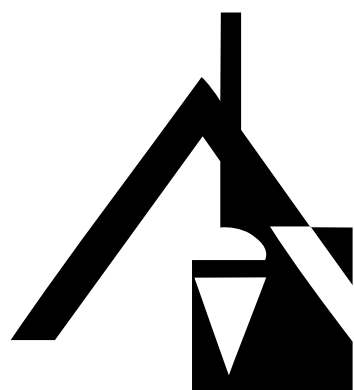


Protection des ouvrages de génie civil



PI-BAT

Protection des ouvrages de génie civil

Protéger fonctionnellement un bâtiment existant ou futur contre les influences de son environnement: c'est un défi que doit relever l'ingénieur, mais c'est aussi une importante contribution à la conservation de notre culture architecturale. La présente documentation est novatrice puisqu'elle regroupe toutes les connaissances actuellement disponibles quant aux systèmes de protection.

Elle est surtout destinée aux ingénieurs qui, