2 à 3 cm. Pour les procédés par voie sèche, le ciment est dosé par 1000 litres de granulats. En règle générale, on injecte un dosage de 350 kg de ciment. En raison des pertes par rebond et par compactage, le volume du béton projeté appliqué se réduit d'environ 50% de celui du mélange frais. Comme les pertes par rebond contiennent une proportion plus grande de granulats, la teneur en ciment du béton projeté compacté est d'environ 450 kg/m³. De ce fait, les propriétés (porosité, résistance à la compression, rapport E/C, module d'élasticité E, (dilatation thermique) divergent quelque peu de celles d'un béton normal. Les propriétés du béton projeté dépendent beaucoup de l'ouvrier qui tient la lance et du traitement consécutif. La condition préalable à une bonne adhérence sur le support est sa préparation soignée. Sur ce point, les opinions des spécialistes divergent. Certains sont partisans d'une forte rugosité, comme celle obtenue avec un jet d'eau à très haute pression, pour d'autres il faut une rugosité fine obtenue par projection de sable; d'autres conseillent une combinaison des deux, soit projection de sable après jet d'eau sous très haute pression. La surface du béton projeté sera laissée brute, tirée à la règle ou lissée. Par la suite on peut également lui appliquer un enduit mince. La réalisation d'une structure coffrée est très coûteuse. Pour l'exécution de travaux de béton projeté, il ne faut mandater que des entreprises disposant de l'expérience nécessaire et de personnel spécialisé. Le contrôle du béton projeté se fait par martèlement (détection des vides), par des essais de résistance à l'arrachement et des essais sur des carottes (résistance à la compression, porosité, composition, etc.).

Parement en béton coffré

Pour ce type de parement, le béton (ou le mortier) est introduit dans un coffrage (8). Ce procédé permet à la fois d'avoir un aspect de béton coffré et d'obtenir des propriétés (module E, dilatation thermique) aussi proches que possible de celles du béton d'origine. Ce type de béton doit satisfaire aux exigences de la norme SIA 162 (32). Lors de l'exécution d'un parement en béton coffré, il faut prévoir une épaisseur minimale de 5 cm et une armature contre le retrait du parement en béton. Il est important que cette armature ait un enrobage correspondant aux exigences de la norme SIA 162 (32). Lorsque les couches sont minces, on envisagera également l'utilisation de treillis d'armature zingués. Les problèmes statiques consécutifs au poids additionnel de ce béton doivent être examinés.



Figure 3.10
Application à la truelle d'un lissage bouche-pores

Mortier de ciment

A l'exception d'une granulométrie plus petite (M à 4 mm) du dosage en ciment (M à 400 kg/m³), du rapport eau/ciment (< 0.5) et de quelques autres exigences relatives à l'application, un mortier de ciment doit remplir les mêmes exigences que le béton.

Béton ou mortier modifié par adjonction de matières synthétiques

(PCC: Polymer-Cement-Concrete ou béton-ciment-polymère)

Les bétons et les mortiers de ciment modifiés par des matières synthétiques sont obtenus par l'addition de produits tels que des dispersions synthétiques, des poudres de matières synthétiques se mettant en dispersion dans l'eau, ou des résines émulsifiables dans l'eau. L'ajout de matières synthétiques permet d'améliorer les propriétés des bétons et des mortiers, en particulier sur le plan de leur ouvrabilité, de leur compacité et de leur résistance à la traction. Les mortiers ECC (Epoxi-Cement-Concrete ou époxy-ciment-béton) nouvellement développés trouvent des applications de plus en plus nombreuses.



Figure 3.11
Reprofilage ponctuel au mortier

Pour traiter de grandes surfaces, les mortiers et bétons modifiés sont appliqués par projection (SPCC: Spritz-PCC = projection de PCC) aussi bien par voie sèche que par voie humide. En règle générale, l'épaisseur de la couche d'un passage ne dépasse pas 3 cm.

b) Bétons et mortiers à résine réactive

(PC Polymer-Concrete ou béton polymère)

Dans le cas des mortiers et bétons à base de résine réactive, on utilise comme liants, à la place du ciment, des résines réactives. Ils se différencient donc fondamentalement des systèmes précédents où l'apport de ciment Portland crée un milieu alcalin. Il en résulte que l'utilisation des mortiers ou de ces bétons à résine réactive passe par la protection de l'armature contre la corrosion par d'autres moyens (réduction de la teneur en eau, revêtement des armatures par exemple). Les mortiers ou les bétons de résine réactive entrent en considération lorsque des systèmes de remplacement du béton à base de liants hydrauliques sont exclus, pour des questions de délais ou en cas d'épaisseurs trop faibles. On n'y recourt que pour des surfaces inférieures à 1 m². L'épaisseur minimale de la couche est de 5 mm.

Les mortiers et les bétons de résine réactive présentent certains désavantages par rapport aux mortiers et aux bétons modifiés avec des matières synthétiques: exigences plus élevées pour l'application, réactions malencontreuses aux déformations, sollicitations importantes dans la zone de liaison et dans le mortier du fait du coefficient de dilatation thermique élevé, problèmes d'adhérence à l'état frais, en particulier sur un support humide, résistance au feu limitée, ainsi que prix élevé. En outre, pour de petites réparations, l'utilisation de mortier de résine réactive est plus simple que l'application de mortier lié au ciment (haute résistance initiale, traitement ultérieur simple, possibilité de préparer de petites quantités, etc.).

3.2 Protection cathodique contre la corrosion (KKS)

3.2.1 Introduction

La protection cathodique contre la corrosion est un procédé bien connu pour la protection contre la corrosion des conduites souterraines (figure 3.12). Ce système est également utilisé pour protéger les structures immergées comme celles des bateaux et des installations portuaires.

Fondamentalement on distingue deux procédés: le procédé avec mise en place d'une anode active et le procédé avec une anode extérieure, alimentée par un courant de protection continu. Le procédé KKS correspond au principe de réparation CP (voir chapitre 2.4.4).

La protection cathodique active contre la corrosion avec la mise en place d'une anode inactive et d'une source de courant extérieure est déjà connue, depuis le milieu des années 70, aux USA et au Canada pour la réparation et l'entretien de constructions en béton armé (Manning, (29)). En Suisse, des recherches sont en cours depuis le milieu des années 80 (Hunkeler, voir (29), (22)). C'est en 1986 que la première construction a reçu une protection. Depuis, le procédé a été utilisé pour résoudre différents problèmes de réparation (Hunkeler, (30)). La protection cathodique active contre la corrosion est actuellement un procédé reconnu (28).

3.2.2 Mécanisme

La protection cathodique contre la corrosion (KKS) utilise la réversibilité des réactions électrochimiques par une modification du rapport des tensions électriques. Lors d'une blessure de la couche de passivation à la surface de l'acier, par exemple du fait de l'action de chlorures, le potentiel électrochimique de la zone concernée se décale vers des tensions négatives. Entre les zones encore passivées et celles qui sont corrodées, il se crée alors une différence de tension du fait des potentiels différents de ces zones. Comme dans une batterie, il s'ensuit un petit courant entre ces deux zones avec pour seule condition une conductibilité suffisante du béton, ce qui est généralement le cas. Le processus électrochimique est ainsi engagé dans la zone de l'anode et le fer est attaqué par l'oxygène. Il en résulte un foyer de corrosion (macro-élément) (fig. 3.14).



Figure 3.12
Jusqu'à ce jour le procédé de réparation par protection cathodique, KKS, a essentiellement été mis en œuvre pour la protection de conduites souterraines

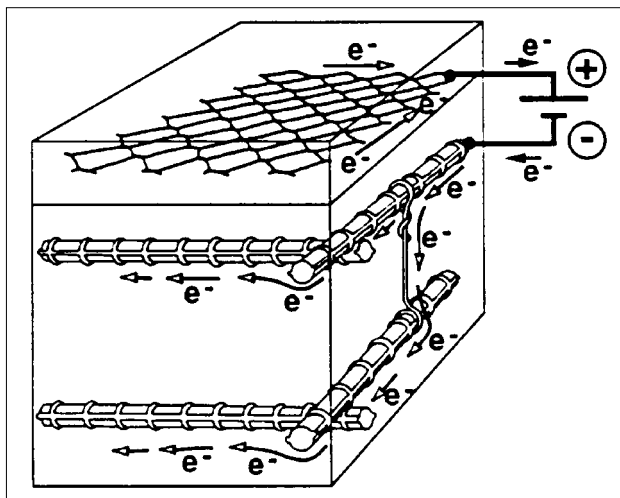


Figure 3.13
Principe du procédé de réparation par protection cathodique, KKS, appliqué au béton armé

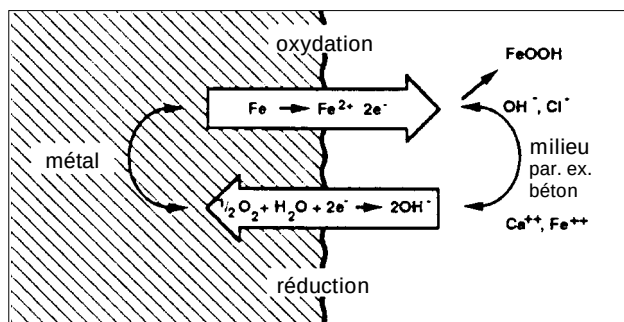


Figure 3.14
Élément électrochimique avec les réactions réductrices à l'anode et à la cathode, selon Böhni (29)

tension	intensité
1-3 V	5-15 mA/m ²

Figure 3.15
Tensions et intensités de courant mises en oeuvre pour le procédé de réparation par protection cathodique KKS



Figure 3.16
Montage du treillis-anode à la surface du béton

Dans le système KKS avec courant imposé, une anode spécialement traitée, à base de titane très stable, est placée sous forme de treillis à la surface du béton, puis enrobée dans une couche de mortier ou de béton bonne conductrice de l'électricité (utilisation limitée des matières synthétiques) (fig. 3.16). A l'aide d'une source de courant continu, on crée une différence de tension entre le treillis qui constitue l'anode et l'armature de telle sorte que l'armature, reliée au pôle négatif, joue le rôle de cathode (fig. 3.13). De ce fait, plus aucune altération du fer n'est à craindre, même s'il se trouve dans du béton carbonaté ou saturé de chlorures. La démolition de cette couche de béton n'est ainsi pas nécessaire. Avec le temps, il se forme une nouvelle couche passivée dans les zones qui étaient dépassivées avant la mise en service du système KKS. Pour garantir une action uniforme, il faut que les armatures soient suffisamment reliées entre elles pour assurer la conductibilité électrique; elles doivent constituer un réseau électrique. Avec le mode usuel de disposition des armatures, cette condition est en général satisfaite.

3.2.3 Projet, exécution et surveillance

Comme pour tous les problèmes de réparation, il est également nécessaire, en recourant au système KKS, de procéder à une auscultation détaillée de l'état existant. En particulier l'état de corrosion des armatures, l'état du béton de recouvrement ainsi que les connexions électriques entre les armatures doivent être contrôlés. L'étude du projet, l'exécution et la surveillance d'un système KKS sont définies dans une directive de la Société suisse pour la Protection contre la corrosion (28). Cette directive est basée sur les recherches menées au cours de ces dernières années, ainsi que sur des expériences pratiques. En raison du risque de fragilisation des aciers de précontrainte par l'oxygène, les possibilités d'application du système KKS dans les constructions précontraintes sont limitées.

Les parties fixes d'une installation KKS sont en principe conçues pour une durée de vie de 50 ans. Une installation KKS reste en service permanent pendant toute la durée de vie d'un ouvrage. La partie électrique doit donc également être régulièrement surveillée. Une chute momentanée du courant après la phase de polarisation initiale n'a pas de conséquence néfaste. Il en résulte que le rythme de surveillance, après une phase initiale de réglage plus intensive, correspond au rythme normal de surveillance d'un ouvrage spécial.

3.3 Déminéralisation électrochimique (ECE)

3.3.1 Introduction

La déminéralisation électrochimique, également connue sous la désignation NCT (sigle de la société norvégienne qui l'a développée Norwegian Concrete Technologies AS), ou l'extraction électrochimique des chlorures est une méthode mise au point en Norvège au milieu des années 80, puis développée dans d'autres pays, particulièrement au Canada. Le procédé, breveté, est proposé en Suisse par différentes sociétés détentrices de la licence. La méthode est également testée dans le cadre du programme américain SHRP (US State Highway Research Program).

En Suisse, le procédé a été appliqué pour la première fois dans le canton de Soleure, dans le cadre d'un essai pilote effectué sous la direction de l'Institut de la Chimie des matériaux et de la corrosion de l'EPF de Zurich, IBWK (Institut für Werkstoffchemie und Korrosion) (29,7). Le procédé présente l'avantage d'extraire les chlorures du béton sans nécessiter la démolition des parties saines de la construction. Il permet de repasser les surfaces d'acier qui avaient été dépassivées sous l'action des chlorures. La déminéralisation électrochimique est un procédé dont l'action est temporaire.

Sur la base des expériences faites, la méthode peut être considérée comme une alternative à la démolition conventionnelle du béton sain mais saturé de chlorures (7), en particulier lorsque la durée de l'intervention, par exemple pour les ouvrages routiers en service, joue un rôle déterminant. Une réponse satisfaisante n'a toutefois pas encore été apportée à la question de la durabilité de la repassivation des zones fortement corrodées.

3.3.2 Mécanisme

La méthode est basée sur le principe que les ions de chlorure (Cl^-) chargés négativement migrent vers le pôle positif, l'anode, lorsqu'ils sont placés dans un champ électrique. Le traitement est réalisé par la création d'une tension électrique continue entre la surface du béton (anode temporaire constituée par un treillis de titane enrobé dans une masse de fibres de cellulose humide) et l'armature. On crée ainsi un courant entre l'armature (cathode) et la surface du



Figure 3.17
Culée de pont en réfection avec le procédé par déminéralisation électrochimique ECE

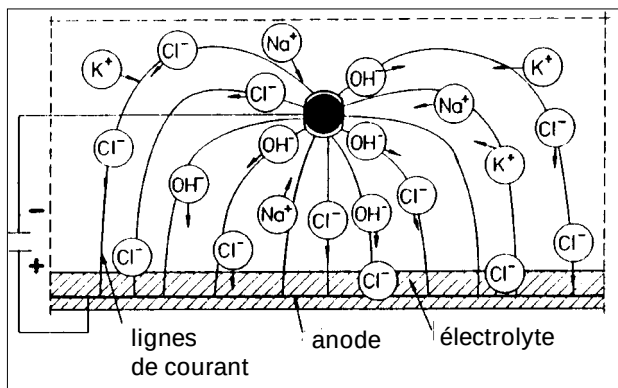


Figure 3.18
Principe de la déminéralisation électrochimique du béton armé, selon (25)

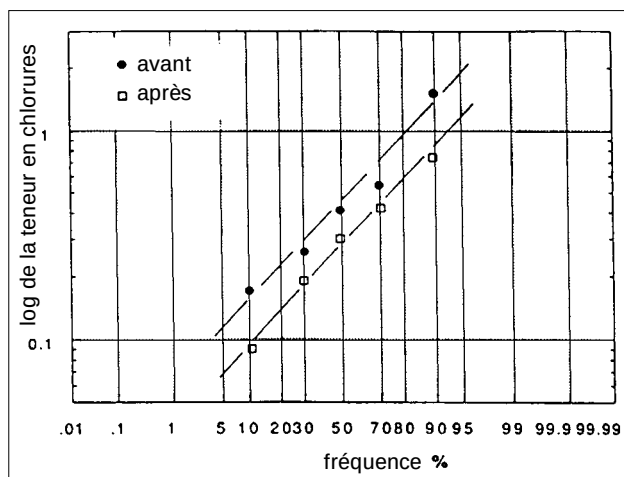


Figure 3.19
Fréquence des concentrations en chlorures à la profondeur de 0-20 mm, avant et après le premier traitement avec le procédé par déminéralisation électrochimique, ECE, appliqué sur un mur de culée, selon B. Elsener et H. Böhni (30)

béton; les ions d'hydroxyde, qui résultent de la réaction électrochimique à la cathode, provoquent alors une élévation du pH, ce qui facilite la passivation. L'intensité de courant normalement utilisée pour une déminéralisation électrochimique est de l'ordre de 1 ampère par m^2 avec des tensions situées entre 30 et 45 volts. Si l'intensité du courant est très élevée, il peut se produire un dégagement d'hydrogène à la cathode, avec parfois pour conséquence une fragilisation par l'hydrogène dans le cas des aciers de précontrainte. Les réactions à l'anode sont liées à une formation d'acide qui provoque une décomposition de la pellicule de ciment. Il s'agit là de l'unique défaut constaté jusqu'ici. Par un traitement d'une durée de 6 à 8 semaines, 40 à 50% des chlorures contenus dans le béton peuvent ainsi être éliminés. Le traitement est renouvelable plusieurs fois. Un délai d'attente, de quelques semaines à quelques mois, est nécessaire entre deux traitements.

3.3.3 Projet, exécution et surveillance

La condition nécessaire pour l'application du procédé de déminéralisation électrochimique est une auscultation soignée de l'état de l'élément en béton à traiter. En plus de la détermination de la teneur en chlorures sur des carottes, il faut également faire des mesures de potentiel et contrôler les connexions électriques entre les armatures.

L'application du procédé pour les constructions précontraintes est limitée par les risques de fragilisation par l'hydrogène, risques déjà mentionnés ci-dessus. On envisagera ce procédé avant tout dans les cas où d'autres systèmes de réparation ne sont pas applicables, ou lorsqu'il s'avère particulièrement important d'éviter des démolitions de béton.

Une durée de traitement de 6 à 8 semaines sera observée lors de la planification et de la préparation d'une déminéralisation électrochimique. Il s'est avéré nécessaire de contrôler l'efficacité du traitement par des mesures de teneurs en chlorures sur des carottes (positions des carottes déterminées sur la base de mesures de potentiel) ainsi qu'au moyen de mesures de champs de potentiel. Les mesures de potentiel ne doivent être faites que 4 à 6 semaines après la fin du traitement de déminéralisation. Le contrôle s'avère difficile lorsque l'élément de construction est contaminé de manière très irrégulière. Les objectifs du traitement doivent être convenus par contrat entre le maître de l'ouvrage et le

mandataire, avant le début des travaux. Les contrôles à effectuer seront également définis. Après exécution de la déminéralisation, la surface du béton doit en principe être protégée contre une nouvelle pénétration des chlorures par une protection superficielle adéquate.

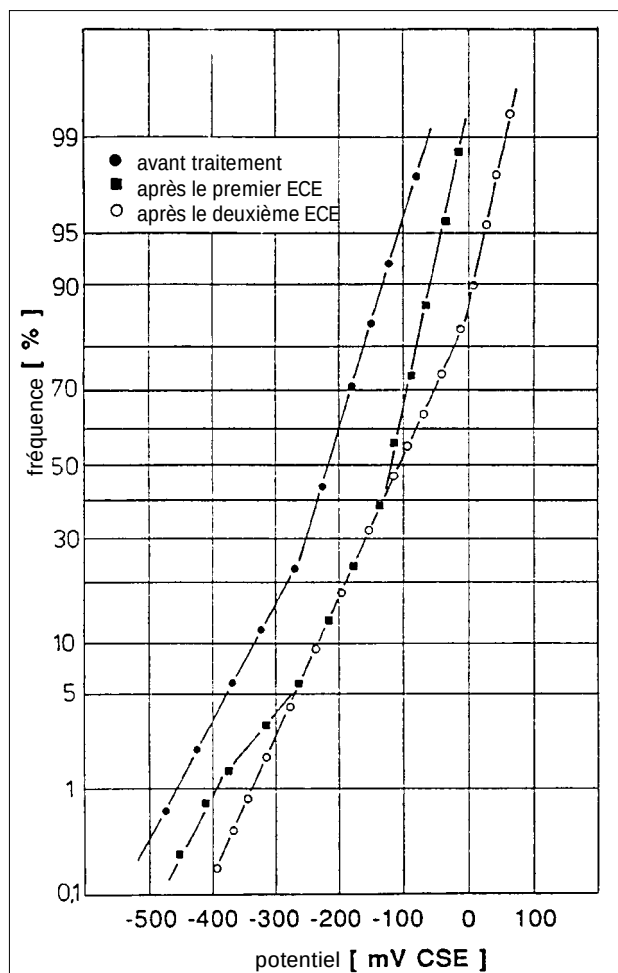


Figure 3.20
Fréquence des valeurs de potentiel avant et après l'application du procédé par déminéralisation électrochimique, ECE, sur une culée, selon B. Elsener et H. Böhni (30)

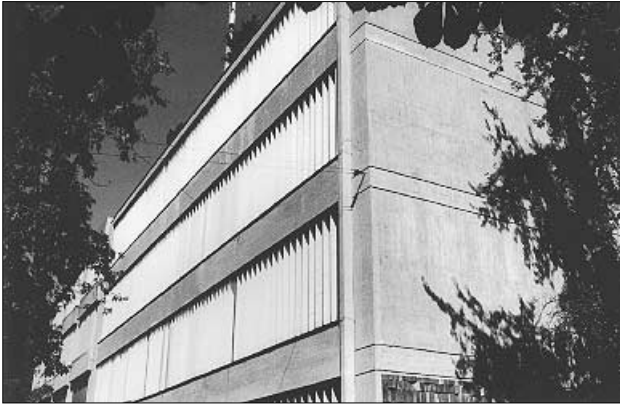


Figure 3.21
Façade après réparation avec le procédé de réalcalinisation électrochimique

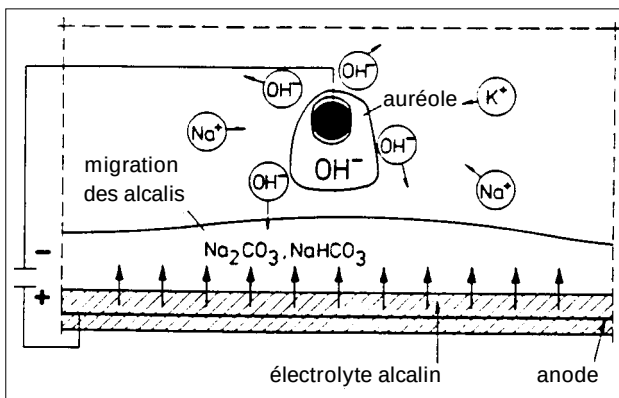


Figure 3.22
Principe de la réalcalinisation électrochimique du béton armé selon (25)

3.4 Réalcalinisation électrochimique (ER)

3.4.1 Introduction

Le procédé de réalcalinisation électrochimique, également connu sous la désignation NCT (sigle de la société qui l'a inventé, Norwegian Concrete Technologies AS), a été développé en Norvège, au milieu des années 80, à partir du procédé de déminéralisation électrochimique du béton armé. Ce procédé breveté est proposé en Suisse par différentes sociétés régionales détentrices de la licence. Le procédé a l'avantage de rétablir l'alcalinité du béton dans les zones carbonatées et, par là, d'assurer la protection contre la corrosion des armatures sans nécessiter la démolition de parties «saines» de la construction. La durabilité de l'action de ce procédé n'est actuellement pas encore démontrée de façon certaine.

Le procédé de réalcalinisation électrochimique a déjà été appliqué en Suisse pour la réparation de différents bâtiments.

Le mécanisme général de la réalcalinisation électrochimique n'est actuellement pas encore complètement élucidé. Divers exemples et résultats de recherche confirment toutefois l'efficacité du procédé (29). Mais il n'a pas encore été donné de réponse définitive à la question de sa durabilité.

3.4.2 Mécanisme

La réalcalinisation a pour objectif de stopper la corrosion, qui avait été déclenchée par l'avance du front de carbonatation, en reconstituant un milieu alcalin autour des aciers d'armatures et en réactivant la passivation de la surface de l'acier. Le principal élément de la réalcalinisation électrochimique est, comme dans les cas de la déminéralisation électrochimique et de la protection cathodique contre la corrosion, la présence d'une tension électrique continue entre l'anode, disposée à la surface du béton, et l'armature. Cette tension crée un champ ainsi qu'un courant électrique entre l'anode et l'armature (intensité du courant usuel entre 0,5 à 1 ampère par m², pour une tension de service de 5 à 40 volts). L'anode est en général constituée par un treillis en acier enrobé dans une masse rendue fortement alcaline (par une solution de soude Na₂CO₃ p. ex.). Sous l'action de la différence de

potentiel, il se crée en principe 3 phénomènes (fig. 3.22). A proximité de la cathode (armature) la réaction de réduction (électrolyse) dégage des ions OH^- qui réagissent avec la surface de l'acier et reconstituent ainsi la couche de passivation. D'autres ions OH^- , ainsi que les ions Na^+ chargés positivement et issus de la solution alcaline apportée, vont se répartir dans le béton par migration. Par ailleurs, la solution alcaline apportée va également pénétrer dans les pores du béton par électro-osmose. Lorsque le traitement est achevé, les pores sont remplis de NaOH ou de Na_2CO_3 (pH 12 à 14) (fig. 3.23). La mise en action du procédé est temporaire. Le traitement dure de 4 à 10 jours et il ne modifie pas l'aspect de la surface du béton.

3.4.3 Projet, exécution et surveillance

La condition préalable pour l'application du procédé de réalcalinisation électrochimique est une auscultation détaillée de l'état de l'élément en béton à traiter. Cette auscultation précisera en particulier la profondeur de carbonatation, l'enrobage des armatures, ainsi que leur état de corrosion. Les propriétés du béton de recouvrement ainsi que les connexions électriques des armatures sont à déterminer. Il faut aussi pouvoir exclure la présence de chlorures en tant que cause possible de corrosion.

En raison du danger de fragilisation des aciers de précontrainte par l'hydrogène, l'application du procédé est limitée pour les ouvrages en béton précontraint, en particulier dans les cas de précontrainte par fils adhérents. On envisagera ce procédé avant tout dans les cas où d'autres procédés de réparation ne sont pas applicables pour des raisons spécifiques (exigences esthétiques ou autres).

Les sociétés spécialisées qui proposent ce système doivent établir un projet détaillé du procédé et de son application. Avant de conclure un contrat, il est indispensable que les objectifs de la réalcalinisation électrochimique ainsi que les moyens de contrôler l'efficacité du traitement soient fixés par écrit. Après achèvement du traitement, il s'avère habituellement nécessaire de protéger la surface du béton contre une nouvelle carbonatation au moyen d'un revêtement.

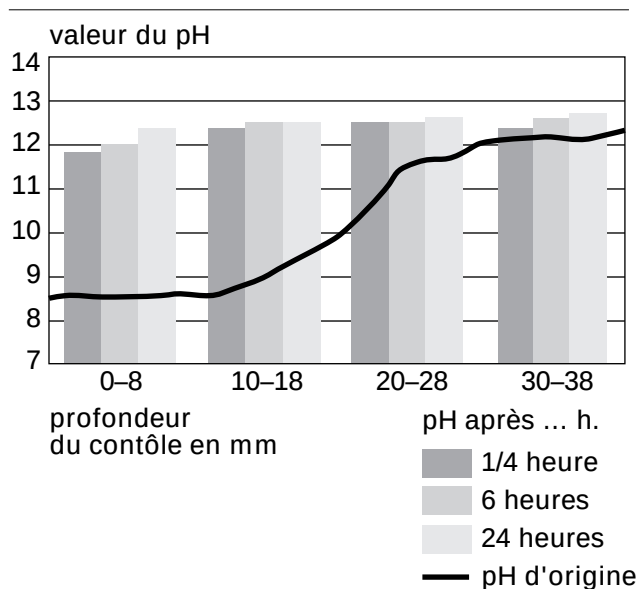


Figure 3.23
Résultats d'une réalcalinisation réussie (29)



Figure 3.24
Projection d'enrobage du treillis-anode d'une réalcalinisation électrochimique



Figure 3.25
Exemple d'une façade traitée avec des inhibiteurs MFP

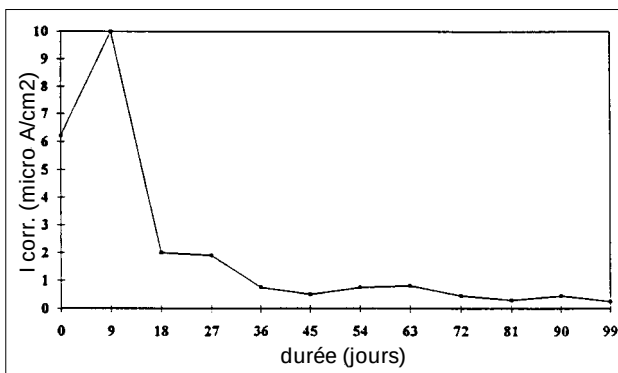


Figure 3.26
Valeurs expérimentales du développement de la vitesse de corrosion dans un béton carbonaté, après traitement avec des inhibiteurs MFP (Schmalz (30))

3.5 Inhibiteurs

3.5.1 Introduction

Parmi les alternatives à la démolition conventionnelle du béton endommagé, l'application d'inhibiteurs pour la réparation d'ouvrages en béton armé représente le procédé le plus récent. Dans le domaine des constructions neuves en béton armé, cette technique connue depuis longtemps est relativement fréquemment appliquée, en particulier aux USA. Le procédé convient dans les cas de corrosion des armatures induites par des chlorures; il agit en délogeant de la surface de l'acier les chlorures contenus dans le béton et dans l'eau des pores.

Le procédé se trouve encore dans un stade de recherche et de développement. Il n'existe aujourd'hui aucune expérience suffisante à même de garantir son efficacité.

3.5.2 Mécanisme

Il existe deux types d'inhibiteurs de corrosion adaptés à la construction en béton (20, 23): ceux dont l'action est anodique, dénommés passivateurs ou inducteurs de couches superficielles, et les inhibiteurs dont l'action est cathodique (inhibiteurs d'adsorption). Les deux types doivent protéger l'acier d'armature de la corrosion par la voie chimique ou stopper les corrosions déjà apparues, à tout le moins les ralentir. Ils interviennent dans le processus anodique ou cathodique de la corrosion.

Dans le cadre des recherches de l'OFR (Office fédéral des routes) sur les ponts, les types d'inhibiteurs examinés étaient des passivateurs à base de substance MFP (phosphate monofluoré de sodium) anorganique, soluble dans l'eau et non toxique. Des essais en laboratoire (Schmalz, voir [30]) ont montré qu'une concentration suffisante du produit dans la zone des armatures permettait d'obtenir une réduction sensible de la vitesse de corrosion. Le MFP doit être actif aussi bien dans les cas de corrosions par carbonatation que par les chlorures et son application possible tant à titre préventif que dans le cadre d'une réparation. Le principal problème est d'obtenir une concentration suffisante du produit ($\text{MFP/Cl}^- > 1$) à la profondeur adéquate. Actuellement, le mécanisme de l'action de ces inhibiteurs n'est que partiellement connu.

En Suisse, d'autres produits susceptibles être utilisés comme inhibiteurs dans les cas de réparations se trouvent encore au stade de la recherche et du développement. A notre connaissance, dans le secteur des pierres naturelles, les inhibiteurs s'appliquent depuis 1986 pour la protection contre les dégâts par les sulfates et les chlorures. Selon les données des fabricants, les produits utilisés pour la protection des pierres naturelles lient les sulfates et les chlorures sous forme de sels difficilement solubles – du type du sel de Friedel – ce qui les rend par conséquent inactifs pour la corrosion des armatures.

3.5.3 Projet, exécution et surveillance

Les inhibiteurs représentent un moyen auquel on recourra dans le futur pour la réparation du béton armé. Il n'existe cependant actuellement aucune expérience avec de tels produits dont l'efficacité soit suffisamment démontrée.

L'application d'inhibiteurs concerne donc au premier chef les projets pilotes ou de recherches. Le suivi de ces expériences par des spécialistes est indispensable. L'un des grands problèmes soulevés par l'application des inhibiteurs présentés (30) vient des exigences très sévères relatives à la siccité de la surface du béton, ainsi que de la difficulté d'apprécier la structure des pores du béton à traiter.



Figure 3.27
Application d'un inhibiteur sur une façade

4. Systèmes de protection des surfaces

4.1	Introduction	63
-----	--------------	----

4.2	Imprégnations	67
4.2.1	Imprégnations hydrophobes	67
4.2.2	Glacis	69

4.3	Enduits	70
4.3.1	Enduits minces (peintures)	71
4.3.2	Enduits épais	72

4.4	Systèmes de protection des surfaces selon RiLiDAfStB	73
-----	--	----

4. Systèmes de protection des surfaces

4.1 Introduction

Comme nous l'avons montré dans l'exposé des principes de la protection contre la corrosion, la protection des armatures est essentiellement assurée par leur enrobage dans la pâte de ciment alcalin. Les dégâts constatés dans les constructions en béton armé, dégâts dus pour la plupart à la corrosion des armatures, montrent que la durabilité de cette protection n'est toutefois pas toujours garantie.

Lorsque les conditions de l'environnement sont particulièrement agressives, même une couverture des armatures d'épaisseur et de compacité satisfaisantes ne suffit pas toujours à assurer la protection des armatures sans qu'il faille prendre des mesures complémentaires. De nombreux ouvrages en béton armé n'ont, compte tenu des contraintes de l'environnement, qu'un enrobage insuffisant, trop poreux ou de résistance insuffisante. Dans tous ces cas, la durabilité de la protection contre la corrosion des armatures passe par des mesures complémentaires.

La figure 4.2 présente un aperçu des mesures possibles pour assurer la protection des armatures contre la corrosion. Les solutions avec des armatures (pré)revêtues et des aciers inoxydables ne sont généralement pas applicables pour des travaux de réparation. Le béton d'enrobage existant sera soit démolé et remplacé par un mortier de réparation ou par du béton projeté, soit renforcé par l'apport de couches supplémentaires (parements en béton coffré, béton projeté). Lors de réparations, les traitements de surface de l'élément de construction, ou du matériau, prennent une grande importance, car ils ajoutent à la surface du matériau une couche de protection supplémentaire. Cette couche permet de réduire la pénétration de produits néfastes (gaz, humidité, produits chimiques tels que le dioxyde de carbone, eau salée, etc.) ou de corriger des défauts du matériau (fissures, zones poreuses, enrobage insuffisant, etc.). Il faut noter que l'application d'une telle protection modifie l'aspect de la surface du béton.

Les possibilités de réalisation d'une protection des surfaces pour des ouvrages en béton armé sont résumées à la figure 4.3. Les techniques d'imprégnation, d'enduits et de parements se différencient par leurs compositions, leurs épaisseurs, leurs propriétés physiques, leurs modes d'application, etc.



Figure 4.1
Les constructions en béton soumises à des conditions climatiques agressives - ici un embarcadère en mer fondé sur des piliers en béton - nécessitent des mesures de protection complémentaires pour garantir une protection durable contre la corrosion

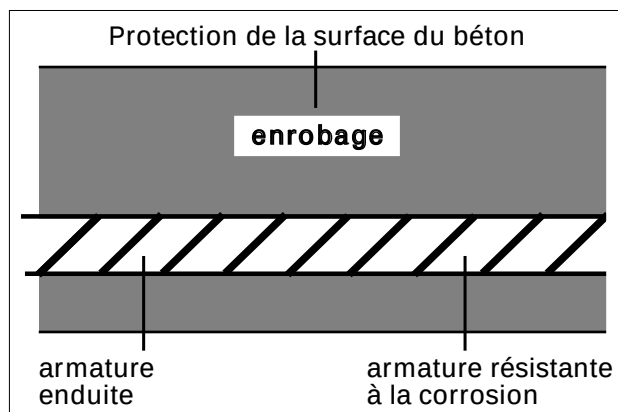


Figure 4.2
Mesures possibles pour assurer la protection des armatures contre la corrosion

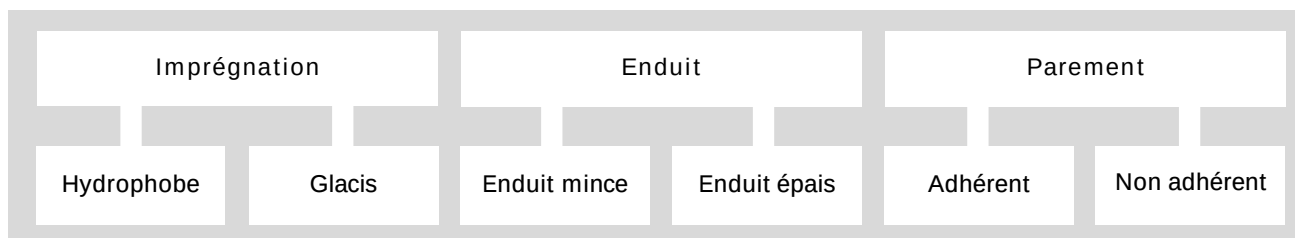


Figure 4.3

Divers possibilités de protection des surfaces d'éléments de construction en béton armé



Figure 4.4

Paroi de tunnel protégée par un parement: revêtement en carreaux de céramique

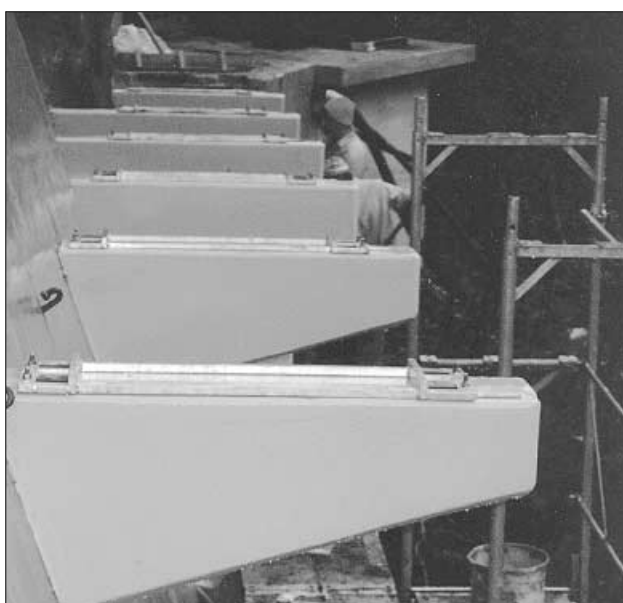


Figure 4.5

Enduit mince sur des éléments de construction en béton armé

Des parements liés directement à la construction (plaques de céramique, plaques collées de matériaux divers, etc.) de même que des parements sans liaisons directes (plaques de parements fixées sur des constructions secondaires et à base de matières synthétiques, de métal, de béton, de pierres naturelles, de pierres artificielles, de bois, etc.) ont une longue tradition et sont fréquemment appliqués dans le bâtiment, un peu moins dans les ouvrages de génie civil. Comme nous l'avons dit dans l'introduction, l'examen des systèmes de parements n'entre pas dans le cadre de ce manuel. Pour chaque cas particulier, on prendra en considération les paramètres importants tels que le comportement du point de vue de la physique du bâtiment de la partie ou de l'ensemble de l'ouvrage, le nettoyage, l'entretien, la durabilité, la résistance au feu, éventuellement l'acoustique, l'esthétique, les caractéristiques du système de construction, l'intégration à l'ouvrage, l'exécution, l'accessibilité, les coûts, etc. Par comparaison des différentes solutions possibles, il apparaîtra alors que de nombreuses questions demandent encore à être résolues avant de pouvoir prendre une décision définitive.

La protection des surfaces au moyen d'imprégnation ou d'enduits (fig. 4.6) a également une longue tradition, comme par exemple les enduits ou crépis pour la protection des maçonneries en terre cuite ou en pierres naturelles. Les imprégnations et les revêtements sont en contact direct avec le matériau; ils demandent, contrairement aux systèmes de parements, un appui continu sur l'élément d'ouvrage ou sur le matériau.

Les techniques d'imprégnation et d'enduits pour la protection des surfaces du béton armé font l'objet de la publication PI BAT «Protection des ouvrages de génie civil», y compris leurs applications sur d'autres matériaux (maçonneries en pierres naturelles ou de terre cuite, acier, bois, etc.). En Allemagne, leur application pour le béton armé est

définie dans deux directives parues en 1990, les directives RiLiDAfStB (6) et ZTV-SIB 90 (4). Ces techniques de protection étant déjà traités de manière complète dans d'autres documents, ils ne sont présentés ici que sous la forme d'une revue générale. Les figures 4.6a et 4.6b donnent un résumé comparatif des domaines d'application et des propriétés des systèmes de protection des surfaces définis selon la directive RiLiDAfStB.

Nom	Désignation	Application	Epaisseurs minimales des couches
OS-1	Imprégnation hydrophobe	Surfaces non carrossables	Couche non continue
OS-2	Glacis	Surfaces non carrossables	Couche continue, 0.05 mm
OS-3	Glacis	Surfaces carrossables	Couche continue, 0.05 mm
OS-4	Enduit mince rigide	Surfaces non carrossables - sans capacité de pontage des fissures	Couche continue, 0.08 mm
OS-5	Enduit mince souple	Surfaces non carrossables - capacité restreinte de pontage des fissures	Couche continue, 0.3 mm
OS-6	Enduit mince rigide	Surfaces sollicitées par des agents chimiques	Couche continue, 0.5 mm
OS-7	Enduit épais rigide	Sous revêtement bitumineux - sans capacité de pontage des fissures	Couche continue, 1.0 mm
OS-8	Enduit épais rigide	Surfaces carrossables et sollicitées par des agents chimiques, sans capacité de pontage des fissures	Couche continue, 1.0 mm
OS-9	Enduit épais souple	Surfaces non carrossables - avec capacité améliorée de pontage des fissures	Couche continue, 1.0 mm
OS-10	Enduit épais souple	Sous revêtement bitumineux - très bonne capacité de pontage des fissures	Couche continue, 2.0 mm
OS-11	Enduit épais souple	Surfaces carrossables - avec capacité améliorée de pontage des fissures	Couche continue, 3.0-5.0 mm
OS-12	Enduit épais rigide	Surfaces carrossables - sans capacité de pontage des fissures	Couche continue, 5.0 mm

Figure 4.6 a
Domaines d'application et épaisseurs minimales des couches des systèmes de protection des surfaces selon la directive RiLiDAfStB (6), voir également les figures 4.6b et 4.17a-c

	Imprégnation hydrophobe	Glacis	Enduit
Surface	Couche non continue	Couche continue	Couche continue
Epaisseurs minimales des couches	-	< 50 m	Enduit mince 0.1-1.0 mm - Enduit épais 1.0-5.0 mm
Absorption d'eau	Réduction momentanée et limitée	Réduction	Réduction jusqu'à empêchement
Diffusion de la vapeur d'eau	Non modifiée	Réduction	Réduction jusqu'à empêchement
Diffusion du gaz carbonique	Influence négative	Réduction	Forte réduction jusqu'à empêchement
Amélioration de la résistance au gel et de la résistance aux sels de déverglaçage	Amélioration momentanée et limitée	Amélioration	Forte amélioration
Réduction de l'absorption des matières nocives dissoutes dans l'eau (par exemple chlorures)	Réduction possible	Réduction possible	Réduction jusqu'à empêchement
Influence sur l'aspect visuel	Aucune	Possible	Possible
Humidité du béton	Sec	Sec	Sec à humide
Capacité de pontage des fissures	Non	Non	En fonction du système

Figure 4.6 b

Caractéristiques et effets des systèmes de protection des surfaces selon la directive RiLiDAfStB (6), voir aussi figures 4.6 a et 4.17 a-c ainsi que 5.26 et 5.27

4.2 Imprégnations

Le terme général «imprégnation» recouvre les traitements de surface du béton par des imprégnations hydrophobes (ne formant pas de pellicule) et par des glacis ou lasures (formant une pellicule).

4.2.1 Imprégnations hydrophobes

Une imprégnation hydrophobe réduit la capacité d'absorption capillaire du béton sans modifier notablement les caractéristiques qui régissent l'échange des gaz à la surface du béton. La résistance de la surface du béton à la diffusion de la vapeur d'eau et de CO_2 reste pratiquement la même. L'imprégnation hydrophobe (fig. 4.7) agit en modifiant la tension superficielle de l'eau à la surface du matériau et les gouttes d'eau vont alors s'y déposer sous forme de perles. Par la réduction de l'absorption d'eau, la pénétration et le transport dans le béton de matières nocives, telles que les chlorures et les gaz dissous dans l'eau, sont réduits et ralentis.

Les agents actifs d'une imprégnation hydrophobe sont des silanes, siloxanes ou silicones sans solvant, dissous dans l'eau en micro-émulsions ou dissous dans des matières organiques. L'imprégnation hydrophobe résulte des forces d'absorption des pores capillaires. Les critères de choix des produits d'imprégnation hydrophobe sont une bonne efficacité, un pouvoir de pénétration élevé et une stabilité suffisante. Les divers agents actifs se différencient par la taille de leurs molécules, leur composition chimique ainsi que leur pouvoir de réaction et de liaison. Lorsque la porosité de la surface est faible et en présence de pores de petit diamètre, il faut choisir des agents actifs avec des molécules de petit diamètre (fig. 4.8). Les recherches les plus récentes ont montré (9) que les moyens d'imprégnation hydrophobe avaient une efficacité insuffisante sur du béton dont la teneur en agents actifs était inférieure à 50%. La profondeur de pénétration de l'imprégnation hydrophobe dans le béton est d'environ 0,5 à 5 mm. Dans des cas particuliers, il est possible d'atteindre une profondeur de 15 mm. La durabilité de l'imprégnation hydrophobe est limitée, car son effet est détruit par les alcalis du ciment ainsi que les rayonnements UV; il existe toutefois de grandes différences en fonction de la nature des agents actifs. Des silanes à forte teneur en alkyls et d'autres compositions spécifiques restent efficaces durant plus de 10 ans.

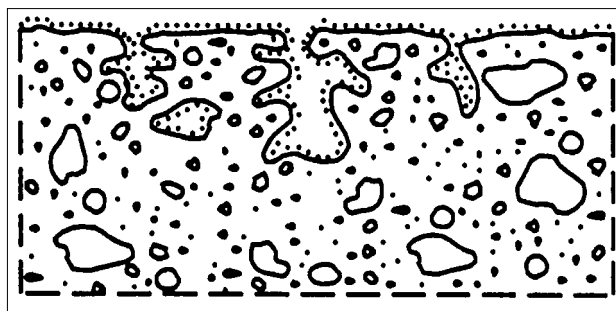


Figure 4.7
Coupe de principe sur une imprégnation hydrophobe (6)

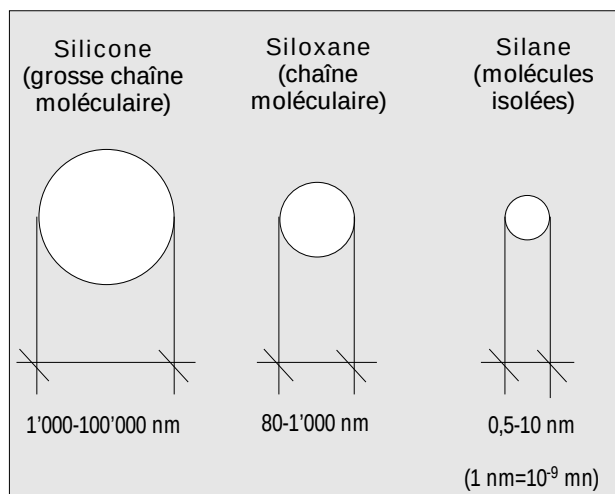


Figure 4.8
Diamètres des molécules des principaux agents actifs des imprégnations hydrophobes



Figure 4.9
*Application d'une imprégnation hydrophobe au moyen
d'une installation de projection*

Les produits sont appliqués au pinceau, au rouleau ou au pistolet (fig. 4.9). Pour obtenir une pénétration de profondeur suffisante, plusieurs passages sont nécessaires. La surface du béton doit être sèche avant l'application du produit d'imprégnation hydrophobe, sinon le pouvoir d'absorption est réduit. Le silane, et partiellement le siloxane, extraient l'humidité du support. En conséquence, ces agents actifs ne doivent être appliqués que sur des bétons âgés de quelques semaines, afin de ne pas interrompre l'hydratation du ciment. Des solvants organiques (par exemple du white spirit mélangé avec des siloxanes et des silicones) peuvent attaquer les mastics des joints ou des revêtements; ces surfaces seront donc bien protégées. Après l'application, le produit d'imprégnation hydrophobe non absorbé par le béton ne doit pas être enlevé, afin d'éviter la formation d'une pellicule indésirable sur la surface. Cet effet est moins marqué avec les silanes. On contrôlera en vérifiant le nombre d'applications et les quantités utilisées. Des examens complémentaires de capacité d'absorption avec des cubes de Karstens ou par des essais sur des carottages sont recommandés. Les imprégnations hydrophobes ne seront pas appliquées par basses ou très hautes températures, ni lorsque l'humidité de l'air ou de l'élément de construction est élevée.

Les imprégnations hydrophobes sont également utilisées comme couches de fond avant l'application d'enduits. Cette technique permet de réduire les risques de décollement d'enduit du fait de l'humidité résiduelle du support.

4.2.2 Glacis

Contrairement à l'imprégnation hydrophobe, les glacis forment une pellicule pratiquement fermée sur la surface du béton (fig. 4.10). Leur efficacité contre la pénétration des fluides est ainsi plus élevée que celle d'une imprégnation hydrophobe. Par contre la diffusion de la vapeur ou des gaz s'en trouve fortement diminuée. L'efficacité de l'étanchéité aux liquides ainsi que la diminution de la diffusion sont fonction de l'épaisseur de la pellicule et de sa continuité. Les chlorures en solution peuvent traverser les glacis par diffusion.

Différentes matières synthétiques servent de base pour les glacis, comme par exemple les résines acryliques, époxy ou polyuréthanes. Il existe des glacis avec ou sans solvant. Pour une épaisseur de couche identique, les produits sans solvant assurent une meilleure étanchéité. En raison de l'environnement et de l'hygiène du travail, les produits contenant des solvants cèdent aujourd'hui leur place à des produits sans solvant.

L'application du glacis se fait de manière identique à l'imprégnation hydrophobe, au rouleau ou, à la rigueur, au pistolet. Plusieurs passages sont nécessaires pour obtenir la pellicule désirée et l'épaisseur voulue. On vérifie cette dernière en contrôlant le nombre de passages, les quantités de matériaux utilisés, par examen visuel et par des essais sur des carottages. Comme pour l'imprégnation hydrophobe, le support doit être sec avant l'application. L'obtention d'une pellicule superficielle continue se révèle plus difficile sur des fonds très poreux ou grossiers.

Les glacis sont également utilisés comme couches de fond pour les enduits.

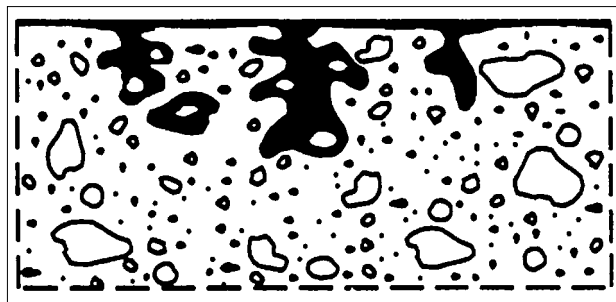


Figure 4.10
Coupe de principe sur un traitement au glacis (6)



Figure 4.11
Surface de béton traité au glacis avec 4 % de pigments

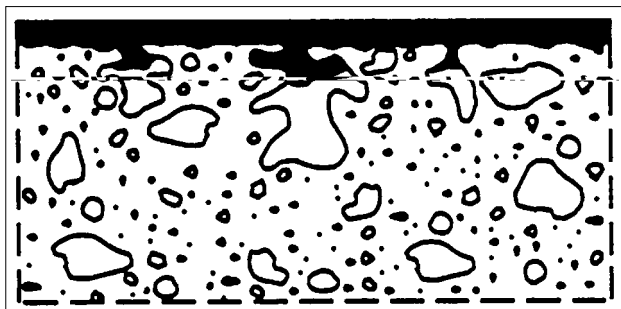


Figure 4.12
Coupe de principe après application d'un enduit(6)

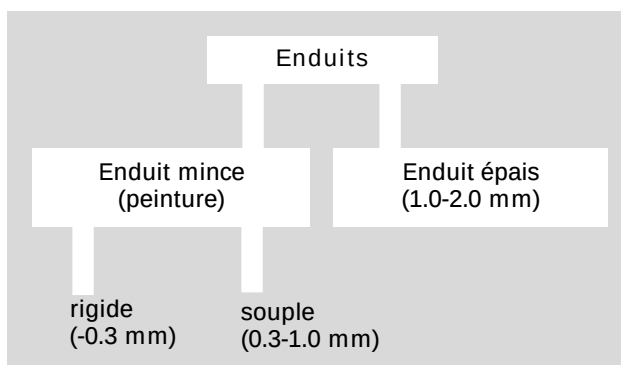


Figure 4.13
Les différents types d'enduits

4.3 Enduits

Comparés aux glaciés et en raison de leurs épaisseurs plus importantes, les enduits forment une pellicule totale (fig. 4.12). Ils permettent ainsi d'obtenir une étanchéité encore meilleure de la surface contre les pénétrations de liquides ou de gaz. Ils assurent en outre une certaine protection contre les dégradations mécaniques (solllicitations lors du nettoyage, par la circulation, etc.) et contre les conditions atmosphériques (températures, rayonnement UV, etc.). Ces caractéristiques souhaitées conduisent en général à une résistance à la diffusion plus importante du revêtement. En raison de l'épaisseur des couches ainsi que des modes d'application spécifiques, on différencie les enduits minces (peintures) avec des épaisseurs de 0,1 à 1 mm des enduits épais avec des épaisseurs de 1 à 2 mm.

Les enduits sont soumis à de plus hautes sollicitations que les imprégnations hydrophobes. Les exigences fixées pour les produits utilisés pour les enduits sont donc aussi plus sévères.

Exigences sujettes à contrôle pour des caractéristiques données:

- étanchéité contre l'eau, les gaz, les matières dangereuses;
- stabilité aux changements de température; coefficient de dilatation thermique le plus proche possible de celui du béton;
- adhérence au support;
- résistance à la traction et élasticité;
- résistance à l'usure;
- capacité de pontage des fissures;
- stabilité par rapport aux variations atmosphériques (rayonnement UV).

Les principaux risques présentés par les enduits – mauvaise adhérence au béton, formation de fissures, décollement sous l'effet de la pression de la vapeur – exigent beaucoup de soins lors du choix du système, de l'exécution et de la surveillance. Une condition préalable extrêmement importante pour assurer l'efficacité d'un enduit est un colmatage parfait des pores et des trous avant son application proprement dite, par exemple par un lissage.

4.3.1 Enduits minces (peintures)

Les enduits minces (peintures) forment à la surface du matériau une faible pellicule qui suit les irrégularités de la surface. Pour garantir l'intégralité désirée de la pellicule, on fixe des exigences relativement sévères pour la planéité et la porosité apparente du support. Les enduits minces sont proposés sur la base de différentes matières synthétiques avec solvant, en dispersion dans l'eau ou sans solvant. La proportion de liants étant plus élevée que dans les glaciés, les enduits sont plus visqueux. On différencie les enduits minces rigides des enduits minces souples.

Les enduits minces, rigides, sont constitués principalement de résines époxy. Ils sont relativement plus favorables que d'autres enduits et sont utilisés pour des couches jusqu'à 0,3 mm d'épaisseur environ. Ils protègent le béton de l'humidité et contre des matériaux agressifs. Le pontage des fissures qui se créent sous l'effet de variations de température, des charges ou du retrait du béton, n'est pas possible. Les enduits minces à base de résine époxy ne se sont pas révélés efficaces dans la protection contre les sels de déverglaçage: des concentrations élevées en chlorures ont été constatées de manière inattendue lors de diverses recherches sous de tels revêtements.

En raison de leur plus grande épaisseur (jusqu'à 1 mm), les enduits minces souples à base de résines acryliques ou de polyuréthane possèdent une petite capacité de pontage des fissures (ouverture de la fissure de 0,1 mm au max.). Il faut cependant considérer que la capacité de ponter des fissures est influencée par la température et par le vieillissement de l'enduit. De véritables essais de longue durée avec de tels matériaux ne sont pas encore disponibles.

L'application des enduits minces se fait par les procédés traditionnels, au pinceau, au rouleau ou au pistolet. Pour obtenir une pellicule fermée, il faut prévoir plusieurs applications. La surveillance s'exerce par le contrôle du nombre d'applications, la quantité de produit utilisé, ainsi que par l'examen de l'épaisseur de la couche, de l'adhérence et de l'absence de pores. L'application d'enduits minces exige des conditions climatiques assez précises (températures de l'air et du matériau, humidité relative de l'air, vent, etc.). Outre les températures de l'air et du matériau, il faut également veiller à la température du point de rosée (voir annexe C).



Figure 4.14
Application d'un enduit mince



Figure 4.15
Travaux de finition à la main sur un enduit épais projeté

Les enduits minces sont également utilisés comme couches de finition sur des enduits épais. Ils facilitent ainsi le nettoyage et renforcent la protection de l'enduit épais contre les conditions atmosphériques, en particulier contre le rayonnement UV.

4.3.2 Enduits épais

Les revêtements épais s'appliquent avec des épaisseurs de 1 à 2 mm. La plupart des produits sont à base de polyuréthane. Du fait de leur assez forte épaisseur, ils ne suivent pas toutes les irrégularités du support mais offrent au contraire une surface approximativement plane. Pour obtenir une épaisseur de couche régulière, les exigences relatives à la planéité du support sont en conséquence assez élevées; par contre, grâce à l'épaisseur du revêtement, les pores peuvent être remplis ou pontés. Les enduits épais offrent une haute résistance à la pénétration de l'humidité et des matières nocives, celle à la diffusion étant variable en fonction des produits utilisés.

Grâce à leur bonne élasticité et à leur épaisseur de 1 à 2 mm, les enduits épais ont le grand avantage d'assurer un bon pontage des fissures, même par basses températures (selon les produits, le pontage des fissures peut être assuré pour des mouvements jusqu'à 0,3 mm environ).

Les enduits épais modernes sont applicables avec de simples outils manuels ou au pistolet. L'épaisseur totale s'obtient en 2 ou 3 passages. Les contrôles sont exercés sur la base de la quantité de matériaux utilisés ainsi que par des mesures de l'épaisseur, de l'adhérence au support et de la planéité de la surface obtenue. Pour la plupart des produits, le support doit être sec avant l'application, afin d'éviter la formation de cloques ou une adhérence insuffisante au support.

Pour améliorer les possibilités de nettoyage et pour les protéger des rayons UV, les enduits épais sont souvent complétés par un revêtement mince. Pour remédier aux conséquences négatives de dégâts mécaniques, les enduits épais doivent être régulièrement réparés.

4.4 Systèmes de protection des surfaces selon RiLiDAfStB

Plusieurs mesures de protection des surfaces sont souvent utilisées en combinaison les unes avec les autres (par exemple imprégnations hydrophobes pour la couche primaire d'un enduit mince, enduits minces pour la protection d'enduits épais, etc.). De ces différentes combinaisons découle une série limitée de systèmes de protection des surfaces. Pour les ouvrages en béton armé, on retrouve les mêmes nécessités de protection qui demandent à être résolues.

L'Allemagne a défini un certain nombre de systèmes de protection des surfaces, dont l'application entre dans des conditions bien définies. La directive RiLiDAfStB (6) définit 12 systèmes de protection des surfaces (systèmes OS), la directive ZTV-SIB 90 (4) en donne 6. Les systèmes de classement de ces deux directives sont comparables. Les tableaux (fig.4.17 a à c) offrent une vue d'ensemble de ces systèmes de protection des surfaces.

La publication PI BAT «Protection des ouvrages de génie civil» (16) présente les systèmes de protection de manière détaillée. Cette documentation traite également, par exemple, des étanchéités bitumineuses.

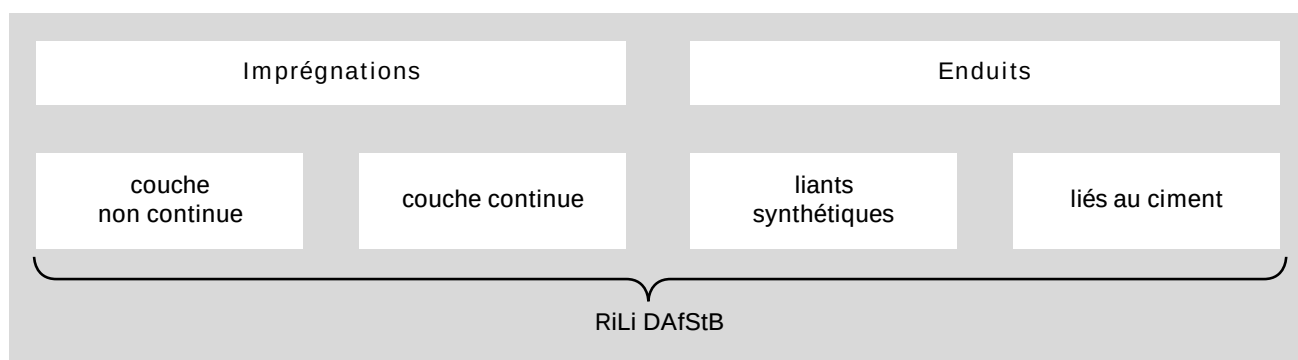


Figure 4.16
Systèmes de protection des surfaces traités dans la directive RiLiDAfStB (6)

RiLi(DAfStB)1)	OS 1	OS 2	OS 4	OS 5	OS 9
ZTV-SIB (BMV)2)	OS-A	OS-B	OS-C	OS-D	OS-E
Description sommaire	Imprégnation hydrophobe	Glacis	Enduit	Enduit avec une capacité minimale de pontage des fissures	Enduit pour surfaces non carrossables, avec une capacité de pontage des fissures améliorée
Epaisseurs minimales des couches $d_{s \text{ min } 3}$)	d 0	0,05 mm	0,08 mm	I. 0,30 mm II. 2,0 mm	1 mm
Principaux groupes de liants 4)	Silane, siloxane, résine de silicone	Acrylate	Acrylate, acrylate-polyuréthane	I. Dispersion d'acrylate II. Dispersion de coulis de ciment	Polyuréthane
Domaines d'application	Protection limitée contre l'humidité pour des surfaces de béton exposées aux intempéries	Protection préventive pour des surfaces de béton à l'air libre, mais délavées par un bon écoulement des eaux, dans les zones exposées aux embruns chargés de sels de déverglaçage (inadéquates pour les réfections)	Surfaces de béton à l'air libre dans des zones exposées aux embruns chargés de sels de déverglaçage; mesure usuelle pour des réfections selon les principes de protection contre la corrosion W et C	Surfaces de béton à l'air libre dans des zones exposées aux embruns chargés de sels de déverglaçage; mesure usuelle pour des réfections selon les principes de protection contre la corrosion W et C, dans les cas où une capacité de pontage minimale des fissures est nécessaire	Surfaces de béton à l'air libre, avec risques de fissures, dans des zones exposées aux embruns ou aux éclaboussures d'eau chargée de sels de déverglaçage
Composition (description sommaire)	Imprégnation hydrophobe (au minimum deux applications)	1. Imprégnation hydrophobe comme OS1 2. Si nécessaire couche de fond (éventuellement 1. et 2. combinés) 3. Au minimum deux couches de recouvrement	1. Lissage 2. Si nécessaire imprégnation hydrophobe comme OS 1 (seulement en présence de sels de déverglaçage) 3. Si nécessaire couche de fond (éventuellement 2. et 3. combinés) 4. Au minimum deux couches de recouvrement	I. 1. Lissage si nécessaire 2. Dans la règle couche de fond et, si nécessaire, imprégnation hydrophobe 3. Deux à quatre couches de recouvrement II. 1. Lissage si nécessaire 2. Coulis d'étanchéité en trois mains	1. Lissage 2. Dans la règle couche de fond, le cas échéant avec saupoudrage 3. Deux couches de recouvrement 4. Si nécessaire couche superficielle de protection contre les rayons UV

- 1) Directive pour la protection et la réfection d'ouvrages en béton, DafStB (6)
- 2) Directives et conditions techniques contractuelles complémentaires pour la protection et la réfection d'ouvrages en béton, 1990 (4)
- 3) Epaisseur minimale de la principale couche de protection des surfaces, pour le système considéré (valeur indicative)
- 4) Groupe de liants de la principale couche de protection des surfaces
- 5) Sous réserve de contrôle, également valable dans les zones d'éclaboussures

Figure 4.17a

Vue d'ensemble des systèmes de protection des surfaces, pour les surfaces non carrossables

RiLi(DAfSiB)1)	OS 3	OS 6	OS 8	OS 11	OS 12
ZTV-SiB (BMV2)				OS F	
Description sommaire	Glacis pour surfaces carrossables	Enduit résistant du point de vue chimique, pour surfaces ne subissant que peu de contraintes mécaniques	Revêtement résistant du point de vue chimique, pour surfaces carrossables subissant d'importantes contraintes mécaniques	Revêtement pour surfaces carrossables avec une capacité élevée de pontage des fissures	Enduit pour les surfaces carrossables subissant d'importantes contraintes mécaniques, avec bétons ou mortiers à base de résines réactives
Epaisseurs minimales des couches $d_{s \min}$ 3)	0.05 mm	0.50 mm	1 mm	I. 1.5 mm II. 3.0 mm III. 1.5 mm	5 mm
Principaux groupes de liants 4)	Epoxy, acrylate, polyuréthane	Epoxy, polyuréthane	Epoxy	Epoxy - polyuréthane	Epoxy
Domaines d'application	Zones piétonnières et voies de circulation, en général non exposées aux intempéries et ne subissant que peu de contraintes mécaniques	Surfaces ne subissant que peu de contraintes mécaniques, exposées aux liquides et aux produits chimiques, système applicable pour les réfections selon le principe C de protection contre la corrosion	Surfaces de béton sollicitées mécaniquement et chimiquement	Surfaces de béton exposées à la fissuration telles que les bordures ainsi que les surfaces exposées à de fortes sollicitations mécaniques telles que les dalles de parkings et les chaussées de ponts	Sols industriels et chaussées en béton
Composition (description sommaire)	Application en une ou plusieurs fois d'une résine réactive	1. Couche de fond 2. Lissage 3. Une ou plusieurs couches de revêtement	1. Couche de fond 2. Une ou plusieurs couches de recouvrement 3. Le cas échéant couche superficielle de protection	I. 1. Couche de fond 2. Si nécessaire lissage 3. Couche intermédiaire élastique avec capacité de pontage des fissures 4. Chape de protection avec fonction de couche d'usure II. 1. et 2. dito I. 3. Trois couches de revêtement, dont les deux premières sont renforcées par un tissu de fibres de verre III. 1. à 3. dito I. 4. Revêtement de protection avec tissu de fibres de verre	1. Couche de fond 2. Mortiers ou bétons à base de résines réactives 3. Glacis si nécessaire 4. Eventuellement saupoudrage du glacis

Figure 4.17b
Vue d'ensemble des systèmes de protection des surfaces pour les surfaces carrossables (légende voir figure 4.17a)

RIL (DAfStB)1)	OS 7	OS 10
ZTV-SIB (BMV)2)		
Description sommaire	Enduit sous les couches d'étanchéité bitumineuses des ponts ou d'autres ouvrages similaires	Enduit faisant office de couche d'étanchéité sous les couches bitumineuses ou autres couches de protection ou de revêtement, avec une capacité très élevée de pontage des fissures
Epaisseurs minimales des couches $d_{s \min}$ 3)	1 mm	2 mm
Principaux groupes de liants 4)	Epoxy	Polyuréthane
Domaines d'application	Couches de fond, glacis et couche d'accrochage en tant qu'élément de l'étanchéité sous les revêtements bitumineux appliqués sur le béton	Etanchéité sous les revêtements bitumineux carrossables ou d'autres couches de protection ou de revêtement de ponts, sols de tunnels ou de galeries, parkings
Composition (description sommaire)	I. Couche de fond : 1. Résine époxy 2. Saupoudrage II. Glacis : 1. Couche de fond 2. Saupoudrage surabondant 3. Glacis III. Couche d'accrochage : 1. Couche de fond 2. Couche d'accrochage 3. Saupoudrage	1. Couche de fond 2. Couche d'accrochage si nécessaire 3. Saupoudrage 4. Couche d'étanchéité avec capacité de pontage des fissures, au minimum en deux couches 5. Couche de liaison si nécessaire 6. Couche de protection en asphalte coulé 7. Couche de surface (revêtement)

- 1) Directive pour la protection et la réfection d'ouvrages en béton DAfStB (6)
2) Directives et conditions techniques contractuelles complémentaires pour la protection et la réfection d'ouvrages en béton, 1990 (4)
3) Epaisseur minimale de la couche principale de la protection des surfaces, pour le système considéré (valeur indicative)
4) Groupe de liants de la principale couche de la protection des surfaces

Figure 4.17c

Vue d'ensemble des systèmes de protection des surfaces sous les couches bitumineuses ou autres couches de revêtement

5. Choix des mesures de réfection et du système de protection des surfaces

5.1	Introduction	79
5.2	Etat existant	80

5.3	Conditions et exigences spécifiques à l'ouvrage	81
5.3.1	Introduction	81
5.3.2	Exploitation et utilisation	81
5.3.3	Entretien	82
5.3.4	Conditions climatiques	83
5.3.5	L'ouvrage	88

5.4	But de la réfection	89
-----	---------------------	----

5.5	Choix des procédés et des systèmes	90
5.5.1	Analyse	90
5.5.2	Etapes nécessaires pour une réfection	90
5.5.3	Variantes de réfection	95
5.5.4	Choix de la meilleure variante	97

5.6	Choix des produits	98
5.6.1	Introduction	98
5.6.2	Soumissions orientées sur les exigences	99
5.6.3	Prescription des produits	100

5. Choix des mesures de réfection et du système de protection des surfaces

5.1 Introduction

Le but de la publication «Réfection des ouvrages en béton» est de présenter à l'ingénieur une marche à suivre qui lui permette de choisir, parmi les différentes techniques disponibles, la méthode de réfection la plus adaptée, après avoir pris connaissance des différentes solutions possibles. Pour effectuer ce choix, il faut prendre en considération les objectifs fixés et les conditions spécifiques.

L'expérience a montré qu'une solution correcte des problèmes de routine posés à l'ingénieur passait par une démarche systématique. Il en va de même pour les études de réfection d'ouvrages, qui ne se différencient des travaux de routine que dans la mesure où il s'agit, pour de nombreux d'ingénieurs, d'un domaine nouveau où les connaissances techniques ne sont pas toujours simples à maîtriser et où les possibilités de formation sont encore limitées.

Le programme PI BA «Entretien et rénovation des constructions» a déjà élaboré diverses publications qui traitent de l'entretien des ouvrages de génie civil et du bâtiment. Les premiers sujets traités ont été: «Le diagnostic des ouvrages de génie civil» (19), «Les techniques d'auscultation des ouvrages de génie civil» (18), «Protection des ouvrages de génie civil» (16) et «Maintenance de routes à grand débit en exploitation» (17). Dans le cadre de la démarche pour l'établissement d'un diagnostic (19) (fig. 52), celui-ci contient des recommandations relatives aux premières mesures à prendre, recommandations de natures très diverses: mesures d'exploitation (limitation des charges, fermetures), mesures touchant à la construction (par exemple renforcements provisoires, travaux de réfection proprement dits) ou mesures dans le domaine de la surveillance. Avant chaque réalisation des mesures de réfection sur un ouvrage, une phase de préparation est à prévoir. A ce stade, il faut établir le projet de réfection et définir le déroulement des travaux en collaboration avec tous les intéressés. Le choix de l'entreprise qui exécutera les travaux fait d'ordinaire l'objet d'un appel d'offres.



Figure 5.1
Le choix des mesures de réfection et des systèmes de protection des surfaces appropriés est une tâche difficile

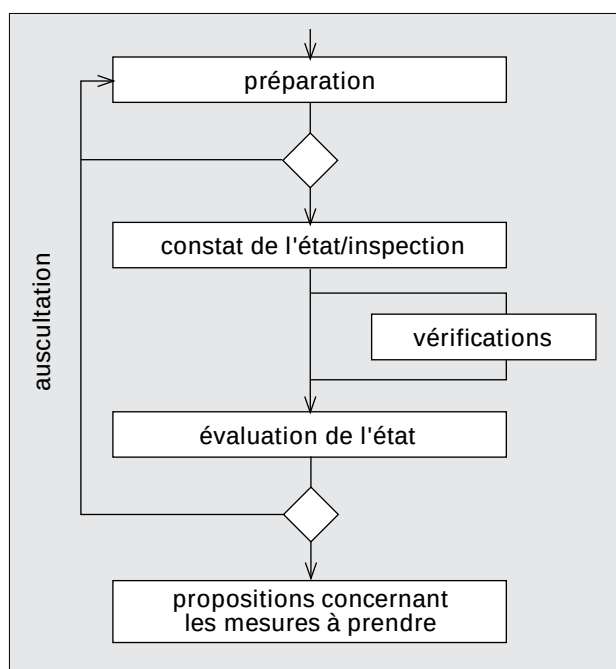


Figure 5.2
Déroulement de l'auscultation selon (19)

Caractéristiques et état des matériaux

Béton :

Résistance du béton (également en surface)
 Porosité
 Profondeur de la carbonatation
 Teneur et répartition des matières nocives (par exemple chlorures)
 Eventuellement, composition du béton

Armatures

Position
 Enrobage
 Degré de corrosion

Défauts

Nids de gravier
 Dégâts superficiels
 Eclats
 Fissures (largeur, profondeur, mouvements, pénétration de l'eau, etc.)
 Inclusion (par exemple bois)

Causes des dégâts

Etendue des dégâts

Evaluation de l'état
 (y compris évaluation des développements possibles des dégâts et de la durée d'utilisation résiduelle)

Lors de réparations d'ouvrages en béton, il faut être conscient que toute mesure entraîne des modifications substantielles et que l'ouvrage ne sera jamais complètement rétabli dans son état d'origine. L'application d'imprégnation et d'enduits modifie la surface du béton, influençant, en bien ou en mal, l'adhérence de couches (de protection) ultérieures. L'aspect extérieur s'en trouvera changé: le cas échéant, examiner le projet avec attention, surtout s'il s'agit de monument historique.

5.2 Etat existant

Si, dans le cadre de l'étude du projet d'une construction nouvelle, il est indispensable de réunir les informations nécessaires sur la topographie et les conditions géotechniques, il est tout aussi nécessaire, lors de l'établissement du projet et de la réalisation de la réparation d'un ouvrage, de réunir toutes les informations disponibles sur l'ouvrage lui-même et sur son état existant. Ces informations sont normalement recueillies dans le cadre de la phase de l'auscultation-inspection de l'ouvrage. Elles seront disponibles avant le début de l'étude du projet. Il peut également s'avérer que la recherche d'autres informations soit nécessaire pendant le projet ou en cours d'exécution.

Un exemple de check-list des informations nécessaires les plus importantes est présenté à la figure 5.3. Les différentes informations obtenues pendant les recherches sur l'état de l'ouvrage feront l'objet d'une appréciation qui servira de base à la préparation de la réparation.

Figure 5.3
 Les renseignements les plus importants qu'une auscultation, faite en vue d'une réparation du béton, devrait permettre d'acquérir

5.3 Conditions et exigences spécifiques à l'ouvrage

5.3.1 Introduction

En plus de l'appréciation de l'état existant de l'ouvrage (voir chap. 5.2), d'autres conditions spécifiques sont à considérer lors du choix des mesures de réfection à réaliser. Ces conditions peuvent être subdivisées en 4 catégories (fig. 5.4) : les conditions relatives à l'exploitation et au service de l'ouvrage, celles relatives à l'entretien, celles imposées par le climat (température, humidité de l'air, intempéries, exposition aux matières nocives, etc.) et, enfin, celles relatives aux comportements statique, géométrique et de physique des constructions de l'ouvrage. Selon les circonstances, d'autres exigences spéciales seront encore prises en considération (esthétiques par exemple).

Les paragraphes suivants trouvent leur complément au chapitre 3, «Exigences relatives aux systèmes de protection et critères de choix» de la publication PI BAT «Protection des ouvrages de génie civil» (16).

5.3.2 Exploitation et utilisation

C'est l'exploitation et l'utilisation d'un ouvrage qui dictent les conditions des travaux de réfection. L'ingénieur chargé du projet en prendra connaissance et les acceptera; il développera des solutions qui remplissent ces conditions. L'attention du maître de l'ouvrage pourra cependant également être attirée par les possibilités d'économie résultant de la modification de ces conditions. Avec ces éléments, un maître de l'ouvrage compétent est à même de faire les choix nécessaires en fonction des coûts et des possibilités d'utilisation. Dans d'autres cas, l'ingénieur mandaté joue un rôle complémentaire de conseil pour le maître de l'ouvrage, afin de lui permettre de choisir la meilleure solution.

Au cours de cette étude préalable, il faut également tenir compte d'éventuelles conditions non usuelles pour l'exécution des travaux, comme par exemple le travail de nuit, le travail durant le week-end, les interruptions momentanées du travail, etc. En fonction des régimes d'utilisation et d'exploitation, on peut alors développer des programmes de travaux intéressants et globalement économiques.

Exploitation et utilisation
Fermeture partielle ou totale
Durée de la fermeture
Vibrations, etc.

Entretien
Exigences pour la réfection du point de vue de l'entretien de l'ouvrage (nettoyage, réparations, inspections)

Conditions climatiques
Température de l'air
(Variations de courtes et de longues durées)
Humidité relative de l'air
Précipitations
Exposition aux matières nocives (zones en contact avec l'eau, exposées aux éclaboussures, aux embruns ou aux gaz d'échappement, etc.)

Ouvrage
Sécurité structurale, aptitude au service
Comportement du point de vue de la physique des constructions
Caractéristiques géométriques
Exigences esthétiques, etc.
Durée d'utilisation résiduelle supposée

Figure 5.4
Exigences et conditions spécifiques à l'objet considéré

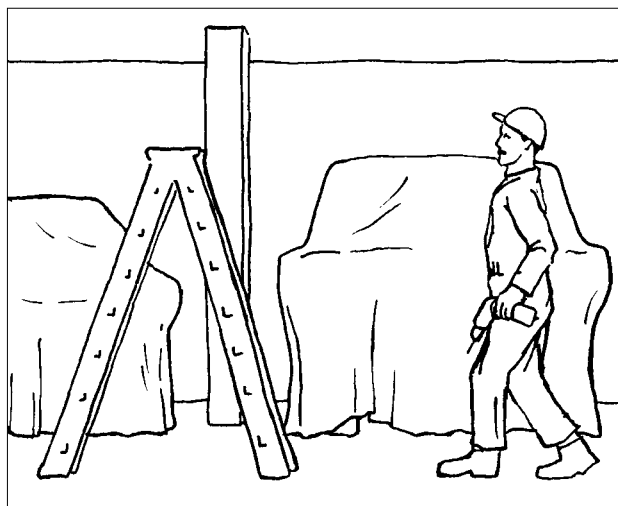


Figure 5.5
Lors d'une réfection il faut réduire au minimum les restrictions d'utilisation et d'exploitation d'un ouvrage; il s'agit là d'une condition importante

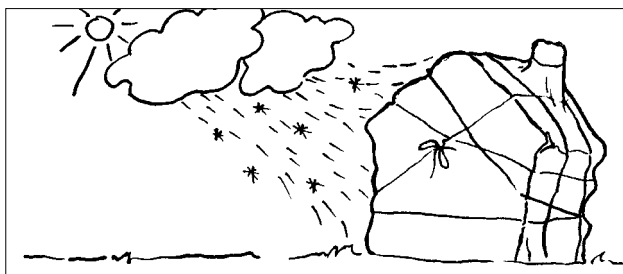


Figure 5.6
Il existe toutefois des limites aux mesures de protection à prendre lors de travaux de réfection !

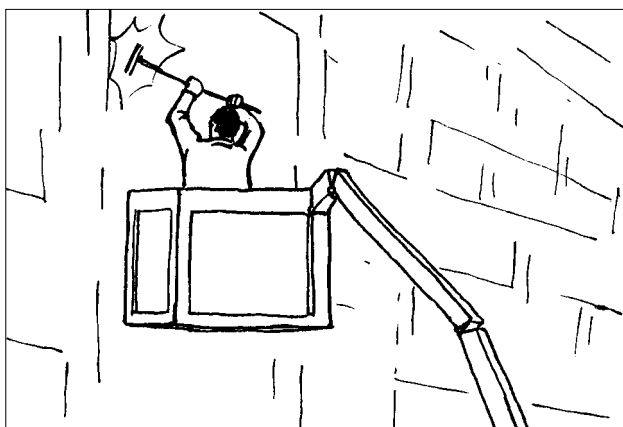


Figure 5.7
Il faut se soucier des exigences relatives au nettoyage lors de l'étude du projet déjà (également valable pour les constructions neuves !)

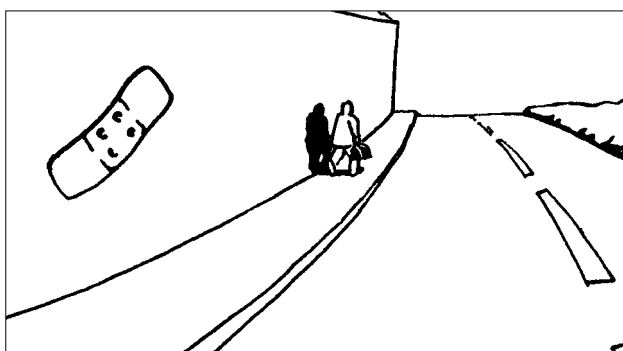


Figure 5.8
Les couches de protection des surfaces, situées à proximité des voies de circulation, devraient pouvoir être réparées de manière aisée

Vis-à-vis du maître de l'ouvrage, il est un point sur lequel l'ingénieur ne doit pas transiger. Pour qu'une réfection soit de qualité irréprochable, des conditions climatiques minimales sont nécessaires (température de l'ouvrage, température et humidité de l'air, etc.). Jusqu'à un certain point, il est possible de créer ces conditions par des mesures coûteuses telles que toits provisoires, chauffage, etc. Il y a cependant des limites et, au plus profond de l'hiver (décembre à mars), des travaux de réfection du béton ne peuvent en général pas être exécutés avec succès sur des éléments de construction à l'extérieur.

5.3.3 Entretien

Il arrive que l'on néglige, lors du projet, les exigences relatives à l'entretien de l'ouvrage à la suite de travaux de réfection entraînant parfois de sérieuses difficultés ultérieures pour les utilisateurs. En particulier, le nettoyage et les réparations ainsi que la surveillance peuvent poser des conditions complémentaires.

Pour le nettoyage, on prévoira les risques de salissures, ainsi que les outils et les moyens à engager. Le nettoyage peut constituer une condition déterminante pour les revêtements non sollicités mécaniquement. Les surfaces tendres attirent la saleté et sont relativement difficiles à nettoyer.

Pour les éléments d'ouvrage qui sont, par exemple, sollicités par la circulation de véhicules, il faut prévoir une réparation régulière des couches de protection des surfaces, travaux qui sont du domaine du personnel d'entretien habituel.

Les parements, ainsi que les revêtements isolants de l'électricité, limitent les possibilités d'inspection ultérieure d'un élément d'ouvrage. Le recours à l'utilisation de certains moyens de contrôle non destructifs (par exemple les mesures de potentiel) est limité ou même impossible.

5.3.4 Conditions climatiques

Par conditions climatiques, on entend l'ensemble des influences atmosphériques qui agissent sur une partie d'un ouvrage ou un élément de construction. En effet, d'une partie à l'autre d'un même ouvrage, des situations très différentes peuvent se présenter qui doivent être prises en considération pour la réfection. Il n'est pas possible de traiter ici le problème des conditions climatiques de manière exhaustive. Les considérations qui suivent se limitent aux points principaux.

Les températures et la rapidité de leurs changements représentent la sollicitation prédominante pour les couches superficielles (couches de remplacement de béton ou protection des surfaces). En été, un refroidissement rapide par un orage provoque de très fortes contraintes entre une couche superficielle et l'ancien béton. L'exécution elle-même et les traitements ultérieurs sont largement tributaires de ces conditions.

Le rayonnement solaire (UV) est, à côté de l'alcalinité de la pâte du ciment, le paramètre le plus important qui agisse sur le vieillissement de nombreux matériaux de revêtements. Les revêtements sensibles aux UV ne peuvent être utilisés que de manière limitée en cas d'exposition au soleil, ou doivent être protégés par des mesures complémentaires, par exemple avec un revêtement de finition. De tels revêtements de protection sont à renouveler régulièrement.

Comme nous l'avons déjà mentionné (voir chapitre 2.1), la corrosion des armatures ne se développe que dans des conditions bien définies. En particulier, il faut que le béton ait une conductivité minimale. Les bétons situés en ambiance sèche, à l'intérieur, non exposés à d'autres sources d'humidité (par les parois extérieures, par les fondations, etc.) émanent à ces conditions, et leur risque de corrosion est en conséquence limité (exceptions: chambres humides, caves). La figure 5.12 «Classes d'exposition en fonction de l'environnement» illustre ce phénomène. Ce tableau est tiré de la pré-norme européenne SIA V162.001 «Calcul des structures en béton» (33) et sert de base pour la détermination des exigences minimales d'enrobage des armatures.

Durabilité de la liaison entre l'ancien béton et la nouvelle couche de protection

Durabilité de l'action protectrice d'une couche de protection des surfaces

Vitesse de corrosion

Pénétration de matières nocives

Figure 5.9
Paramètres influencés par les conditions climatiques

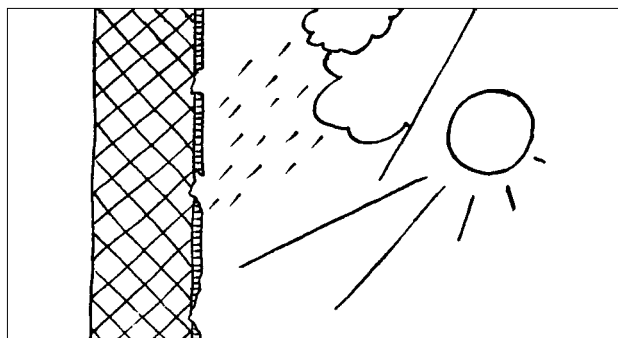


Figure 5.10
Une pluie d'orage provoque des tensions élevées dans les zones d'adhérence

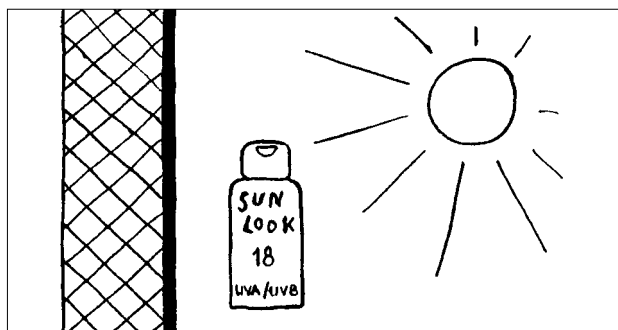


Figure 5.11
L'exposition aux rayons UV accélère le vieillissement des matières organiques du revêtement

Classe d'exposition		Exemples de conditions d'environnement
1 Environnement sec		- intérieur des bâtiments d'habitation courants ou bureaux (1)
2 Environnement humide	a sans gel	- intérieur des bâtiments humides (exemple : buanderies) - atmosphère extérieure - terrains non agressifs et/ou saturés d'eau
	b avec gel	- atmosphère extérieure avec risque de gel - terrains non agressifs et/ou dans l'eau et exposés au gel - composants intérieurs soumis à une humidité élevée et exposés au gel
3 Environnement humide avec gel et emploi de sels anti-verglas		- composants intérieurs et extérieurs exposés au gel et aux sels anti-verglas
4 Environnement marin	a sans gel	- composants totalement ou partiellement immergés dans l'eau de mer, ou dans une zone d'embruns - composants en atmosphère saturée de sel (zone côtière)
	b avec gel	- composants totalement ou partiellement immergés dans l'eau de mer ou dans une zone d'embruns et exposés au gel - composants en atmosphère saturée de sel et exposés au gel
Les classes suivantes se rencontrent seules ou combinées avec les classes ci-dessus :		
5 Environnement chimique agressif (2)	a	- environnement chimique légèrement agressif (gaz, liquide ou solide) - atmosphère industrielle agressive
	b	- environnement chimique moyennement agressif (gaz, liquide ou solide)
	c	- environnement chimique fortement agressif (gaz, liquide ou solide)
(1) Cette classe d'exposition n'est applicable que si, pendant la construction, la structure ou certains de ses composants ne sont pas soumis à des conditions plus sévères pendant une longue durée. (2) Les environnements chimiquement agressifs sont classifiés par la norme ISO/DP 9690. Les équivalences suivantes peuvent être admises : Classe d'exposition 5 a : classement ISO A1G, A1L, A1S Classe d'exposition 5 b : classement ISO A2G, A2L, A2S Classe d'exposition 5 c : classement ISO A3G, A3L, A3S		

Figure 5.12
Classes d'exposition en fonction de l'environnement

Lors de l'appréciation des risques auxquels un élément d'ouvrage est exposé, il faut également prendre en compte la pénétration de matières nocives, en particulier de chlorures en liaison avec l'humidité. Pour la classe d'exposition 3 de la pré-norme européenne SIA V162.001 «Environnement humide avec gel et emploi de sels antiverglas», il est exigé un même enrobage minimal des armatures que pour la classe 4 «Environnement marin». Dans l'appréciation de l'exposition aux produits de déglacage, en particulier aux sels antiverglas, il faut tenir compte de la position de l'élément de construction ainsi que de la fréquence de l'exposition. On distingue les zones en contact avec l'eau, les zones exposées aux éclaboussures et les zones exposées aux embruns (fig. 5.13 et 5.14). La zone exposée aux éclaboussures se limite à une hauteur d'environ 1,5 à 2 m au-dessus de la chaussée. Dans des cas particuliers, une appréciation se fait in situ à partir d'observations pendant des précipitations.

Zones en contact avec l'eau

Le béton est en contact direct avec la solution saline. Une différence peut être faite entre des expositions occasionnelles ou permanentes, ainsi qu'entre des expositions à pression normale ou sous forte pression.

Zones exposées aux éclaboussures

Le béton n'est en contact avec la solution que de manière occasionnelle, par exemple lorsque les véhicules projettent latéralement des eaux de fonte ou des résidus neigeux.

Zones exposées aux embruns

Le béton n'est en contact qu'avec de petites quantités de la solution saline. Une augmentation de la concentration et une pénétration sont cependant possibles lors de formations occasionnelles de condensation.

Figure 5.13
 Définition des zones d'exposition pour l'action des chlorures (voir figure 5.14)

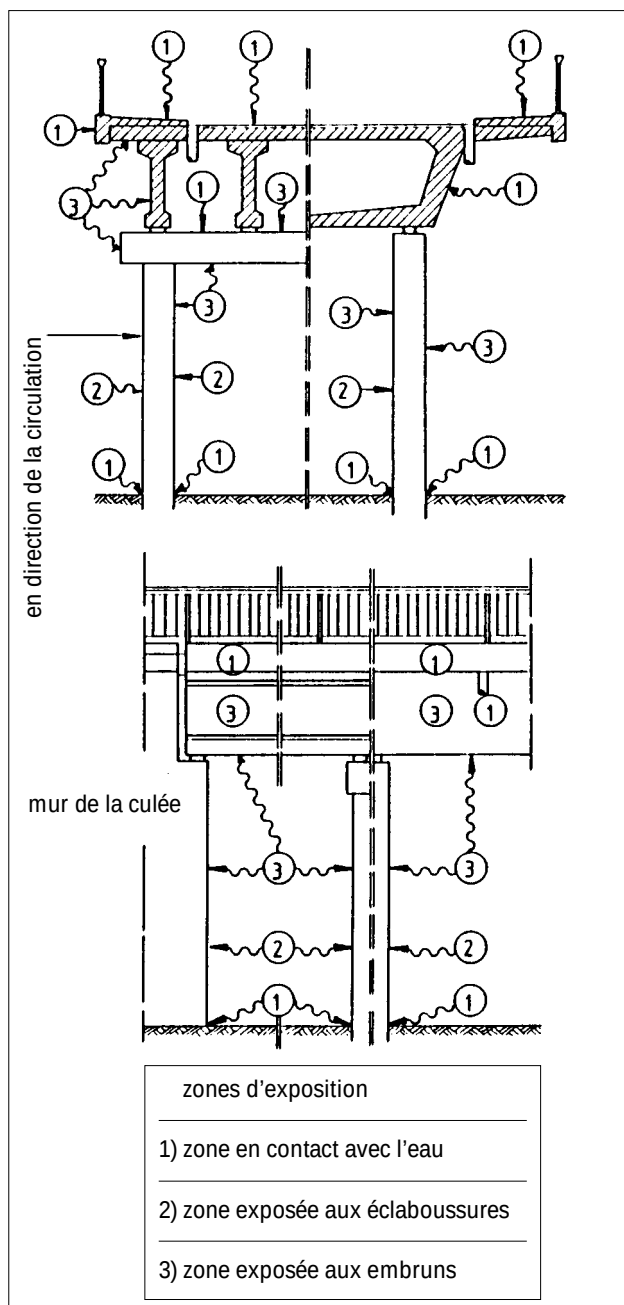


Figure 5.14
Exemple des zones d'exposition à l'action des chlorures
sur un pont (voir aussi figure 5.13) (20)

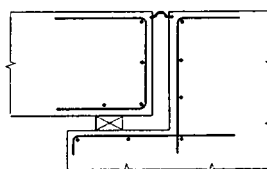
Il s'est avéré que ce sont les surfaces protégées de la pluie mais exposées aux chlorures (dans les tunnels, les galeries par exemple) qui sont le plus fortement sollicitées. Ce phénomène est dû au séchage plus important et plus profond de ces zones et à la capacité d'absorption plus importante qui en résulte. Une explication complémentaire pourrait être l'absence de rinçage et de lavage des chlorures par les précipitations naturelles. Selon la directive pour l'utilisation des aciers d'armatures revêtus de résine époxy de l'OFR (2), les catégories de sollicitations définies selon les données contenues dans la figure 5.15 sont également valables.

Parallèlement à l'action des chlorures, celle du dioxyde de carbone est une cause fréquente de dégâts au béton. Le déclenchement de la corrosion des armatures résulte parfois de la carbonatation du béton d'enrobage. Les progrès de la carbonatation sont les plus grands pour des valeurs d'humidité de l'air comprises entre 50 et 70%. Lorsque l'humidité relative de l'air est plus élevée, la perméabilité au CO_2 du béton est réduite; pour des valeurs moindres, la réaction de carbonatation est empêchée par le manque d'humidité.

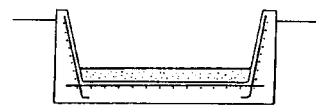
Catégorie de risques I

Surface en contact direct avec de l'eau salée

- Zones sous les joints de chaussées pour des appuis Gerber
- Extrémités des ponts
- Faces supérieures de radiers (par exemple dans les tranchées, les passages inférieurs, les galeries à ciel ouvert et les ponts)



extrémité de pont

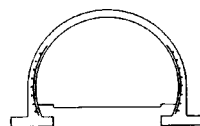


tranchée

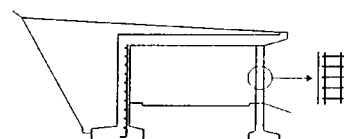
Catégorie de risques II

Éléments exposés aux éclaboussures, mais non délavés par la pluie (jusqu'à une hauteur de 1.5 à 2.0 m)

- Piles de ponts et murs de culées situés à proximité de voie de roulement
- Parois de tunnels et de galeries, colonnes, pieds-droits de passages inférieurs



paroi de tunnel

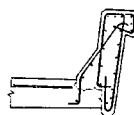


paroi ou pilier de galerie

Catégorie de risques III

Éléments exposés aux éclaboussures et à la pluie

- Éléments latéraux (par exemple bordures et parapets de ponts)
- Murs de soutènement le long de routes
- Parois latérales porteuses de ponts



parapet

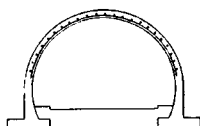


mur de soutènement

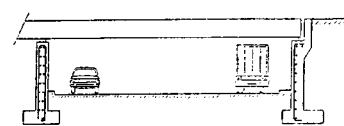
Catégorie de risques IV

Éléments exposés aux embruns (à partir d'une hauteur de 1.5 à 2.0 m)

- Éléments latéraux
- Faces inférieures de ponts et éléments de voûtes



voûte de tunnel



sous-face de pont

Figure 5.15

Catégories de risques de corrosion pour les armatures des ouvrages d'art à proximité des voies de circulation (Le degré de risque est le plus élevé dans la catégorie I, il est le plus faible dans la catégorie IV) (2)

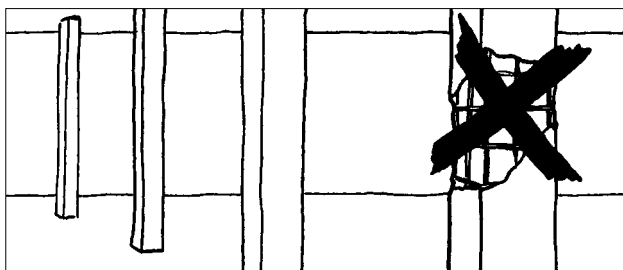


Figure 5.16
La sécurité structurale doit être garantie en tout temps

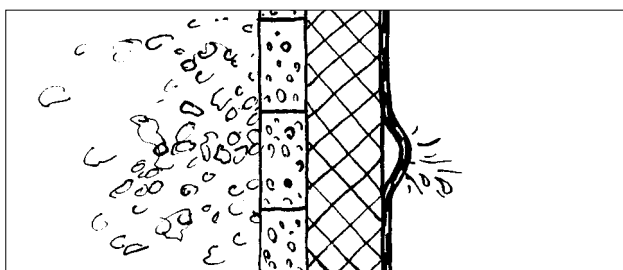


Figure 5.17
Lors de mesures de réfection à prendre, les conséquences découlant de la physique des constructions doivent être vérifiées

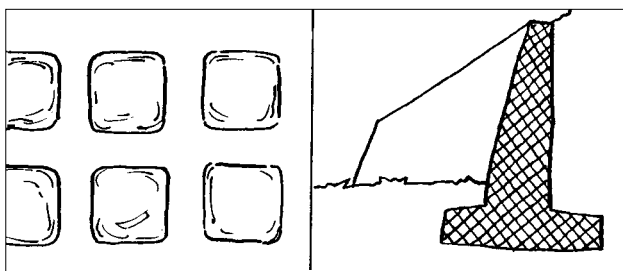


Figure 5.18
Les caractéristiques géométriques influencent le choix de la mesure de réfection à prendre.

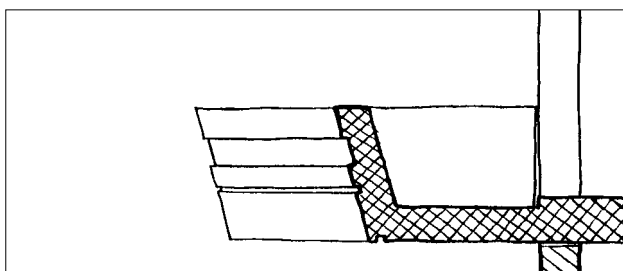


Figure 5.19
Des exigences spécifiques à l'ouvrage - par exemple esthétiques - peuvent réduire considérablement le choix des possibilités de réfection

5.3.5 L'ouvrage

Lors du choix d'une solution de réfection, d'importantes conditions se rapportant à l'ouvrage lui-même sont à prendre en considération. Après la réfection l'ouvrage doit normalement continuer à satisfaire aux exigences fixées que l'on peut résumer par les notions de sécurité structurale et d'aptitude au service. Elles figurent dans le plan d'utilisation. Les caractéristiques géométriques de l'ouvrage exercent également une influence. La durée de vie de la mesure de réfection projetée sera fonction de la durée d'utilisation prévue pour l'ouvrage ou pour l'élément de construction concerné.

La sécurité structurale de l'ouvrage ne sera pas réduite de manière sensible par la réfection. Même pendant l'exécution, la sécurité structurale restera assurée en tout temps, le cas échéant à l'aide de mesures de sécurité temporaires. Les bases pour le calcul de la sécurité structurale figurent à la norme SIA 162 (32) ainsi que dans la recommandation SIA 462 (37) (en préparation).

Le béton non traité est perméable, aussi bien au gaz qu'à la vapeur d'eau. En fonction des conditions locales, cette caractéristique peut mettre en danger la mesure de réfection elle-même ou l'aptitude au service de l'ouvrage. Cet élément de la physique des constructions sera en conséquence pris en compte lors du projet déjà.

Les caractéristiques géométriques de l'ouvrage rendent parfois beaucoup plus difficile l'exécution d'une mesure de réfection. De grandes surfaces planes sont propices à l'application de procédés de démolition, de reprofilage et de revêtements, alors que d'autres procédés seront préférés sur des ouvrages très découpés.

Des exigences esthétiques particulières – par exemple béton apparent, surface du béton teintée – sont susceptibles de sérieusement limiter les possibilités de réfection.

5.4 But de la réfection

Le maître de l'ouvrage, l'ingénieur ou l'architecte mandaté doivent s'entendre sur les buts de la réfection avant la mise en route de l'étude du projet (fig. 5.20 et 5.21). Dans ce cadre, il sera judicieux de fixer la durée d'utilisation pendant laquelle l'ouvrage ne devrait plus nécessiter de réfections importantes (art. 7.3 SIA 169, proposition 1993). Le maître de l'ouvrage aura cependant conscience, en particulier dans les cas où les dégâts sont déjà très avancés, qu'une réfection ne rendra pas à l'ouvrage un état et une durée de vie comparables à ceux d'un ouvrage neuf.

Il est toujours possible, et dans certains cas ce sera judicieux, de choisir des mesures de réfection – éventuellement provisoires – qui ne stopperont pas complètement le développement des dégâts, mais qui les ralentiront cependant suffisamment dans l'attente d'une réfection complète, en prolongeant par exemple la durée d'utilisation jusqu'au moment de son remplacement.

Lors de l'étude du projet, on s'efforcera de supprimer les causes des dégâts (par exemple conduites d'évacuation des eaux non étanches, fissures, étanchéités défectueuses, etc.). Ainsi, après réfection, l'ouvrage ou l'élément de construction ne sera plus exposé à ces influences néfastes. Lorsque la cause du dégât ne peut pas être supprimée, une protection directe de l'élément de construction doit alors être prévue (par exemple protection des surfaces).

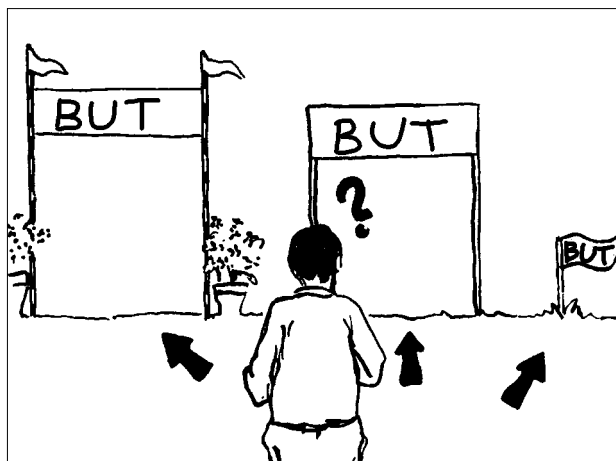


Figure 5.20
Pour réussir une réfection il est important de définir préalablement un objectif clair

- Supprimer les causes des dégâts
- Ralentir le développement des dégâts
- Arrêter le développement des dégâts
- Réparer les dégâts
- Protéger l'élément de construction

Figure 5.21
Des objectifs différents conduisent à des mesures différentes

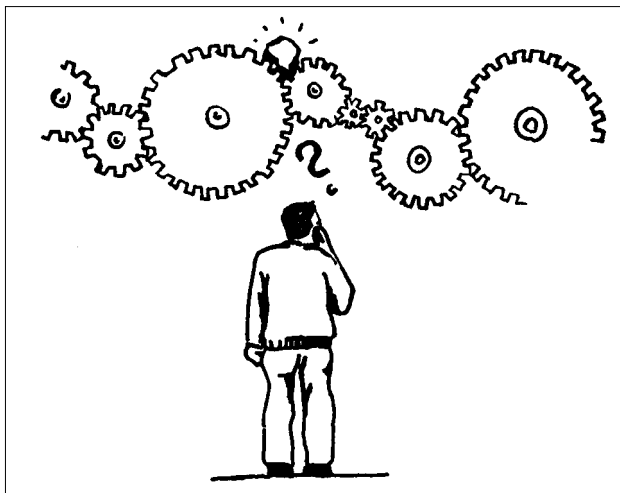


Figure 5.22
L'analyse des données doit permettre d'évaluer l'importance des dégâts, leur mécanisme et leur cause

- Elimination de la cause du dégât
- Protection des surfaces
- Elimination du béton dégradé et reprofilage, ou procédé alternatif
- Mesures complémentaires, par exemple étanchement des fissures

Figure 5.23
Les différentes étapes d'une réfection

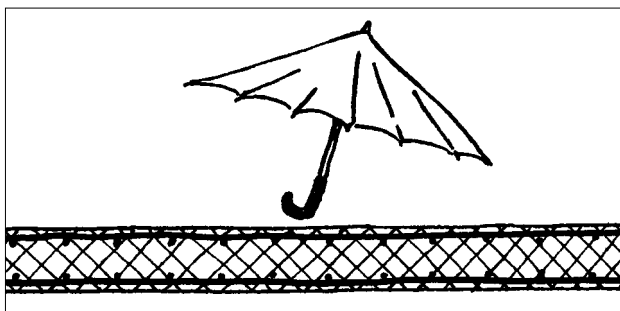


Figure 5.24
Protection des surfaces

5.5 Choix des procédés et des systèmes

5.5.1 Analyse

Dès que les données nécessaires ont été réunies et que l'on a vérifié qu'elles étaient complètes et fiables, les premières étapes de l'évaluation de la réfection peuvent alors être mises en route (fig. 5.25).

L'ingénieur chargé du projet s'occupe, en premier lieu, de l'analyse détaillée de la nature et de l'ampleur des dégâts, il en analyse les mécanismes et en détermine les origines.

5.5.2 Etapes nécessaires pour une réfection

Les étapes qui jalonnent une réfection sont fixées une fois l'ampleur, les mécanismes et les causes des dégâts déterminés, sans que l'on perde de vue l'objectif de la réfection.

Il est recommandé de partir de la mesure de réfection la plus simple, de vérifier si elle permet d'atteindre l'objectif prévu ou si d'autres étapes complémentaires de réfection doivent être envisagées (voir l'organigramme du déroulement à la figure 5.25).

Actions sur les causes des dégâts

Lorsque les dégradations du béton sont décelées suffisamment tôt, il est possible de rétablir la durabilité désirée en agissant sur la cause. Dans la mesure du possible, il faut agir sur les causes, même si cette seule mesure ne permet pas d'atteindre l'objectif; on ne peut certes pas toujours agir sur les causes de manière décisive, comme pour des surfaces destinées à la circulation ou des façades.

Protection des surfaces

Après avoir agi sur la cause des dégradations, l'application d'une protection sur la surface du béton est la mesure de réfection la plus fréquente. Selon le système de protection choisi, la pénétration des matières nocives peut être interrompue et/ou le processus de corrosion influencé de manière que le développement des dégâts soit ralenti ou stoppé. Lorsque les dégradations ne sont pas encore trop avancées, cette mesure suffit parfois à atteindre l'objectif de la réfection.

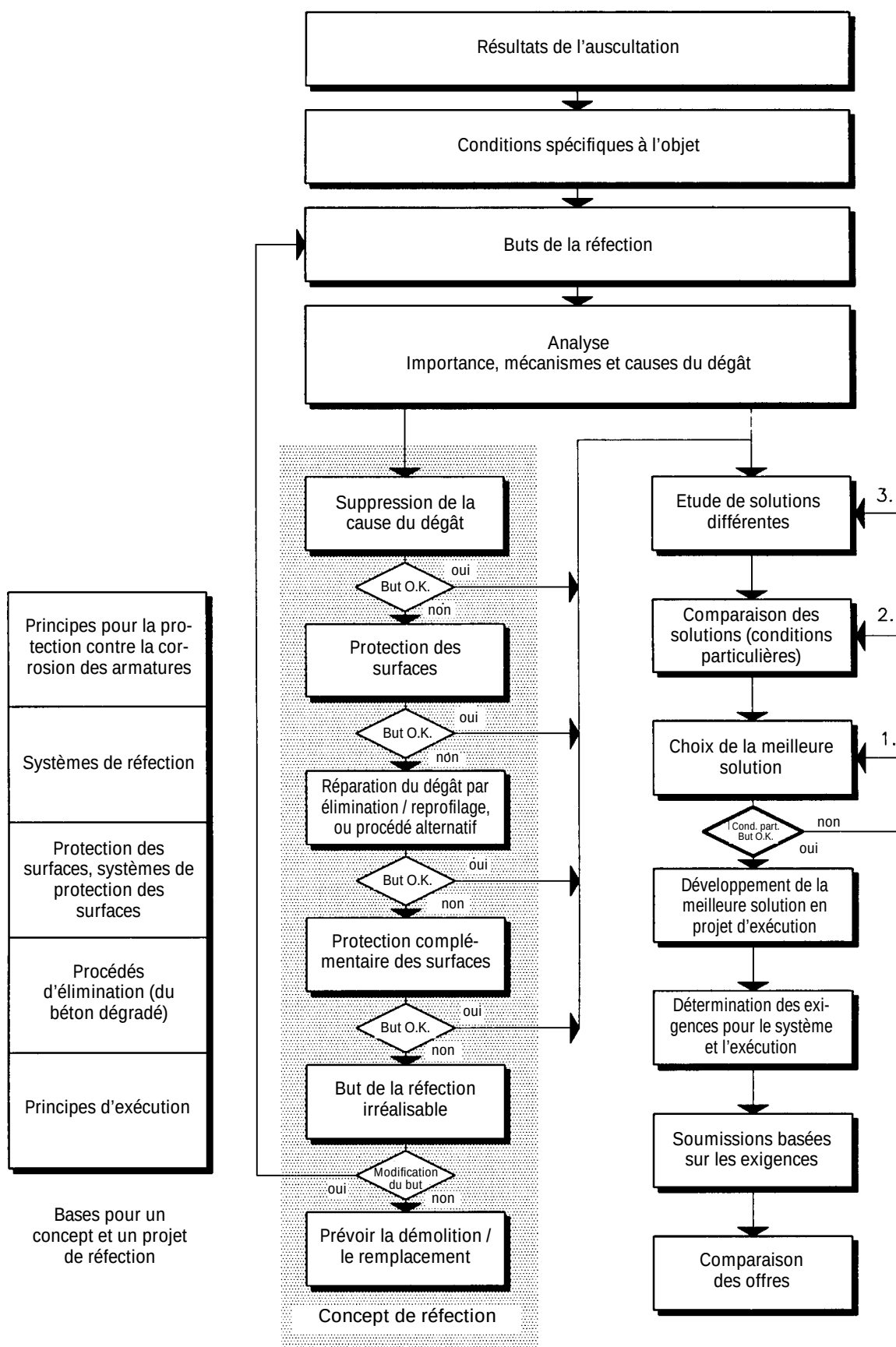


Figure 5.25
Déroulement des études pour le choix et de la mise en soumission de solutions de réparation

La classification systématique selon la directive RiLiDAfStB (6) permet de choisir la protection superficielle optimale en fonction de l'action souhaitée. Les tableaux 5.26 et 5.27 constituent une aide dans ce choix, par un résumé des données sur le mode d'action, les domaines d'application et les caractéristiques des systèmes de protection des surfaces. Ces tableaux ont été établis sur la base des données de la directive RiLiDAfStB (6).

RiLiDAfStB1) ZTV-SIB 90, BMV2)	OS 1 OS-A Imprégnation hydrophobe	OS 2 OS-B Glacis	OS 4 OS-C Enduit	OS 5 OS-D Enduit avec capacité de pontage des fissures limitée3)	OS 9 OS-E élevée4)
Action recherchée					
Réduction de l'absorption d'eau	☐	☒	XX	XX	XX
Réduction de la carbonatation		☒	☒	XX	XX
Réduction de la pénétration des chlorures		X	☒	☒	☒
Pontage des fissures				☒	☒
Aspect (teinte) de la surface		XX	XX	XX	XX

- 1) Directive pour la protection et la réparation d'ouvrages en béton, 1990, DAfStB (6)
(Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen)
- 2) Directives et conditions techniques contractuelles complémentaires pour la protection et la réparation d'ouvrages en béton, 1990, Ministère fédéral des transports (4)
(Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, 1990, Der Bundesminister für Verkehr)
- 3) Fissures proches de la surface, existantes ou susceptibles de se développer par la suite, ouverture maximale 0.15 mm, mouvements du fait des sollicitations thermiques : jusqu'à 0.05 mm
- 4) Fissures proches de la surface et/ou traversantes, existantes ou susceptibles de se développer par la suite, ouverture maximale 0.3 mm, mouvements du fait des sollicitations thermiques : jusqu'à 0.2 mm

X action efficace

XX action très efficace

☐ action prépondérante

Figure 5.26
Action recherchée par les systèmes de protection des surfaces pour les surfaces non carrossables

Domaine d'application	pour surfaces non carrossables					pour surfaces carrossables					sous couches de revêtement	
Système de protection des surfaces N°	1	2	4	5	9	3	6	8 ¹⁾	11	12	7	10
Caractéristiques exigées et certifiées :												
Réduction de l'absorption d'eau	(++)	++	++	++	+++		+++				+++	+++
Réduction de la diffusion de vapeur			++	++								
Réduction de l'absorption des matières nocives dissoutes dans l'eau		++	++	++	+++		+++	+++	+++		+++	+++
Réduction de la diffusion du gaz carbonique		++	+++	+++								
Amélioration de la résistance au gel et aux sels de déverglaçage	(++)						++		++	++		
Pontage des fissures				+	+++				+++			+++
Consolidation du support						++						
Amélioration de la résistance à l'abrasion						+		++		++		
Amélioration de la qualité antidérapante									++			
Amélioration de la stabilité aux produits chimiques							++	++	++			
Stabilité à la chaleur												++ ²⁾
Autres caractéristiques propres aux matériaux ou aux systèmes:												
Réduction de l'absorption d'eau						++		+++	+++			
Réduction de la diffusion de vapeur	0				++	++	év.++	+++	év.++	+++	++	++
Réduction de l'absorption des matières nocives dissoutes dans l'eau	(++)					++	++			+++		
Réduction de la diffusion du gaz carbonique					+++	++	++	+++	+++	+++	++	+++
Amélioration quant à la pénétration de la carbonatation	+											
Amélioration de la résistance au gel		++	++	++	++							
Possibilité de modification de l'aspect visuel et de la coloration		+										
Influence défavorable sur l'aspect	0					+						
Fixation de la poussière						++						
Amélioration de la stabilité aux produits chimiques										++		
Amélioration de la qualité antidérapante										++		
Transmission des efforts de cisaillement												++

0 Pas de modification

+ Actif

++ Fortement actif

+++ Très fortement actif (empêchement)

() Action limitée dans le temps comparée à d'autres systèmes

1) Caractéristiques complémentaires, selon les exigences

2) Pour de courtes durées, jusqu'à 250°C

Figure 5.27

Caractéristiques des systèmes de protection des surfaces selon la directive RiLiDAfStB (6) (voir aussi figures 4.17a à 4.17c)

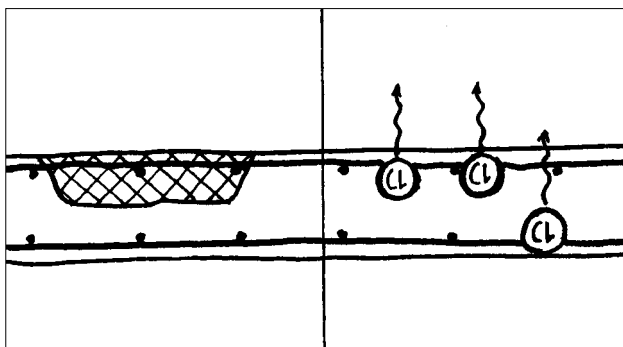


Figure 5.28
Elimination du béton dégradé et reprofilage, procédé alternatif

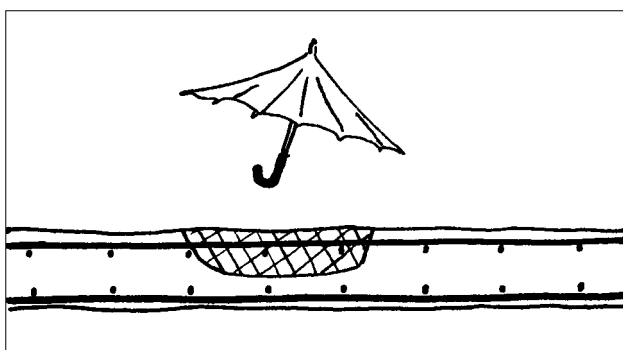


Figure 5.29
Protection complémentaire des surfaces

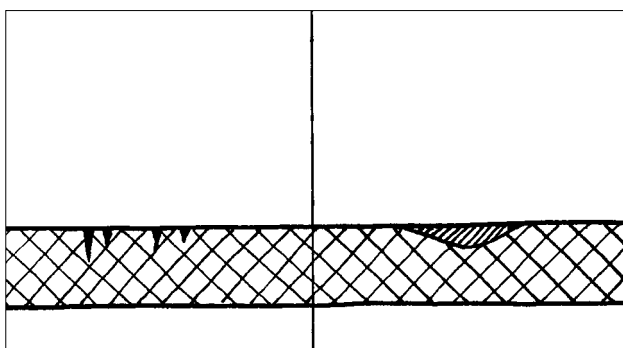


Figure 5.30
Autres mesures

Démolition du béton dégradé/remplacement du béton, procédés alternatifs (réparation des dégâts)

Dans de nombreux cas, les dégradations sont déjà trop développées pour que des mesures de protection des surfaces ou une action sur leur cause suffisent à atteindre l'objectif fixé. En pareille occurrence, une partie du béton sera enlevée et remplacée, ou d'autres mesures doivent assurer au béton ou à l'armature une protection contre le développement ultérieur des dégâts. Les mesures alternatives à la démolition et au remplacement du béton sont la protection cathodique contre la corrosion KKS, l'élimination électrochimique des chlorures ECE, la réalkalinisation électrochimique ER ou la mise en œuvre d'inhibiteurs. Par rapport aux procédés traditionnels, ces systèmes alternatifs présentent l'avantage de permettre le maintien des zones encore intactes du béton et d'éviter le remplacement du béton par un reprofilage qui, dans la plupart des cas, sera de moindre qualité (point faible: liaison du reprofilage avec l'ancien béton). Dans chaque cas particulier, il faut analyser les avantages et les inconvénients des différentes solutions.

Lorsque l'armature est déjà fortement endommagée et que la sécurité structurale de l'ouvrage est diminuée, il faut alors remplacer cette armature ou prévoir un autre type de renforcement.

Protection complémentaire des surfaces

Dans de nombreux cas, après la réparation des dégâts par démolition et remplacement du béton, une protection supplémentaire de la surface du béton intervient afin d'éviter de nouvelles dégradations à long terme.

Autres mesures

Pour garantir la durabilité de la réfection et atteindre ainsi les objectifs fixés, d'autres mesures peuvent s'avérer nécessaires, telles que l'étanchéification de fissures, la réparation de zones localement dégradées ou délitées sous l'action des sels de déverglaçage, le colmatage de surfaces poreuses, etc. Ces mesures ne sont pas traitées en détail dans le présent manuel (se reporter à la directive RiLiDAfStB 6, partie 2, «Colmatage des fissures»).

5.5.3 Variantes de réparation

Lorsque les différentes étapes d'une réparation sont fixées, selon les considérations du chapitre précédent, il reste normalement à étudier les différentes variantes en fonction d'une solution de base retenue. Ces variantes se différencieront par les principes de réparation appliqués, par les procédés choisis pour l'élimination des dégradations (démolition et remplacement du béton ou procédés alternatifs), par les procédés de réparation du béton ou par les différentes étapes du système de protection des surfaces. La figure 5.31 propose une présentation globale des variantes possibles pour un problème spécifique de réparation.

Solution de réparation	1a*	1b**	2a*	2b**	3a*	3b**	4
Phase du travail	Mortier modifié par adjonction de matières synthétiques / enduit épais		Couches d'usures de mortier projeté / enduit mince		Mortier / carreaux de céramique collés		KKS / Enduit mince ou carreaux de céramique
Préparation du support							
- Décapage de la peinture existante	x	x	x	x	x	x	x
- Élimination du béton dégradé	x	(x) ²⁾	x	(x) ²⁾	x	(x) ²⁾	(x) ²⁾
- Déminéralisation ¹⁾		x		x		x	
- Dérouillage des aciers là où cela est nécessaire	x		x		x		
- Etanchement des fissures permettant le passage d'eau	x	x	x	x	x	x	x
Remplacement du béton							
- Projection de sable			x	x			
- Pont d'accrochage	(x)	(x)			(x)	(x)	
- Reprofilage (y compris couche supplémentaire de béton)	x		x		x		
- Doublage		x		x		x	
Revêtement de protection					x ³⁾	x ³⁾	x ⁴⁾
- Lissage de remplissage des pores et des vides	(x)	(x)					
- Lissage (revêtement)	x	x					
- (Couche de fond)	(x)	(x)					
- Peinture	x	x	x	x			

* Solution de réparation avec élimination du béton dégradé / reprofilage

** Solution de réparation avec déminéralisation électrochimique

1) Là où la teneur en chlorures du béton (à proximité de l'armature) dépasse la valeur critique, le béton contaminé par les chlorures doit être démolé, ou les chlorures doivent être éliminés par un moyen électrochimique

2) Les éclats et les zones non adhérentes doivent être améliorés

3) Carreaux de céramique

4) Installation du système KKS (anode enrobée avec environ 3 cm de béton projeté sur lequel on applique un enduit mince (peinture) ou un revêtement en carreaux de céramique)

Figure 5.31

Exemples de solutions de réparation différentes et des phases de travail correspondantes (voir aussi figure 5.32)

Solution de réparation	1a*	1b**	2a*	2b**	3a*	3b**	4a	4b
Critères d'appréciation	Mortier modifié par adjonction de matières synthétiques / enduit épais		Couches d'usures de mortier projeté / enduit mince	Couches d'usures de mortier projeté / enduit mince	Mortier / carreaux de céramique collés		KKS / enduit mince	KKS / revêtement en carreaux de céramique
Exécution								
Pontage des fissures	++	++	+	+	++	++	+	++
Réservations (possibilité d'adaptation)	++	++	++	++	+	+	++	+
Risques d'exécution	0	-	0	-	+	0	+	+
Exigences pour le support	+	+	+	+	+	+	+	+
Action sur le matériau existant	-	+	-	+	-	+	++	++
Compatibilité avec l'environnement	+	+	+	+	+	+	+	+
Coûts	+	0	++	+	+	0	+	0
Sommes	6	6	6	6	6	6	9	8
Exploitation / entretien								
Travaux d'entretien	0		0		0		-	-
Possibilité de nettoyage	+		+		++		+	++
Possibilité de réparations	+		+		++		+	++
Coût des réparations	++		++		+		++	+
Sommes	4		4		5		3	4
Durabilité / surveillance								
Vieillesse / durée de vie	+	+	0	0	++	++	++	++
Risque résiduel de corrosion	0	+	-	0	0	+	++	++
Inspection de l'ouvrage	+	+	+	+	-	-	++	++
Comportement de l'ouvrage (physique de la construction)	+	+	+	+	0	0	+	0
Sommes	3	4	1	2	1	2	7	6
Totaux	13	14	11	12	12	13	19	18
Expériences / références	quelques-unes		nombreuses		peu nombreuses		peu nombreuses	

* Solution de réparation avec élimination du béton dégradé / reprofilage

** Solution de réparation avec déminéralisation électrochimique

Appréciation : ++ favorable + moyen 0 neutre - défavorable

Figure 5.32

Comparaison des avantages et des inconvénients de différentes solutions de réparation, avec évaluation de divers critères d'appréciation (même exemple que figure 5.31)

Les solutions étudiées divergeront cependant sur certains points, présentant ici ou là des avantages ou des inconvénients. La comparaison des diverses variantes de réfection peut faire l'objet d'un tableau comme celui présenté à la figure 5.32.

5.5.4 Choix de la meilleure variante

Après comparaison des diverses variantes de réfection et compte tenu de toutes les autres conditions spécifiques, y compris les coûts, les délais, etc., il est alors possible de choisir et de proposer la meilleure variante pour l'exécution. Il sera souvent justifié de poursuivre l'étude des variantes techniquement valables jusqu'au stade de la soumission, et de ne prendre une décision que sur la base des offres présentées.

Avant de commencer la phase préparatoire à l'exécution dans la direction choisie, il est encore recommandé de vérifier que la meilleure variante satisfait bien à toutes les conditions données et qu'elle permet d'atteindre l'objectif de la réfection.

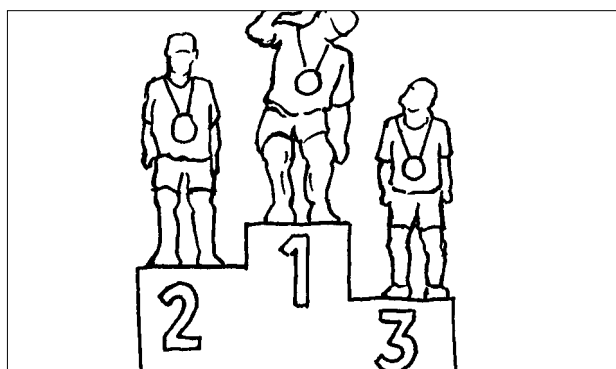


Figure 5.33
Choix de la ou des meilleure(s) solution(s)

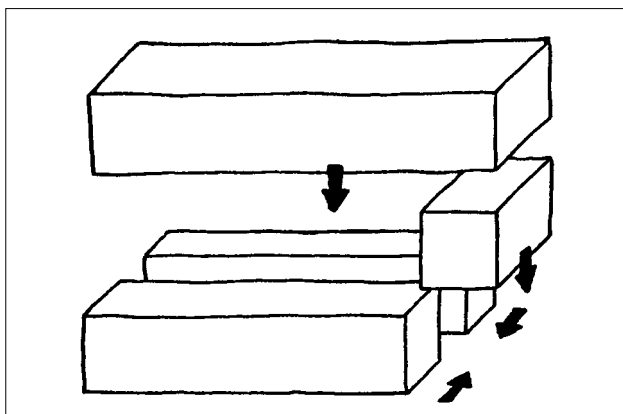


Figure 5.34
Les produits utilisés doivent être compatibles

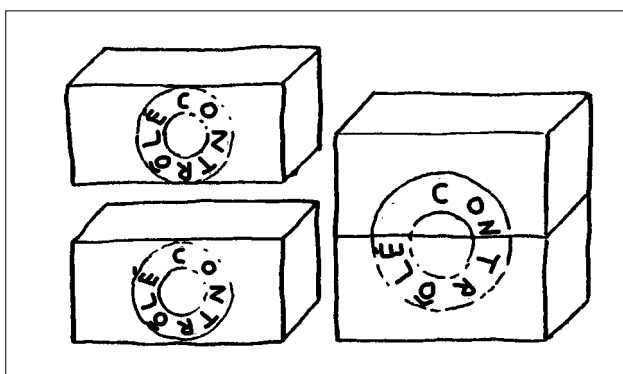


Figure 5.35
Les produits doivent satisfaire aux exigences fixées, aussi bien en tant que produits isolés que dans le cadre du système global

5.6 Choix des produits

5.6.1 Introduction

Les matériaux entrant dans la solution de réfection retenue seront choisis au plus tôt selon divers critères. Dans la plupart des cas il y a l'embarras du choix entre différents produits et plusieurs fournisseurs. Les matériaux proposés se distinguent par leurs caractéristiques, leurs prix, l'assistance technique, etc. Par ailleurs, certaines entreprises travaillent de préférence avec un fournisseur de leur choix.

Pour ces raisons, qui limitent au minimum la concurrence entre les entreprises, le choix des produits devrait être laissé aux entreprises soumissionnaires et les soumissions ne s'orienter que sur la prescription des exigences requises pour les produits. Il existe cependant des raisons (essais préliminaires déjà exécutés, bonnes expériences avec un produit donné, etc.) qui peuvent amener à exiger un produit ou un matériau déterminé dans la soumission des travaux à exécuter.

L'important est de s'assurer que les matériaux impliqués n'ont pas d'actions négatives les uns sur les autres, qu'ils sont au contraire compatibles entre eux (fig. 5.34). On appliquera de préférence une gamme de matériaux constituant un système global cohérent. Les matériaux seront testés non seulement pour leurs caractéristiques fondamentales en tant que produits isolés, mais également dans le cadre du système global (fig. 5.35). Ils doivent être soumis à la surveillance du producteur ou du fournisseur et, le cas échéant, à des contrôles extérieurs. Les matériaux produits en Suisse sont souvent contrôlés par le LFEM ou par des laboratoires d'essais privés. Ces instituts ont développé des méthodes d'essais et défini des exigences, particulièrement pour le remplacement du béton et les systèmes de protection des surfaces. Les matériaux produits en Allemagne sont actuellement contrôlés selon les directives ZTV-SIB (4) ou RiLiDAfStB (6) parues en 1990. L'application de ces essais et de ces exigences étant relativement récente, les expériences faites à ce sujet sont actuellement encore limitées. Ce qui explique pourquoi ces essais ne se sont pas encore généralisés.

Il n'est pas possible de donner de recommandation de choix entre ces deux types de mise en soumission. Celui-ci dépend pour beaucoup des conditions

particulières de l'ouvrage. On peut simplement dire que, pour des travaux importants qui laissent le champ libre à la mise en place de mesures de surveillance et d'essais, il sera toujours recommandé de prévoir une soumission basée sur le respect des exigences requises.

5.6.2 Soumissions orientées sur les exigences

Dans la procédure courante, les soumissions des travaux de réfection ont à définir les exigences requises pour la solution de réfection retenue ainsi que conditions annexes. Les exigences à atteindre seront quantifiées en vue du contrôle de l'exécution. Les essais prévus seront notifiés dans la soumission, y compris leur fréquence, les valeurs limites à atteindre ainsi que la procédure prévue lorsque ces valeurs ne sont pas atteintes. Dans des cas particuliers, l'entreprise peut être sollicitée pour une proposition de programme d'essai. Dans tous les cas, il faut prévoir que l'entreprise fournisse, sur demande, des attestations d'essais pour les produits isolés ainsi que pour le système global.

Lors de l'appréciation des offres présentées, on vérifiera que les produits proposés satisfont aux exigences fixées. Si nécessaire, on demandera à l'entreprise des procès-verbaux d'essais ou, le cas échéant, on exigera les essais indispensables.

Une soumission orientée sur les exigences permet à l'entreprise de valoriser son expérience à travers son offre, et de parvenir ainsi à une solution intéressante du point de vue économique (fig. 5.36). Par ailleurs, il existe le risque que des problèmes surgissent lors de l'exécution, problèmes qui peuvent mettre en péril le respect des exigences fixées.

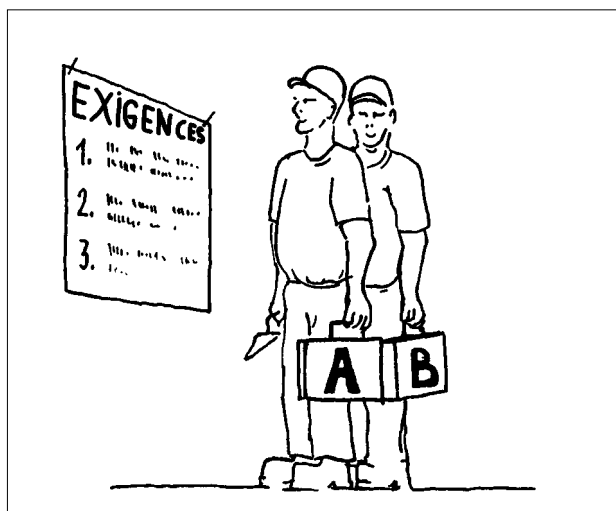


Figure 5.36
Une soumission orientée sur les exigences laisse plus de liberté à l'entreprise soumissionnaire pour l'élaboration de son offre

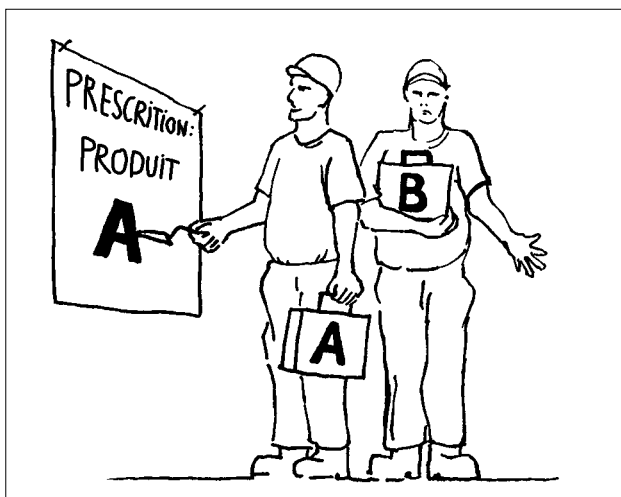


Figure 5.37
Lorsque les produits sont prescrits, la concurrence entre les soumissionnaires est réduite; le maître de l'ouvrage assume alors une part plus importante des risques d'exécution

5.6.3 Prescription des produits

Diverses raisons peuvent amener le maître de l'ouvrage à prescrire un produit spécifique dans la soumission. De ce fait, les possibilités de l'entreprise pour l'étude de son offre seront limitées (fig.5.37). Certaines entreprises seront contraintes de collaborer avec un fournisseur qui leur sera moins bien connu, et de recourir à des matériaux dont elles ont peu ou pas d'expérience. C'est là un risque complémentaire de l'exécution qui doit, partiellement au moins, être imputé au maître de l'ouvrage. Il sera évalué par rapport aux avantages liés à la prescription des produits.

La prescription des produits crée des problèmes en particulier lorsqu'une entreprise propose une variante plus avantageuse avec des produits autres que ceux prescrits. C'est pourquoi il est important, même avec ce système de prescription, de bien définir les exigences et les autres conditions annexes, ainsi que les contrôles d'exécution prévus. On doit exiger de l'entreprise qu'elle fournisse la preuve que les matériaux ou le système proposé pour la variante possèdent effectivement les caractéristiques exigées.

6. Exécution

6.1	Indications pour les soumissions	103
-----	----------------------------------	-----

6.2	Essais préalables	104
-----	-------------------	-----

6.3	Démolition	105
6.3.1	Exigences pour le support	105
6.3.2	Procédés de démolition	106
6.3.3	Vue d'ensemble des procédés de démolition	109
6.3.4	Avantages et désavantages des procédés par projection	111

6.4	Préparation du support	112
6.4.1	Couche d'accrochage	112
6.4.2	Humidification préalable	112

6.5	Traitement de cure	113
-----	--------------------	-----

6.6	Contrôles de la qualité	114
6.6.1	Introduction	114
6.6.2	Essais de base, essais de certification	114
6.6.3	Essais pendant l'exécution	115

6.7	Dossier de l'ouvrage	116
-----	----------------------	-----

6. Exécution

6.1 Indications pour les soumissions

Pour la mise en soumission de mesures de réfection de béton et de protection des surfaces des constructions en béton, on se référera au chapitre 131 du «Catalogue des articles normalisés CAN 2000». On doit cependant être conscient que le développement des techniques évolue très rapidement dans le domaine de la réfection du béton, l'auteur d'une soumission fera donc un examen critique des articles normalisés. Au chapitre 5.6 «Choix des produits», nous avons abordé les aspects spécifiques d'une soumission sous l'angle des exigences (définition des exigences) des produits (prescriptions des produits). Ces données ne sont donc pas reprises dans le présent chapitre.

Les bases de soumission comporteront tous les documents nécessaires (fig. 6.1) à l'entreprise pour établir une offre correcte. Lors de travaux de réfection, les conditions spécifiques à l'objet prennent une signification toute particulière, car l'utilisation et l'exploitation de l'ouvrage, ainsi que le volume bâti existant, ont une influence déterminante sur les travaux. Dans de tels cas, il ne faut pas uniquement définir le déroulement prévu des travaux, mais décrire aussi les autres conditions telles que le maintien de la circulation pendant la durée du chantier, les possibilités de fermeture de la circulation, les périodes pendant lesquelles le travail est possible, les prescriptions spéciales relatives aux pollutions admissibles, les données relatives à la protection de l'environnement, etc. De même, l'entrepreneur doit disposer de toutes les informations relatives aux objectifs de la réfection, aux exigences fixées pour les produits, les systèmes et l'exécution, au système retenu pour les contrôles avec des valeurs limites quantifiées, ainsi que la marche à suivre lorsque ces dernières ne sont pas atteintes. Les données sur l'état existant de l'ouvrage préciseront les limites de fiabilité des résultats obtenus par auscultation. Les documents de soumission contiendront toutes les données habituelles, telles que les libellés des positions avec leurs avant-métrés, le cas échéant les produits prescrits et les modes de métrés prévus.

Les documents de soumission sont considérés complets lorsqu'ils contiennent toutes les informations nécessaires à l'entrepreneur pour établir une offre exacte et, le cas échéant, proposer une variante d'entreprise. L'auteur de la soumission

vérifie que les données sont complètes et que l'examen des variantes d'entreprises est possible.

Attention: le descriptif des prestations fournies par l'entreprise comprendra également tous les travaux annexes, tels que les travaux de couverture, les raccords de ferblanterie, les joints, les moyens de fixation, les échafaudages spéciaux (pour le béton projeté par exemple), l'élimination des déchets, la protection d'autres éléments de la construction, etc.

Conditions générales
Conditions liées à l'objet
Objectifs de la réfection
Données sur l'état existant
Description des travaux
Déroulement des travaux de réfection prévus
Circulation, utilisation et exploitation pendant la durée des travaux
Périodes de fermetures, horaires de travail
Exigences pour les produits, les systèmes et l'exécution
Exigences relatives à la protection de l'environnement
Essais préalables
Plan de contrôles avec les valeurs limites exigées
Documents et certificats à produire
Liste des prestations
Devis descriptif avec avant-métrés
Plans

Figure 6.1
Mots-clés des principaux éléments des documents de soumission

6.2 Essais préalables

Il est souvent nécessaire, pour définir des mesures de réfection, de procéder à des essais préalables pour résoudre certains problèmes particuliers. Ces essais se justifient en raison des matériaux qui composent l'objet, de leur combinaison et de la situation locale, toutes conditions exerçant une influence prépondérante dans l'élaboration d'une soumission. Ainsi des essais préalables sont indiqués pour déterminer le meilleur procédé de démolition, les conditions de travail en présence de circulation, le bon choix d'une méthode de travail, etc.

Des essais préalables peuvent avoir lieu avant la mise en soumission ou avant le début des travaux. Dans les deux cas il est indispensable de prescrire un délai et qu'il soit déjà pris en considération dans le programme des travaux (fig. 6.2). La réalisation des essais avant la mise en soumission présente l'avantage de mettre à disposition des entreprises leurs résultats. S'ils ont lieu après la soumission, on ne dispose pas, au moment de l'examen des offres, de tous les éléments nécessaires pour leur appréciation. Il en résulte parfois des problèmes désagréables en cours d'exécution. Lorsqu'on a renoncé aux essais préalables et que les travaux tiennent lieu d'essais préliminaires, des problèmes encore plus désagréables peuvent survenir: inadéquation d'un procédé prévu et son remplacement, avec les pertes de temps et les frais supplémentaires que cela entraîne.

Des essais préalables seront préparés et exécutés avec des objectifs précis. Dans une première étape, un concept global précise les objectifs de ces essais – qui ne permettent pas de répondre à toutes les questions (par exemple durabilité). Les paramètres déterminants seront relevés pendant l'exécution des essais, afin de les mettre en valeur.

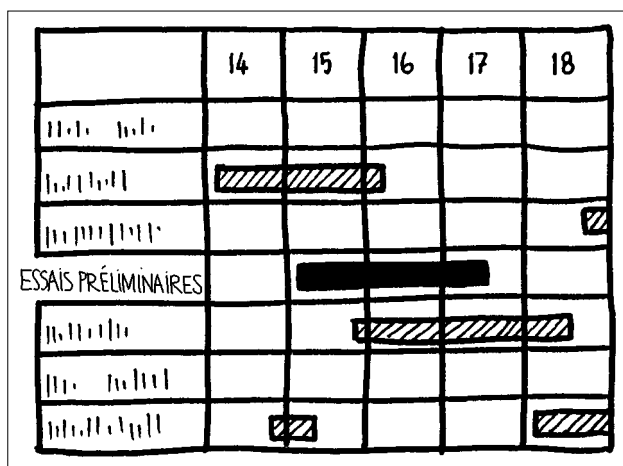


Figure 6.2
Les essais préalables envisagés doivent impérativement être pris en considération dans l'établissement du programme général

6.3 Démolition

6.3.1 Exigences pour le support

Les procédés de démolition servent en général à préparer la surface du béton existant en vue de l'application d'une mesure de réfection. Au cours de cette opération, il s'agit parfois d'éliminer des matériaux étrangers (anciens revêtements) ou des couches de béton qui ne satisfont plus aux exigences relatives à la solidité (par exemple résistance à la traction) ou aux caractéristiques chimiques (béton carbonaté ou contaminé par les chlorures) (fig. 6.3). Au cours de l'application d'une mesure de réfection, d'autres exigences sont également fixées qui varient principalement en fonction des matériaux à appliquer et leur objectif est d'assurer une adhérence suffisante et durable des nouvelles couches à appliquer (fig. 6.3).

Résistances

- Résistance à la traction suffisante de la surface
- Eventuellement exigences relatives à la résistance à la compression et au module d'élasticité E

Caractéristiques chimiques

- Exigences relatives à la profondeur de carbonatation et à la teneur en chlorures correspondantes au principe de réfection choisi

Surfaces et texture

- libres de parties non adhérentes et désagrégées, ainsi que de matériaux se détachant facilement
- libres de zones non adhérentes proches de la surface et de fissures parallèles à la surface
- libres d'arêtes vives
- rugosité adaptée aux matériaux à appliquer (pour le maintien de l'épaisseur de la couche spécifique au système)
- libres de produits étrangers

Humidité du béton

- Humidité avant l'application de la nouvelle couche adaptée aux matériaux à appliquer

Température

- Température limite déterminée en fonction des matériaux à appliquer

Figure 6.3
Exigences générales pour le support en vue de l'application d'une mesure de réfection (voir aussi chapitre 1 dans (6) partie 2, planification et exécution)



Figure 6.4
Projection de sable et d'eau, pas de formation de poussière, l'eau s'écoule à la surface du béton



Figure 6.5
Projection de sable humide, pas de formation de poussière, la surface du béton n'est que légèrement humidifiée

6.3.2 Procédés de démolition

Les procédés de démolition servent à éliminer les anciens revêtements ou peintures, le béton de moindre valeur ou contaminé, ou à mettre à nu les armatures corrodées. Aujourd'hui un grand nombre de méthodes et d'outils différents sont à disposition. Il faut différencier les méthodes de démolition des méthodes de nettoyage.

La démolition se fait d'ordinaire mécaniquement, thermiquement ou chimiquement. Pour la réfection du béton (préparation du support), les méthodes les plus fréquemment utilisées sont les procédés mécaniques que l'on va examiner plus en détail. Les procédés thermiques et chimiques seront résumés aux figures 6.10 et 6.11.

Pour la démolition mécanique (fig. 6.9), on rencontre aujourd'hui au premier plan les procédés par projection. Les techniques de démolition au ciseau, à la masse, à la ponceuse ou à la brosse sont en voie d'abandon, car ils peuvent endommager gravement le béton et l'armature. Les procédés par projection ont été continuellement développés au cours des dernières années, et ils ont actuellement atteint un haut niveau technique susceptible d'amélioration. La figure 6.12 résume les procédés par projection.

Les procédés par projection sont classés en fonction des appareils de projection et des matériaux projetés, en appareils à air comprimé avec matériaux de projection solides (jet de sable), projection d'un mélange de matériaux solides et d'eau (sable et eau ou sable humide), jet d'eau à haute ou à très haute pression et projection de grenaille (projection de billes).

Décapage par projection de sable

Avec les procédés par jet de sable, la surface peut être décapée très proprement jusqu'à quelques millimètres de profondeur. Ils s'appliquent également très bien au nettoyage des armatures. La capacité de décapage et la profondeur possible de démolition varient avec le support, le matériau projeté et la pression. Comme matériau de projection, on utilise entre autres du sable, des gravillons, du corindon et des scories métalliques. Le sable de quartz ne doit pas être utilisé pour des raisons d'hygiène du travail. Des problèmes surgissent principalement en raison du grand dégagement de poussière et de l'élimination du matériau de projection qui se mélange au matériau démolé. Un traitement com-

plémentaire du support se révèle nécessaire, par un nettoyage de la poussière à l'eau ou à l'air comprimé sec (exempt d'huile).

Des méthodes avec adjonction d'eau ont été développées pour éviter les dégagements de poussière.

Projection de sable et d'eau

Le procédé par projection de sable et d'eau consiste à remplacer le sable sec par un mélange de sable et d'eau. L'eau empêche les dégagements de poussière. Selon les cas, les quantités relativement importantes de boues qui en résultent nécessitent un traitement spécial.

Projection de sable humide

Comme pour les procédés précédents, c'est l'air comprimé qui est utilisé pour la projection du sable humide. Selon les appareils, l'eau est introduite en petites quantités, soit à la buse, soit juste avant la buse. La légère humidification suffit à empêcher la formation de poussière, supprimant les problèmes dus aux poussières et aux boues, avec les avantages complémentaires d'une économie d'environ 60% du matériau projeté et un réglage plus facile de la pression, de l'eau et de la quantité de sable projeté. Le traitement complémentaire nécessaire de la surface consiste en un nettoyage à l'eau sous pression (150 bars), achevé par un séchage pour éviter la formation de rouille sur les armatures.

Jet d'eau à haute ou à très haute pression

Dans les procédés par jet d'eau à haute ou à très haute pression (fig. 6.6 et 6.7), on travaille à la buse avec une pression d'environ (600) 750 à 1000 ou 1000 à 2500 bars. Plus la pression est élevée, plus la quantité d'eau utilisée est faible. La capacité de démolition est fonction de la pression, du débit d'eau, de la buse, de la distance de la buse à la surface du béton et de la durée de la projection. Ces procédés sont indiqués en particulier pour des démolitions profondes du béton et pour la mise à nu et le nettoyage des armatures. Ils présentent l'inconvénient de soumettre les appareils à des sollicitations très élevées (frais d'entretien élevés, risques de pannes) et d'exiger relativement beaucoup de place. Ces travaux sont très bruyants. Ajoutons que l'eau seule ne permet pas d'obtenir une rugosité fine mais une rugosité grossière, suffisante néanmoins pour l'application d'un béton ou d'un mortier projeté (fig. 6.8). Attendu que les jets d'eau à haute ou à très haute pression exercent des forces importantes sur la buse, ces travaux sont souvent exécutés par des robots. Cette méthode est



Figure 6.6
Jet d'eau à très haute pression, 2'500 bars, exécution avec lance manuelle



Figure 6.7
Jet d'eau à haute pression, 1'000 bars, exécution par un robot

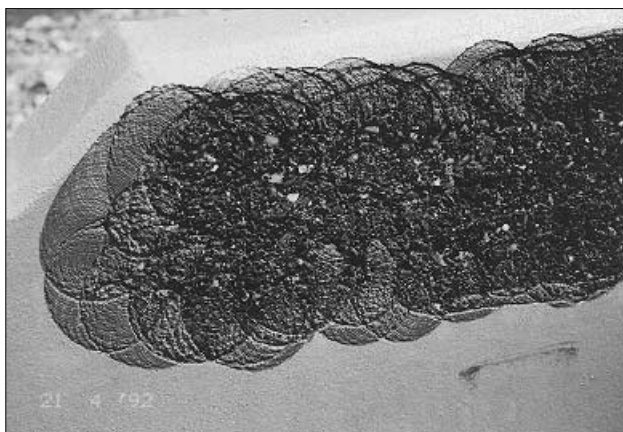


Figure 6.8
Surface du béton décapée au jet d'eau à très haute pression (lance manuelle, pression de 2'500 bars)

très rationnelle, mais elle comporte le désavantage qu'il est difficile de réagir lors de démolition inappropriée (p. ex. trop profonde). Le traitement minimum complémentaire de la surface est un nettoyage à l'eau sous pression, suivi d'un séchage. Dans certains cas, la rugosité fine doit être améliorée par un sablage.

Des études récentes ont montré que les jets d'eau à haute et à très haute pression provoquaient une certaine désagrégation des couches de béton proches de la surface, avec diminution de l'adhérence dans le support en béton (3). L'Association suisse pour l'application de l'hydrodynamique dans le bâtiment a entrepris ses propres recherches sur ce problème, mais les résultats ne sont pas encore disponibles. L'utilisation de robots a endommagé des gaines de câbles de précontrainte, le réglage de la profondeur de démolition ne pouvant pas être modifié en cours de travail.

Projection de grenaille

Dans le cas de projection de grenaille, à la place d'air comprimé ou d'eau sous pression, c'est une centrifugeuse qui projette le matériau sur le béton. Ce type d'outillage est approprié pour des surfaces horizontales, mais de petits appareils existent également pour les surfaces verticales. Le matériau de projection (billes d'acier ou matériau de projection anguleux) est séparé des matières démolies et recyclé. Le travail par projection de grenaille ne fait pratiquement pas de poussière.

6.3.3 Vue d'ensemble des procédés d'élimination du béton dégradé

Type	Procédés		Application	Remarques
	Outillage, machine, appareil			
Piquage	Ciseau, burin		B, D	Ebranlements et bruit; dommages au béton et aux armatures; traitement complémentaire à l'air comprimé ou par projection
Percussion	Outil à percussion		B	Idem ci-dessus
	Marteau piqueur		D	Problèmes de bruit et de poussière; traitement complémentaire à l'air comprimé
	Fraiseuse		A, B	Démolition jusqu'à 8 mm de profondeur; ébranlement et poussière; non adéquat pour la mise à nu des armatures. Traitement complémentaire par projection ou par aspiration
Meulage	Meule		A	Jusqu'à 2 mm de profondeur; émissions de bruit et de poussière; traitement complémentaire à l'air comprimé
Projection de billes	Centrifugeuse		A	Le matériau de projection est recyclé et projeté quasiment sans poussière sur les surfaces planes; convient en particulier pour les surfaces horizontales
Projection de sable	Machine de projection		A, B, D	Bonne préparation de la surface, jusqu'à quelques mm de profondeur; provoque beaucoup de poussière
Projection de sable humide	Machine de projection		A, B, D	Bonne préparation de la surface, jusqu'à quelques mm de profondeur; ne provoque que peu de poussière; nettoyage ultérieur nécessaire
Projection de sable et d'eau	Machine de projection		A, B, D	Démolition jusqu'à quelques mm de profondeur; nettoyage ultérieur au jet d'eau sous pression; évacuation de l'eau et des boues
Jet d'eau à haute ou à très haute pression (hydrodémolition)	Machine de projection		A, B, D	Pression à la buse entre 600 et 1000 ou entre 1000 et 2500 bars; démolition jusqu'à quelques cm; nettoyage ultérieur au jet d'eau sous pression; évacuation de l'eau et des boues
Brossage	Brosse (manuelle ou mécanique)		(A)	N'agit qu'en surface; provoque de la poussière; nettoyage complémentaire à l'air comprimé

A : Enlèvement de couches de moindre résistance, d'anciens revêtements, de traitements ultérieurs ayant formé une pellicule, de salissures

B : Elimination du béton dégradé et mise à nu des armatures

D : Intervention sur des défauts bien délimités

Figure 6.9

Procédés mécaniques pour le traitement des surfaces de béton et pour l'élimination du béton dégradé, référence : (6)
(Procédés par projection, voir aussi figure 6.12)

Type	Procédés Outillage, machine, appareil	Application	Remarques
Jets de flammes	Brûleur	A,B	Démolition jusqu'à quelques mm; la structure du béton est endommagée; risques de surchauffe du béton et des armatures; traitement complémentaire par projection de sable pour éliminer les parties décollées
Exposition aux rayons infrarouges	Emetteur de rayons infrarouges	C	Pour les traitements préliminaires ou ultérieurs (réchauffement, séchage)
Exposition à l'air chaud	Föhn, soufflerie d'air chaud	C	Pour les traitements préliminaires ou ultérieurs (réchauffement, séchage)

- A : Enlèvement de couches de moindre résistance, d'anciens revêtements, de traitements ultérieurs ayant formé une pellicule, de salissures
 B : Elimination du béton dégradé et mise à nu des armatures
 C : Traitement de salissures non adhérentes et élimination de films d'eau

Figure 6.10

Procédés thermiques pour le traitement des surfaces de béton, référence : (6)

Type	Procédés Outillage, machine, appareil	Application	Remarques
Projection d'eau chaude ou de vapeur	Appareil de projection	C	En général avec adjonction de produits agissant sur la tension superficielle
Traitement par des produits chimiques		A	Examiner la compatibilité avec les caractéristiques de l'ouvrage et les exigences de la protection de l'environnement; les résidus doivent être éliminés; nettoyage complémentaire à l'eau

- A : Enlèvement de couches de moindre résistance, d'anciens revêtements, de traitements ultérieurs ayant formé une pellicule, de salissures
 C : Traitement de salissures non adhérentes et élimination de films d'eau

Figure 6.11

Procédés chimiques pour le traitement des surfaces de béton, référence : (6)

6.3.4 Avantages et inconvénients des procédés par projection

	Avantages	Inconvénients
Projection de sable (pour le nettoyage et le décapage superficiel) Rendement 10-20 m ² /h	Largement répandu Méthode de dérouillage pour les aciers d'armature Bonne rugosité fine Pas de nécessité d'eau	Provoque beaucoup de poussière Rebut du matériau de projection Action problématique sur les peintures élastiques Nettoyage ultérieur nécessaire
Projection d'eau et de sable (pour le nettoyage et le décapage superficiel) Rendement 8-15 m ² /h	Presque pas de poussière N'endommage pas le support en béton Bonne rugosité fine	Elimination de l'eau et des boues Nettoyage et éventuellement séchage ultérieurs nécessaires
Projection de sable humide (pour le nettoyage et le décapage superficiel) Rendement 8-12 m ² /h	Provoque peu de poussière et écoulement d'eau réduit Moindre consommation du matériau de projection par rapport à la projection de sable	Ne permet que les démolitions superficielles Nettoyage et éventuellement séchage ultérieurs nécessaires
Jet d'eau à haute pression (environ (600) 750-1000 bars) (en général pour les démolitions) Rendement 6-12 m ² /h en cas d'exécution à la machine et pour une profondeur de démolition de 2-3 cm	Ne provoque pas de poussière Démolition sélective des zones dégradées Bonne rugosité du support	Désagréation possible des zones proches de la surface (diminution de l'adhérence) Elimination de l'eau et des boues Impossibilité de régler la profondeur de démolition en cours de travail en cas d'utilisation de robots Nettoyage ultérieur nécessaire Forte usure des machines (pannes, entretien)
Jet d'eau à très haute pression (environ 1000 à 2500 bars) (pour les démolitions) Rendement jusqu'à 2 m ² /h pour exécution manuelle et profondeur de démolition de 2-3 cm	Permet d'atteindre des couches profondes Bon rendement pour des démolitions de couches épaisses et pour la mise à nu des armatures Bonne précision en cas d'exécution manuelle Bonne rugosité du support	Provoque beaucoup de bruit et de projections de particules de béton; exige de ce fait d'importantes mesures de protection Risques de démolitions trop profondes en cas d'utilisation de buses non rotatives ou non oscillantes Désagréation possible des zones proches de la surface (diminution de l'adhérence) Elimination de l'eau et des boues Nettoyage ultérieur nécessaire Danger potentiel en relation avec les très hautes pressions Très forte usure des machines (pannes, entretien)
Projection de billes Rendement environ 50 m ² /h pour démolition de surfaces importantes	Ne provoque pas de poussière Exécution à la machine Recyclage du matériau de projection	Mise en oeuvre essentiellement sur surfaces horizontales, moins bien adapté pour des surfaces inclinées et inapplicable de dessous

Figure 6.12

Vue d'ensemble des procédés par projection actuellement à disposition pour le traitement des surfaces en béton et pour l'élimination du béton dégradé

6.4 Préparation du support

6.4.1 Couche d'accrochage

Dans les travaux de réfection, on recourt assez souvent aux couches d'accrochage. Ce sont des couches de fond à base de ciment ou de matières synthétiques – résine époxy – qui doivent améliorer l'adhérence entre le support et la couche suivante. Elles pénètrent dans les pores du support et sont recouvertes d'une nouvelle couche (mortier de réfection) alors qu'elles sont généralement encore fraîches. Il en résulte un délai de travail relativement limité, ce qui est un inconvénient et peut présenter certains risques.

En raison des exigences élevées de leur application, les composants d'une couche d'accrochage sont livrés en doses prêtes au mélange. Les conditions d'application du fabricant doivent être strictement respectées. Les barbotines à base de ciment se sont révélées de bonnes couches d'accrochage, elles sont relativement simples à appliquer et, de ce fait, souvent préférées à des produits à base de résines synthétiques.

6.4.2 Humidification préalable

Comme indiqué au chapitre 6.3.1, une humidité adéquate du support en béton, en fonction des produits qui lui seront appliqués, est extrêmement importante pour l'adhérence, donc pour la qualité de la réfection.

La plupart des mortiers et bétons synthétiques, les moyens d'imprégnation et les matériaux de revêtements formant une pellicule exigent un support sec ou éventuellement humide (fig. 6.13). Le support en béton peut ou doit être humide pour l'application de revêtements ou de couches d'accrochage liées au ciment, pour des renforcements avec des mortiers ou des bétons liés au ciment, y compris en cas d'ajout de matières synthétiques, ainsi que pour des revêtements synthétiques en dispersion dans l'eau et formant une pellicule. En cas d'application d'un système à base de ciment sur un support sec, celui-ci absorbe l'humidité nécessaire à l'hydratation du ciment de la nouvelle couche empêchant sa solidification. Dans tous les cas, il faut se référer aux données spécifiques des fabricants en ce qui concerne l'humidité à respecter pour le support en béton.

«sec»
Lors d'un examen visuel, une surface de rupture fraîchement mise à nu, de 2 cm de profondeur environ, ne doit pas changer de couleur (par séchage).

«humide»
La surface présente un aspect humide mat, mais ne doit pas comporter de pellicule d'eau brillante; les pores du béton du support ne doivent pas être saturés d'eau, c'est-à-dire qu'un apport d'eau doit être absorbé et que la surface doit redevenir mate après peu de temps.

«mouillé»
Les pores du béton doivent être saturés d'eau, la surface doit avoir un aspect brillant, toutefois sans formation d'un film d'eau ruisselant.

Figure 6.13
Définition de l'humidité du support en béton, selon la directive RiLiDAfStB (6)

6.5 Traitement de cure

Le traitement de cure des couches minces, qui se présentent souvent dans le cadre des mesures de réfection, est encore plus important que pour un bétonnage. Lorsque le traitement de cure des couches minces n'est pas correctement exécuté, il peut en résulter une très forte diminution de la durabilité.

Toutes les couches à base de ciment seront particulièrement protégées contre la dessiccation. La nouvelle couche le sera du soleil et du vent, avec une feuille de plastique au minimum. En général, il faut prévoir un traitement de cure avec une jute humide et une feuille de plastique; pour des revêtements de murs, des parois mobiles, placées devant le mur fraîchement revêtu et réhumidifiables ultérieurement sont toutes indiquées. Sur des surfaces plus petites, il est aussi possible de coller des feuilles de plastique. Les échafaudages devraient être revêtus pour éviter une exposition directe aux rayons du soleil.

Les exigences pour le traitement de cure des couches liées avec des matières synthétiques sont un peu plus faibles. C'est essentiellement une protection contre la poussière qui est nécessaire. Une exposition directe aux rayons du soleil est à éviter pour limiter l'échauffement.

Dans tous les cas, on se référera strictement aux instructions d'application des fournisseurs des produits.

Dans les cahiers de charges il est recommandé de prévoir les traitements de cure séparément. La direction des travaux obtient ainsi plus facilement le respect de l'application du traitement de cure exigé.

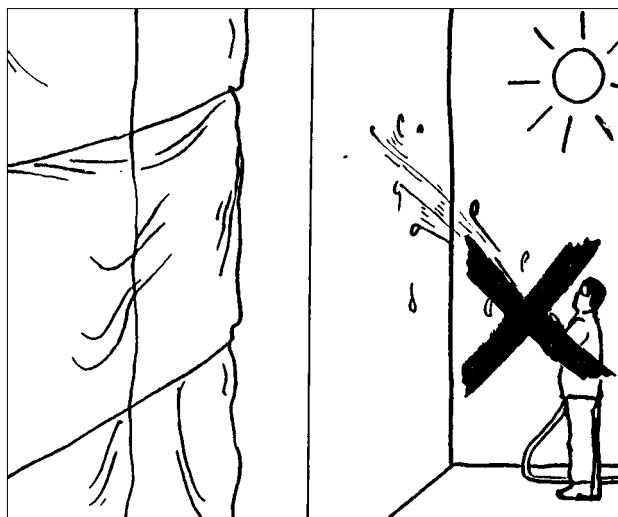


Figure 6.14
Un traitement de cure conforme aux règles de l'art est particulièrement important après la mise en oeuvre de produits liés au ciment

6.6 Contrôles de la qualité

6.1 Introduction

La directive RiLiDAfStB (6) normalise les essais et définit les responsabilités relatives à leur exécution et au contrôle de l'obtention des valeurs limites exigées. Vu que les plus importants fournisseurs de produits disposent actuellement d'un système de reconnaissance de la qualité selon les normes ISO valables, des dispositions pour le contrôle de la qualité sont donc prises à différents niveaux, aussi bien pour la surveillance interne que pour une surveillance externe.

6.6.2 Essais de base, essais de certification

Selon la directive RiLiDAfStB, les produits utilisés pour la réfection ou la protection des ouvrages en béton doivent avoir fait l'objet d'essais de base au cours desquels on soumet à une série d'essais spécifiques aussi bien les composants et les produits que le système global. Les résultats satisferont aux exigences de la directive RiLiDAfStB (6), à disposition de tout un chacun. Les principaux critères à vérifier sont résumés à la figure 6.15. C'est au fabricant qu'il incombe de prendre en charge ces essais de base, qui seront exécutés par des laboratoires spécialisés indépendants et agréés. La démarche prévue pour les réfections par la directive ZTV-SIB (4) est très semblable.

Il n'existe actuellement encore que peu de produits et de systèmes testés selon la directive RiLiDAfStB (6), car celle-ci n'a paru qu'en 1990 et les essais eux-mêmes ne sont protocolés que depuis 1992. En Allemagne, un plus grand nombre de produits ont déjà été testés selon la directive ZTV-SIB (4).

Des produits pour la protection et la réfection des ouvrages en béton ont bien entendu été testés selon divers critères, et beaucoup bénéficient également de références d'application de plusieurs années. Il n'en reste pas moins qu'il est aujourd'hui encore très difficile de comparer les produits de différents fabricants, car les laboratoires d'essais ont appliqué des méthodes d'essais et fixé des valeurs limites variables. Avec la directive RiLiDAfStB, des lacunes existantes dans les méthodes d'essais à appliquer seront également comblées (entre autres les essais de systèmes et le comportement à long terme). En

- a) Les matériaux utilisés ainsi que les éléments d'une construction ayant reçu une protection, ou fait l'objet d'une réfection, doivent résister aux sollicitations de l'environnement et du service durant la période convenue. Le démarrage d'une dégradation dans les couches profondes (par exemple à la suite d'une migration interne) doit être empêché.
- b) L'adhérence des matériaux de protection ou de réfection au béton ou à l'acier, ainsi que celle des différentes couches entre elles, doit être suffisante et durable. Elle ne doit pas, par exemple sous l'alcalinité du béton ou sous l'influence de l'humidité, diminuer de manière significative au cours du temps.
- c) Sous l'effet des variations de température, du retrait ou du gonflement, les matériaux de protection ou de réfection ne doivent pas développer des contraintes internes susceptibles de provoquer des décollements ou des fissures.
- d) Les matériaux de protection ou de réfection ne doivent pas agir de manière défavorable sur la protection contre la corrosion des armatures.

Figure 6.15
Critères d'appréciation des matériaux et des systèmes de matériaux dans le cadre des essais de base, selon la directive RiLiDAfStB (6)

Suisse, de nombreux produits et systèmes sont testés par le LPM (LPM AG, Baustoffprüfinstitut, Beinwil a.S.) ou par le LFEM (Laboratoire fédéral d'essais des matériaux, Dübendorf). Les méthodes d'essais et les exigences pour les produits et les systèmes ne sont pas fixées de façon uniforme, ce qui rend difficile la comparaison des essais de produits exécutés par des laboratoires différents. Les procès-verbaux des essais peuvent être exigés des fabricants.

La notion d'essais de base doit être clairement différenciée de celle d'essais de certification ou de conformité. L'essai de certification sert à vérifier la convenance d'un système pour la réparation d'un objet spécifique. En général, un tel essai n'incombe pas au fournisseur du produit, mais à l'entreprise, voire au maître de l'ouvrage.

6.6.3 Essais pendant l'exécution

Les travaux de réparation du béton exigent un haut degré de qualification de tous les participants à l'exécution. Afin d'atteindre les objectifs fixés, toutes les mesures utiles seront prises pour garantir la qualité, tant de la part de l'ingénieur projeteur et de la direction des travaux que de la part de l'entreprise qui les exécute. Aussi faut-il souligner qu'il est également très important de définir clairement les responsabilités entre les participants.

Au début des travaux, les mesures propres à garantir la qualité de l'exécution devraient être réunies dans un plan de contrôle et les exigences et les essais prescrits dans la soumission y seront transcrits. Ce plan contiendrait les exigences concernant le personnel d'exécution, les machines et les produits utilisés, ainsi que celles relatives aux procédés d'exécution. Les travaux terminés, ou au besoin également les étapes intermédiaires, seront soumis à des contrôles minutieux, par examen visuel et par des moyens techniques de mesures. Il est toujours préférable, pour tous les participants, que les exigences à satisfaire soient convenues par avance et fixées de manière indiscutable.

Notons cependant qu'il ne faut pas surévaluer les enseignements qu'on peut tirer des essais. Le principe de champs de contrôle, tel qu'il est pratiqué de manière usuelle dans le domaine de la protection contre la corrosion d'éléments métalliques, s'est également avéré intéressant pour le contrôle d'une mesure de réparation (10).

Personnel et équipement de l'entreprise exécutant les travaux
Personnel, équipements, laboratoire d'essais des matériaux, sous-traitant

Surveillance des systèmes adoptés pour la réparation
Surveillance interne : genre, étendue et fréquence des mesures de surveillance
Surveillance externe

Méthodes de contrôle de l'exécution des travaux
Support en béton : examen visuel, enrobage des armatures, teneur en eau, absorption d'eau, mouillabilité, profondeur de rugosité, caractéristiques des fissures, conditions de travail (températures de l'air et de l'ouvrage, humidité relative de l'air, point de rosée)

Bétons et mortiers de réparation
Systèmes de protection des surfaces : épaisseurs des couches, adhérence, porosité, essai de quadrillage

Traitement des fissures : degré de remplissage, essai de la pâte de ciment

Exigences fixées au laboratoire d'essais des matériaux

Figure 6.16
Mots-clés des éléments permettant d'assurer la qualité d'une réparation, extraits du chapitre 3 de la directive RiLiDAfStB (6) : Contrôle de qualité lors de l'exécution des travaux

Le chapitre 3 «Contrôle de qualité lors de l'exécution des travaux» de la directive RiLiDAfStB (6) contient des tableaux détaillés relatifs à la surveillance des travaux de réparation du béton. Les données de ces tableaux contiennent des indications relatives aux critères à vérifier, à la fréquence des essais et aux exigences, ceci aussi bien pour le personnel, les machines et les procédés que pour la réparation terminée. Les détails traités dans cette directive ne sont pas développés dans cette publication.

6.7 Dossier de l'ouvrage

Après achèvement d'une réparation, le dossier de l'ouvrage doit être mis à jour. Un court rapport devrait donner des renseignements sur les principaux travaux de réparation, les procédés et produits choisis, document qui servira de base à la surveillance et à l'entretien.

Annexes

Annexe A – Terminologie	119
Annexe B – Béton projeté	127
Annexe C – Tableau des températures du point de rosée	131
Annexe D – Procédés électrochimiques	133

Annexe A – Terminologie

A

Adhérence Adhäsion
Liaison entre deux matériaux en contact.

Adhérence totale Kraftschluss
Liaison entre couches ne permettant aucun degré de liberté entre elles (voir aussi capacité d'allongement).

Adjuvant	Hilfsstoff
Substance ajoutée en faible quantité dans un matériau de revêtement pour obtenir des caractéristiques particulières, par exemple agent mouillant, poison, accélérateur.	

Agent de décoffrage Trennmittel
Produit facilitant le décoffrage de béton à base de
liants minéraux ou organiques.

Alcalinité	Alkalität
Forte action basique de l'eau interstitielle de la pâte de ciment durcie, produite par la dissolution d'hydroxyde de calcium et d'autres alcalis.	

Anode Anode
Electrode chargée positivement. Le processus d'anodisation dans la corrosion d'un métal dégage des ions métalliques dans l'électrolyte, ce qui entraîne une perte de substance.

Application à la brosse Einbürsten
Procédé d'application d'un revêtement sur un support brut ou poussiéreux, par brossage vigoureux du produit pour faciliter sa pénétration.

Autoégalisation	Verlauf
Caractéristique plus ou moins marquée d'un revêtement fluide d'égaliser automatiquement les irrégularités survenues lors de son application.	

B

Barbotine de ciment Zementschlemme
(bouillaque)
Couche d'accrochage liée au ciment.

Béton de remplacement **Betonersatz**
Remplacement du béton manquant ou endom-
magé dans la partie proche de la surface.

Béton/mortier modifié par des matières synthétiques	Kunststoff- modifizierte Mörtel/Beton
Béton ou mortier de ciment dont on modifie les caractéristiques à l'état frais ou durci par adjonction, jusqu'à 5 % de la masse sèche, de matières orga- niques (matières synthétiques en dispersion, poudre synthétique apte à se disperser dans l'eau, résine à réaction émulsifiable dans l'eau).	

Béton proche de la surface	Oberflächennaher Beton
Couche de béton jusque sous les armatures, loca- lement aussi plus profonde.	

C

Cachetage	Verdämmung
Fermeture des fissures à la surface de l'élément de construction, de manière à éviter les fuites du produit de remplissage lors de l'injection sous pression.	

Capacité d'absorption Saugfähigkeit
Absorption par capillarité d'un fluide non soumis à
une pression.

Capacité d'allongement Dehnfähigkeit
Capacité de supporter des variations dimensionnelles, mais sans pour autant pouvoir supporter des décalages sensibles entre les sections (voir aussi adhérence totale).

Capacité d'égalisation Pufferkapazität
 Capacité d'un béton d'égaliser les modifications de la concentration en ions de l'eau interstitielle de la pâte de ciment lors d'apports d'eau, d'acides ou de bases.

Charge/Matière de remplissage Füller/Füllstoff
 Additifs chimiquement inertes, sous forme de poudre ou de fibres, ajoutés aux matériaux de revêtement, qui modifient ses caractéristiques techniques, tout en étant pratiquement insolubles dans le liant.

Cohésion Kohäsion
 Force qui unit entre elles les différentes parties d'un matériau.

Colorant Farbstoff
 Additif de coloration organique qui, contrairement aux pigments, est soluble dans les solvants et les liants.

Compatibilité avec les couches ultérieures Überarbeitbarkeit
 Possibilité d'application des couches ultérieures sans risque d'interaction dommageable à l'adhérence des couches.

Consommation Verbrauch
 Quantité d'un matériau nécessaire pour réaliser une surface déterminée d'un revêtement de caractéristiques données.

Contamination Kontaminierung
 Dépôt (salissure) de corps étrangers à la surface d'un élément de construction; ce terme est le plus souvent utilisé pour désigner des dépôts de matières radioactives.

Corrosion du béton Betonkorrosion
 Modifications visibles d'un béton, du fait d'influences chimiques ou physiques.

Corrosion perforante Lochfrass
 (ou corrosion ponctuelle)
 Forme de corrosion des métaux caractérisée par la disparition localisée de la couche de passivation, ce qui entraîne des cratères de corrosion profonds, alors que les surfaces voisines ne sont pratiquement pas attaquées.

Couche Schicht
 Couche constituée par l'application, en une ou plusieurs mains, d'un même matériau

Couche d'accrochage Haftbrücke
 Couche intermédiaire améliorant l'adhérence du béton de remplacement.

Couche d'égalisation Ausgleichsschicht
 Couche de préparation pour l'obtention d'une surface plane et bien profilée.

Couche de fond/primaire Grundierung
 Couche intermédiaire éventuellement nécessaire avant la mise en oeuvre des couches de protection superficielle.

Couche principale de protection des surfaces Hauptsächlich wirksame Oberflächenschutzschicht
 Couche du système de protection superficielle déterminante pour assurer la fonction de protection.

D

Délai de mise en œuvre Verarbeitungszeit
 Durée, variable avec la température et la quantité mise en œuvre, pendant laquelle une résine présente des caractéristiques de viscosité permettant son application.

Dépassivation Depassivierung
Perte de la protection contre la corrosion des incorporés métalliques dans les éléments de construction en béton, du fait de la carbonatation de l'enrobage en béton ou de l'attaque de la surface métallique par les ions des chlorures.

Dépôt Belegung
Présence sur un élément de la construction de corps étrangers solides ou liquides, ou de déchets dus à sa propre corrosion, qui doivent en général être enlevés avant la pose d'un enduit.

Diffusion Diffusion
Migration de molécules ou de ions du fait de variations locales de pression ou de concentration.

Dispersion Dispersion
Fine répartition d'un produit dans un autre; les deux produits étant insolubles ou difficilement solubles l'un dans l'autre et pouvant se trouver dans des états différents (solide, liquide, gazeux).

Dispersion synthétique Kunststoffdispersion
Fines particules de matière synthétique dispersées en milieu aqueux et qui adhèrent les unes aux autres lors de l'évaporation de l'eau pour former une pellicule.

Durcissement Aushärtung
Passage d'une matière organique de l'état liquide à l'état solide par aggrandissement des molécules et réticulation par réactions chimiques.

E

Efflorescence Ausblühung
Coloration de la surface d'un élément de construction par des dépôts de sels bien visibles, qui ont été transportés à l'aide de l'eau jusqu'en surface où ils se sont déposés.

Emulsion Emulsion
Fine répartition d'un liquide dans un autre liquide, les deux produits étant insolubles ou difficilement solubles l'un dans l'autre.

Enduit Beschichtung
Couche appliquée sur la surface, qui épouse les inégalités, ou qui les égalise dans une large mesure.

Epaisseur de la couche Schichtdicke
Epaisseur d'une couche de revêtement à l'état frais (épaisseur de la couche fraîche) ou après séchage ou durcissement (épaisseur de la couche sèche). On différencie :

- Epaisseur spécifique minimale de la couche, en fonction du système ($e_{\min s}$)
Elle résulte des expériences pratiques acquises dans l'application et l'utilisation des systèmes de protection superficielle. Elle est fixée pour chaque système par rapport aux fonctions principales attendues des diverses couches.
- Epaisseur spécifique maximale de la couche, en fonction du système ($e_{\max s}$)
Elle résulte des expériences pratiques acquises dans l'application et l'utilisation des systèmes de protection superficielle et, si nécessaire, elle doit être prescrite.
- Epaisseur spécifique minimale de la couche, en fonction des produits ($e_{\min p}$)
Elle résulte des exigences d'efficacité fixées pour un produit déterminé. Elle est déterminée lors de l'essai de base et ne doit pas être inférieure à $e_{\min s}$. Les exigences relatives à la diffusion du CO₂, au besoin la capacité de pontage des fissures, seront souvent déterminantes pour ce point.
- Epaisseur spécifique maximale de la couche, en fonction des produits ($e_{\max p}$)
Elle résulte des exigences d'efficacité fixées pour un produit déterminé. Elle est déterminée lors de l'essai de base et ne doit pas être supérieure à $e_{\max s}$. Les exigences relatives à la diffusion du CO₂ seront souvent déterminantes pour ce point.
- Epaisseur prescrite de la couche (e_{pr})
Elle est fixée à partir de données statistiques de manière à ce qu'elle soit obtenue en moyenne sur la surface revêtue afin de garantir que l'épaisseur

spécifique minimale en fonction des produits ($e_{\min p}$) soit réalisée au moins sur 95 % de la surface. La dispersion des épaisseurs mesurées et le nombre de mesures sont déterminants pour fixer le coefficient de majoration à appliquer à $e_{\min p}$ pour obtenir e_{pr}

- Epaisseur moyenne appliquée (e)
Valeur moyenne de toutes les mesures réparties sur la surface déterminée, après sondages représentatifs. e ne doit pas être inférieur à e_{pr} et pas supérieur à $e_{\max p}$

La formule suivante s'applique :

$$e_{\min s} \leq e_{\min p} \leq e_{pr} \leq e \leq e_{\max p} \leq e_{\max s}$$

Epaisseur de la couche fraîche Nassfilmdicke
Voir épaisseur de la couche.

Epaisseur de la pellicule Filmdicke
Voir épaisseur de la couche.

Epaisseur de la couche sèche Trockenfilmdicke
Voir épaisseur de la couche.

Epaisseur moyenne appliquée e Mittlere Auftragsdicke
Valeur moyenne de l'épaisseur de la couche, mesurée après l'exécution.

Essai d'arrachement Abreissversuch
Détermination de la résistance à la traction de la surface du support en béton ou de la contrainte d'adhérence à la traction d'un revêtement appliqué sur ce support, par sollicitation de traction perpendiculaire à la surface.

Extraction des chlorures Chlorid-Extraktion
Procédés physiques ou électrochimiques d'élimination des ions de chlorures d'un support en béton.

Extrait sec Festkörpergehalt
Part d'un matériau de revêtement, rapportée au volume ou à la masse, qui subsiste après séchage dans des conditions déterminées.

F

Fissure Riss
Ouverture dans une structure en béton, y compris aux joints et aux joints d'arrêt de travail. On différencie les fissures de surfaces et les fissures profondes.

- Les fissures de surface ne traversent pas l'épaisseur de la structure et ne concernent qu'une petite partie de la section. Elles forment fréquemment un réseau (faïençage).
- Les fissures profondes traversent une part importante de la section, fissures aveugles (par exemple : zones tendues, appuis) ou toute la section, fissures traversantes.

Formation de la pellicule Filmbildung
Passage de l'état liquide à l'état solide d'un revêtement organique par durcissement chimique ou séchage physique (élimination des solvants), dans le cadre de la constitution de la structure des différentes couches.

G

Glacis Versiegelung
(voir également lasure)
Remplissage des pores capillaires proches de la surface du béton, avec formation simultanée d'une pellicule superficielle continue

H

Humidité Feuchte
Humidité absolue de l'air: teneur en vapeur d'eau d'un volume unitaire d'air humide; humidité relative de l'air: rapport de la pression de vapeur effective à la pression de saturation à température égale; humidité d'un matériau : rapport entre la masse de l'eau liquide contenue par le matériau et la masse du produit séché.

Humidité d'équilibre Ausgleichsfeuchte
Humidité propre à un matériau de construction poreux, en équilibre stable avec l'humidité de l'air ambiant.

Humidité propre Eigenfeuchte
Humidité d'un matériau poreux consécutive à l'absorption capillaire d'eau liquide ou à la condensation de la vapeur d'eau.

Hydrolyse Hydrolyse
(voir également (Verseifen)
saponification)
Modification chimique d'un produit sous l'action de l'eau.

I

Imbibition Tränken
Remplissage de fissures sans pression.

Imprégnation Imprägnierung
Traitement de protection d'un support présentant une porosité capillaire contre des agressions physiques, chimiques ou biologiques, par l'application d'un produit de protection sous forme liquide, qui devrait recouvrir toutes les parois des pores. Les pores capillaires les plus gros restent en général ouverts.

Imprégnation Hydrophobierung
hydrophobe
Imprégnation imperméabilisante d'un support présentant une porosité capillaire, ne formant pas une pellicule et qui n'empêche toutefois pratiquement pas la diffusion de la vapeur d'eau.

Injection Injektion
Voir injection sous pression

Injection sous pression Verpressen
Remplissage de fissures par injection sous pression au moyen d'injecteurs.

J

Joint de travail Arbeitsfuge
Raccords aux arrêts de travail dans les travaux de réfection du béton et dans les systèmes de protection superficielle.

L

Lasure Lasur
(voir également glacis)
Enduit mince laissant transparaître la couleur propre du support.

Liant Bindemittel
Partie non volatile (pâte de ciment, résine synthétique) d'un enduit qui lie les composants solides (agréats, pigments, matières de remplissage) et assure également la liaison avec le support en béton.

Limite de démolition Ausbruchufer
Limite jusqu'où le béton doit être enlevé aux endroits endommagés, de manière à atteindre la zone saine ou la zone qui ne sera pas mise en danger pendant le reste de la durée d'utilisation de l'ouvrage.

Lissage Spachtelmasse
Matériau de revêtement pigmenté et compact, pouvant être appliqué à la truelle, au pinceau ou par projection, principalement pour l'égalesation des irrégularités du support et pour boucher les pores superficiels.

Lissage fin Feinspachtel
Exécuté en une ou deux mains pour boucher les pores ainsi que pour lisser la surface.

M

Main (en une) Lage
Couche exécutée en une seule opération

Matériau d'enduit Beschichtungsstoff
Matières diverses, liquides à pâteuses, composées de liants parfois additionnés de matières solides ou d'autres additifs et qui, après séchage ou réaction chimique, passent à l'état solide.

Point de rosée Taupunkt
Température d'un élément de construction, fonction du climat de l'environnement, juste assez basse pour entraîner la condensation de la vapeur d'eau à sa surface.

Préparation Oberflächen-
de la surface vorbereitung
Traitement de la surface du support en béton pour le rendre apte à recevoir un béton de remplacement ou une protection de surface.

N

Non volatil Nichtflüchtiges
Voir extrait sec

Prise Erhärtung
Passage d'un matériau à base de liant minéral de l'état liquide à l'état solide, par réactions chimiques.

Procédé par excès Fluten
Procédé d'exécution d'un revêtement d'une surface présentant une porosité capillaire, par un apport momentanément en excès du matériau à appliquer.

P

PC PC
(Polymer-Concrete (Polymer-Concrete)
ou béton-polymère)
Béton ou mortier constitué d'agréats et de résine à réaction comme liant.

Protection des Korrosionsschutz
armatures contre der Bewehrung
la corrosion
Protection des armatures contre la corrosion par l'application d'au moins deux couches d'un revêtement de protection, lorsque l'épaisseur du béton de remplacement n'est pas suffisante ou lorsque sa composition n'assure pas une protection adéquate.

PCC PCC
(Polymer-Cement- (Polymer-Cement-
Concrete ou béton- Concrete)
ciment-polymère)
Béton ou mortier de ciment avec additifs synthétiques.

Protection Oberflächenschutz
superficielle
Mesures de protection de la surface du béton par imperméabilisation ou par application d'un revêtement.

Pellicule de ciment Zementhaut
Fine couche de mortier, riche en ciment, se produisant à la surface du béton. Le cas échéant, elle doit être enlevée pour améliorer l'adhérence des revêtements ultérieurs.

Q

Pigment Pigment
Additif de coloration organique ou inorganique qui, contrairement aux colorants, est pratiquement insoluble dans les solvants ou les liants.

Quantité de matière Wirkstoffmenge
active
Quantité de matière active contenue dans un imperméabilisant appliqué sur un fond en béton.

R

Repassivation Repassivierung
Reconstitution de la protection anticorrosion
d'incorporés métalliques dans le béton au moyen
de produits alcalins.

Reprofilage Reprofilierung
Reconstitution de la forme géométrique originale
d'un élément de construction.

Réserve d'alcalinité Alkalitätsreserve
Capacité d'un béton, fonction du type et de la quan-
tité de ciment, de remplacer par carbonatation
l'hydroxyde de calcium dissous dans l'eau intersti-
tielle de la pâte de ciment.

Résine réactive Reaktionsharz
Résine synthétique fluide durcissant, généralement
sans dégagement de sous-produits, soit par réac-
tion chimique avec l'environnement (résine mono-
composante), soit par adjonction de durcisseur
(résine à plusieurs composants).

Résine synthétique Kunstharz
Liant organique constitué de produits de synthèse,
apte à durcir sous forme de duromères par la for-
mation partielle de réseaux.

Résistance Diffusionswiderstand
à la diffusion (gegenüber
(de la vapeur d'eau) Wasserdampf)
Rapport entre la résistance à la diffusion d'une
couche de matériau et celle d'une couche d'air
immobile de même épaisseur, à la même tempé-
rature.

Résistance à Haftzugfestigkeit
l'arrachement
Voir essai d'arrachement.

Rugosité Rauigkeit
Différences de niveau mesurées sur une petite sur-
face par rapport au plan idéal.

Rupture d'adhérence Adhäsionsbruch
Rupture entre deux couches.

Rupture de cohésion Kohäsionsbruch
Rupture à l'intérieur d'une couche.

S

Saponification Verseifen
(voir également hydrolyse)
Forme particulière de l'hydrolyse qui entraîne la
séparation chimique des groupes esters des poly-
mères, sous l'action d'une forte alcalinité.

Saupoudrer Abstreuen
Application à la volée de matériaux minéraux secs,
sur un revêtement organique frais, et ceci de
manière à ce que les particules soient fortement
liées à la couche superficielle.

Séchage physique Physikalische
Trocknung
Formation de la pellicule d'un matériau de revête-
ment sans réaction chimique, induite exclusive-
ment par l'évaporation d'un solvant.

Solvant Lösemittel
Liquide permettant de dissoudre (diluer), sans
modification chimique, le liant de matériaux de
revêtement organiques pour lui donner la viscosité
nécessaire à l'application et qui, normalement,
s'évapore lors du durcissement de la pellicule.

SPCC (Spritz-PCC ou projection de PCC)
Application par projection de mortier ou béton de
ciment avec adjonction d'additifs synthétiques.

Support en béton Betonuntergrund
Béton sur lequel on exécute le béton de remplace-
ment ou le système de protection superficielle.

Système de protection des surfaces	Oberflächen- schutzsystem
--	------------------------------

Ensemble des matériaux des différentes couches de la protection superficielle.

Système de remplacement du béton	Beton- ersatzsystem
--	------------------------

Comporte les matériaux du béton de remplacement et, en général, la couche d'accrochage et, si nécessaire, la protection contre la corrosion et le lissage fin.

T

Temps de séchage	Trocknungszeit
------------------	----------------

Durée entre l'application d'un revêtement fluide et l'obtention d'un état déterminé dans la formation de la couche, par ex.: hors poussière, non collant, résistant aux griffures, etc.

Teneur en matière active	Wirkstoffgehalt
--------------------------	-----------------

Proportion active d'un imperméabilisant.

Thixotropie	Thixotropie
-------------	-------------

Propriété de certains mélanges de matériaux de se liquéfier lorsqu'on les agite mécaniquement, mais qui reprennent leur consistance de gel à l'état de repos.

V

Vieillissement	Alterung
----------------	----------

Modifications non réversibles des caractéristiques d'un matériau en fonction des spécificités de l'environnement.

Viscosité	Viskosität
-----------	------------

Résistance d'un fluide à un mouvement relatif interne.

Annexe B – Béton projeté

Extraits de la norme SIA 198 (1993), Travaux souterrains [36]

3 12 BETON PROJETE

3 12 1 Généralités

3 12 11 On désigne par béton projeté un béton dont la mise en œuvre et le compactage interviennent par projection.

Dans la présente norme, le terme de béton projeté désigne également la gunite. Ces deux matériaux se distinguent uniquement par leur granulométrie.

3 12 12 Selon le mode de projection, on utilise un mélange de vase sec ou mouillé.

3 12 13 Dans la projection par voie sèche, le dosage en ciment se réfère à 1000 litres de granulats (ou au poids des matériaux correspondants).

3 12 14 Dans la projection par voie mouillée, le dosage en ciment se réfère à un mètre cube de béton confectionné sans rebond au moyen du mélange de base mise en place et compacté dans un coffrage.

3 12 15 Le type et le dosage des additifs seront soumis à l'approbation du maître de l'ouvrage.

3 12 16 On distingue quatre classes de béton projeté :

- Classe A : Béton projeté sans rôle porteur (par exemple protection du massif, remplissage de fractures, support d'étanchéité)
- Classe B : Béton projeté à rôle porteur temporaire
- Classe C : Béton projeté à rôle porteur permanent
- Classe D : Béton projeté répondant à des caractéristiques particulières (par exemple étanchéité, résistance aux agents chimiques).

Pour la première couche du soutènement, n'intervient que le béton projeté de classe B.

3 12 2 Qualité

3 12 21 A défaut d'autres valeurs précisées dans l'appel d'offres, la résistance à la compression sur cube doit satisfaire aux exigences de la norme SIA 162 selon tableau 1.

Classe de béton projeté	Désignation selon norme SIA 162
A	B 25/15
B	B 30/20
C	B 35/25
D	selon exigences spécifiques liées à l'ouvrage

Tableau 1

La désignation du béton selon la norme SIA 162 repose sur 2 valeurs de la résistance à la compression sur cube :

- La première valeur (valeur supérieure) correspond à la valeur moyenne de la résistance à la compression sur cube, soit à la valeur minimale exigée compte tenu d'un écart-type de 5 N/mm^2 .
- La deuxième valeur (valeur inférieure) est la valeur minimale de la résistance à la compression sur cube déterminante pour la vérification de la sécurité structurale. Cette valeur minimale correspond approximativement au fractile 2 % selon une distribution normale de Gauss, c'est-à-dire que, pour un grand nombre d'essais, 2 % des résultats n'atteignent pas cette valeur minimale.

- 3 12 22 L'utilisation de béton projeté de classe C ou D implique des essais préalables systématiques et concluants, prouvant que les exigences relatives au béton projeté sont satisfaites sur l'ouvrage.
- 3 12 23 Le béton projeté de classe C présentera une surface de structure régulière.
- 3 12 24 Les documents de l'appel d'offres préciseront les exigences spécifiques liées à l'ouvrage pour le béton projeté de classe D en ce qui concerne la résistance, l'étanchéité à l'eau, la résistance au gel, la résistance au gel et aux sels de déverglaçage, la résistance aux agents chimiques, l'adhérence, la résistance à l'abrasion, l'aspect de surface, etc.
- 3 13 3 Contrôle
- 3 13 31 La résistance à la compression sera vérifiée conformément à la norme SIA 162 par des essais sur un échantillonnage de carottes de béton. Un échantillonnage comprend au maximum 15 valeurs isolées f_{cwi} . Lorsque le nombre des valeurs isolées est supérieur, celles-ci sont analysées en séries successives de 15 valeurs au maximum.
- 3 12 32 La résistance à la compression est déterminée sur des carottes de béton dont le diamètre et la longueur sont de 50 mm. Ces éprouvettes seront prélevées dans l'ouvrage conformément aux indications de la norme SIA 162/1.
- 3 12 33 Chaque valeur isolée f_{cwi} est la moyenne des résultats d'essais effectués sur cinq carottes prélevées au même endroit. Celles-ci constituent une éprouvette.
- 3 12 34 La dispersion des valeurs de résistance mesurées sur le béton projeté est en règle générale supérieure à celle qui correspond à la désignation des classes de béton projeté du chiffre 3 12 21. C'est pourquoi on considère que la valeur minimale de la résistance est atteinte lorsque les conditions suivantes sont remplies :

$$f_{cwm}(n) - 10 \text{ N/mm}^2 \geq 0.85 f_{cw, \min}$$

et soit:

$$\text{Max } f_{cwi} - \text{Min } f_{cwi} \leq \Delta f_{cw}(n)$$

soit:

$$\text{Min } f_{cwi} \geq 0.85 f_{cw, \min}$$

- $f_{cw, \min}$: valeur minimale de la résistance à la compression sur cube
 $f_{cwm}(n)$: résistance moyenne à la compression sur n éprouvettes (valeurs isolées)
 $\text{Max } f_{cwi}$: valeur maximale des résultats d'essai pour l'échantillonnage considéré
 $\text{Min } f_{cwi}$: valeur minimale des résultats d'essai pour l'échantillonnage considéré
 $\Delta f_{cw}(n)$: différence admissible selon tableau 2

Nombre d'éprouvettes n	1 ... 3	4 ... 6	7 ... 9	10 ... 12	13 ... 15
Différence admissible $\Delta_{fcw}(n)$ [N/mm ²]	9	11	13	15	16

Tableau 2

- 3 12 35 La date de confection déterminante est celle de la dernière couche de béton projeté faisant l'objet de l'essai.
- 3 12 36 Lorsque l'épaisseur des couches ou d'autres circonstances ne permettent pas de procéder à des prélèvements directs par carottage, des surfaces d'essai doivent être confectionnées dans des conditions analogues dans l'ouvrage.
- 3 12 37 Pour la vérification de la résistance à la compression, on fixera comme suit le nombre minimal des éprouvettes :

	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Essais préliminaires	–	–	dans tous les cas	dans tous les cas
Contrôle systématique de la qualité	1 éprouvette pour 250 m ³ de mélange de base, mais au minimum 3 par chantier	1 éprouvette pour 200 m ³ de mélange de base, mais au minimum 3 par chantier	1 éprouvette pour 150 m ³ de mélange de base, mais au minimum 6 par chantier	Critères spécifiques relatifs à l'ouvrage selon documents de l'appel d'offres

Tableau 3

- 3 12 38 Le contrôle des granulats s'effectue selon la norme SIA 162/1, celui du ciment selon la norme SIA 215.001.

Annexe C – Tableau des températures du point de rosée

Extrait de ZTV-SIB 90 (4)

Température de l'air (°C)	Température du point de rosée en °C, pour une humidité relative de l'air de										
	45 %	50 %	55 %	60 %	65 %	70 %	75 %	80 %	85 %	90 %	95 %
2	- 7,77	- 6,56	- 5,43	- 4,40	- 3,16	- 2,48	- 1,77	- 0,98	- 0,26	+ 0,47	+ 1,20
4	- 6,11	- 4,88	- 3,69	- 2,61	- 1,79	- 0,88	- 0,09	+ 0,78	+ 1,62	+ 2,44	+ 3,20
6	- 4,49	- 3,07	- 2,10	- 1,05	- 0,08	+ 0,85	+ 1,86	+ 2,72	+ 3,62	+ 4,48	+ 5,38
8	- 2,69	- 1,61	- 0,44	+ 0,67	+ 1,80	+ 2,83	+ 3,82	+ 4,77	+ 5,66	+ 6,48	+ 7,32
10	- 1,26	+ 0,02	+ 1,31	+ 2,53	+ 3,74	+ 4,79	+ 5,82	+ 6,79	+ 7,65	+ 8,45	+ 9,31
12	+ 0,35	+ 1,84	+ 3,19	+ 4,46	+ 5,63	+ 6,74	+ 7,75	+ 8,69	+ 9,60	+ 10,48	+ 11,33
14	+ 2,20	+ 3,76	+ 5,10	+ 6,40	+ 7,58	+ 8,67	+ 9,70	+ 10,71	+ 11,64	+ 12,55	+ 13,36
15	+ 3,12	+ 4,65	+ 6,07	+ 7,36	+ 8,52	+ 9,63	+ 10,70	+ 11,69	+ 12,62	+ 13,52	+ 14,42
16	4,07	5,59	6,98	8,29	9,47	10,61	11,68	12,66	13,63	14,58	15,54
17	5,00	6,48	7,92	9,18	10,39	11,48	12,54	13,57	14,50	15,36	16,19
18	5,90	7,43	8,83	10,12	11,33	12,44	13,48	14,56	15,41	16,31	17,25
19	6,80	8,33	9,75	11,09	12,26	13,37	14,49	15,47	16,40	17,37	18,22
20	7,73	9,30	10,72	12,00	13,22	14,40	15,48	16,46	17,44	18,36	19,18
21	8,60	10,22	11,59	12,92	14,21	15,36	16,40	17,44	18,41	19,27	20,19
22	9,54	11,16	12,52	13,89	15,19	16,27	17,41	18,42	19,39	20,28	21,22
23	10,44	12,02	13,47	14,87	16,04	17,29	18,37	19,37	20,37	21,34	22,23
24	11,34	12,93	14,44	15,73	17,06	18,21	19,22	20,33	21,37	22,32	23,18
25	12,20	13,83	15,37	16,69	17,99	19,11	20,24	21,35	22,27	23,30	24,22
26	13,15	14,84	16,26	17,67	18,90	20,09	21,29	22,32	23,32	24,31	25,16
27	14,08	15,68	17,24	18,57	19,83	21,11	22,23	23,31	24,32	25,22	26,10
28	14,96	16,61	18,14	19,38	20,86	22,07	23,18	24,28	25,25	26,20	27,18
29	15,85	17,58	19,04	20,48	21,83	22,97	24,20	25,23	26,21	27,26	28,18
30	16,79	18,44	19,96	21,44	23,71	23,94	25,11	26,10	27,21	28,19	29,09
32	18,62	20,28	21,90	23,26	24,65	25,79	27,08	28,24	29,23	30,16	31,17
34	20,42	22,19	23,77	25,19	26,54	27,85	28,94	30,09	31,19	32,13	33,11
36	22,23	24,08	25,50	27,00	28,41	29,65	30,88	31,97	33,05	34,23	35,06
38	23,97	25,74	27,44	28,87	30,31	31,62	32,78	33,96	35,01	36,05	37,03
40	25,79	27,66	29,22	30,81	32,16	33,48	34,69	35,86	36,98	38,05	39,11
45	30,29	32,17	33,86	35,38	36,85	38,24	39,54	40,74	41,87	42,97	44,03
50	34,76	36,63	38,46	40,09	41,58	42,99	44,33	45,55	46,75	47,90	48,98

Le tableau des températures du point de rosée indique, en fonction de la température de l'air et de son humidité relative, les températures de surface qui entraînent une condensation. Ainsi, par exemple, pour une température de l'air de 20 °C et une humidité relative de l'air de 70%, des condensations apparaîtront sur des surfaces non absorbantes dès que la température de ces surfaces seront inférieures à 14,4 °C.

Annexe D – Procédés électrochimiques

Comparaison des procédés électrochimiques

Procédés	KKS Protection cathodique contre la corrosion	ECE Déminéralisation électrochimique	ER Réalcalinisation électrochimique
Application lors de dégâts en raison	des chlorures de la carbonatation	des chlorures	de la carbonatation
Anode	treillis de titane	treillis de titane	treillis d'armature
Enrobage de l'anode	mortier d'enrobage à base de ciment et de 3 cm d'épaisseur au minimum	masse humide de fibres de cellulose	masse humide de fibres de cellulose, enrichie de soude
Intensité du courant	5-15 mA/m ²	environ 1 A/m ²	0,5 - 1 A/m ²
Tension	1-3 V	30-45 V	5-40 V
Mécanisme	Le potentiel de l'armature est abaissé de manière à ce que l'anode joue le rôle de cathode	les ions Cl ⁻ migrent de la zone des armatures (cathode) vers l'anode et sont ainsi éliminés du béton le pH augmente autour des armatures	les ions Na ⁺ migrent dans le béton, de la masse d'enrobage vers l'armature (cathode) le pH du béton, en particulier autour des armatures, augmente
Durée	permanent	6-8 semaines	4-10 jours
Limitation	risque de fragilisation par l'hydrogène pour les aciers de précontrainte	risque de fragilisation par l'hydrogène pour les aciers de précontrainte	risque de fragilisation par l'hydrogène pour les aciers de précontrainte
Protection complémentaire de la surface	en général pas nécessaire	contre la pénétration des chlorures	contre la carbonatation
Etat du développement	au point	utilisable avec certaines réserves (régularité de l'action, contrôle)	efficacité démontrée, durabilité encore incertaine, à utiliser avec prudence

Bibliographie

- (1) Böhni H., Elsener B.: Korrosionsbeständigkeit von Armierungen, in SIA Dokumentation D 72, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1984
- (2) Office fédéral des routes OFR: Directives pour l'utilisation d'armatures passives revêtues de résine époxy, Office fédéral des routes, Berne, 1991
- (3) Office fédéral des routes OFR: Rapport d'analyse, Enlèvement du béton par hydrodémolition, Office fédéral des routes, Berne, 1993
- (4) Der Bundesminister für Verkehr, Abteilung Strassenbau:

ZTV-SIB 90	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen
TL OS	Technische Lieferbedingungen für Oberflächenschutzsysteme
TP OS	Technische Prüfvorschriften für Oberflächenschutzsysteme
TL BE-SPCC	Technische Lieferbedingungen für im Spritzverfahren aufzubringende Betonersatzsysteme aus Zementmörtel/Beton mit Kunststoffzusatz (SPCC)
TP BE-SPCC	Technische Prüfvorschriften für im Spritzverfahren aufzubringende Betonersatzsysteme aus Zementmörtel/Beton mit Kunststoffzusatz (SPCC)
TL BE-PCC	Technische Lieferbedingungen für Betonersatzsysteme aus Zementmörtel/Beton mit Kunststoffzusatz (PCC)
TP BE-PCC	Technische Prüfvorschriften für Betonersatzsysteme aus Zementmörtel/Beton mit Kunststoffzusatz (PCC)
TL BE-PC	Technische Lieferbedingungen für Betonersatzsysteme aus Reaktionsharzmörtel/Reaktionsharzbeton (PC)
TP BE-PC	Technische Prüfvorschriften für Betonersatzsysteme aus Reaktionsharzmörtel/Reaktionsharzbeton (PC)

sämtliche Ausgaben 1990, Verkehrsblatt-Verlag, Dortmund
- (5) Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinien für die Ausbesserung und Verstärkung von Betonbauteilen mit Spritzbeton, Beuth Verlag, Berlin und Köln, Fassung Oktober 1983
- (6) Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, Beuth Verlag, Berlin und Köln
Teil 1: Allgemeine Regelungen und Planungsgrundsätze, August 1990
Teil 2: Bauplanung und Bauausführung, August 1990
Teil 3: Qualitätssicherung der Bauausführung, Februar 1991
Teil 4: Qualitätssicherung der Bauprodukte, November 1992
- (7) Elsener B., Molina M.: Elektrochemische Chloridentfernung an Stahlbetonbauwerken, Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Strassenbau, Forschungsauftrag Brückenunterhaltsforschung 97/92, Dezember 1992
- (8) Eppler E., Erne W.: Rénovation de façades en béton apparent des années trente, Bulletin du ciment, Service de recherches et conseils techniques de l'industrie suisse du ciment, mars 1988, Wildeg

- (9) Fiebrich M. et al.: Eignungsprüfung and Hydrophobierungen für Beton, Bautenschutz + Bausanierung, 16 (1993), 35-39 und 58-60, Rudolf Müller, Köln.
- (10) Hächler A., Flückiger D.: Schutz und Sanierung von Stahlbetonbauwerken im Bereich von Strassen, Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, ETH Zürich, Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bericht Nr. 212, März 1991
sowie
Flückiger D., Elsener B., Studer W. und Böhni H.: Schutz von Beton durch Beschichtungen, Schweizer Ingenieur und Architekt Nr. 22, 1993, Zürich
- (11) Grube H. et al.: Instandhaltung von Betonbauwerken, Beton-Kalender 1990 Teil II, p. 681 ff, Ernst & Sohn, Berlin, 1990
- (12) Publication PI BAT, Classification des éléments d'entretien et de rénovation, Office fédéral des questions conjoncturelles, OCFIM No 724.438 d/f, Berne, 1992
- (13) IP BAU, Hochbau: Feindiagnose, Bundesamt für Konjunkturfragen, EDMZ Nr. 724.432 d, Bern, 1993
- (14) Publication PI BAT, Diagnostic sommaire MERIP – Evaluation des dégradations et estimation du coût de remise en état des immeubles, Office fédéral des questions conjoncturelles, OCFIM No 724.431 f, Berne, 1993
- (15) Publication PI BAT, Méthodes de relevé – Techniques de relevés, modalités, évaluation des coûts, Office fédéral des questions conjoncturelles, OCFIM No 724.433 f, Berne, 1993
- (16) Publication PI BAT, Protection des ouvrages de génie civil, Office fédéral des questions conjoncturelles, OCFIM No 724.455 f, Berne, 1993
- (17) Publication PI BAT, Maintenance de routes à grand débit en exploitation, Office fédéral des questions conjoncturelles, OCFIM No 724.452 f, Berne, 1992
- (18) Publication PI BAT, Techniques d'auscultation des ouvrages de génie civil, Office fédéral des questions conjoncturelles, OCFIM No 724.453 f, Berne, 1991
- (19) Publication PI BAT, Le diagnostic des ouvrages de génie civil – Manuel pour ingénieurs civils, Office fédéral des questions conjoncturelles, OCFIM No 724.456 f, Berne, 1993
- (20) Jungwirth D., Beyer E., Grübl P.: Dauerhafte Betonbauwerke, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1986
- (21) Menn C.: Verbindung von altem und neuem Beton, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Bericht Nr. 193, Birkhäuser Verlag, Basel, 1992
- (22) Müller R., Holtzhauer K.: Kathodischer Korrosionsschutz von Bewehrungsstählen, Langzeitbeständigkeit von Anodenmaterialien und Mörteln, Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Strassenbau, Forschungsauftrag Brückenunterhaltsforschung Nr. 503, August 1992
- (23) Nürnberger et al.: Korrosionsschutz im Massivbau, Expert Verlag, Ehningen bei Böblingen, 1991
- (24) Rilem: Rilem technical recommendation 124 SRC, Guide to repair strategies for concrete structures damaged by reinforcement corrosion, preliminary draft, Institut für Bauforschung, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 1992

- (25) Roti J.A.: Elektrochemische Realkalisierung und Entsalzung von Beton, WTA-Tagung in Zürich 1990, WTA-Bericht Nr. 6, 1990
- (26) Schiessl P.: Schutzwirkung des Brückenbetons gegen Bewehrungskorrosion insbesondere bei Tausalzeinwirkung, Sachstandsbericht, Deutsche Bundesanstalt für Strassenwesen, 1988
- (27) Schröder J. et al.: Hauptbegriffe der Bauwerkserhaltung, Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 45, Zürich, 1992
- (28) Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz: Richtlinie für Projektierung, Ausführung und Überwachung des kathodischen Korrosionsschutzes von Stahlbetonbauwerken, Richtlinie C7, Ausgabe 1991, Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz, Zürich, 1991
- (29) SIA: Dokumentation SIA D 065: Elektrochemische Schutzverfahren für Stahlbetonbauwerke, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 19
- (30) SIA: Documentation D 099, Maintenance des ponts - Résultats actuels de la recherche, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 1993
- (31) SIA: Règlement 103, Règlement concernant les prestations et honoraires des ingénieurs civils, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 1984
- (32) SIA: Norme SIA 162, Ouvrages en béton. 1989/révision partielle 1993, Société suisse des ingénieurs et des architectes
- (33) SIA: Prénorme SIA V162.001, Eurocode 2, Calcul des structures en béton, Partie 1 Règles générales et règles pour les bâtiments, Prénorme européenne, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich 1992
- (34) SIA: Recommandation SIA 169, Maintenance des ouvrages de génie civil, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 1987
- (35) SIA: Norme SIA 169, Proposition en consultation, Maintenance des ouvrages de génie civil, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 1993
- (36) SIA: Norme SIA 198, Travaux souterrains, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 1993
- (37) SIA: Norme SIA 462, Proposition en consultation, Appréciation de la sécurité structurale des ouvrages existants, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 1993
- (38) SIA: Cahier technique 2002, Inspection et remise en état des éléments de construction en béton, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 1990
- (39) SZS: SN 555.001, B3 Protection de surface des constructions métalliques, Centre suisse de la construction métallique, Zurich, 1990
- (40) Teichert P.: Béton projeté, E. Laich SA, Avegno, 1991
- (41) WTA: Fiche technique, Entretien des ouvrages en béton, protection et réparation, Groupe scientifique et technique pour la restauration des monuments et des constructions, section Suisse, Zurich, 1985

Associations de soutien



**Société suisse
des Ingénieurs et des Architectes**



Union technique suisse



**Union suisse
des professionnels de la route**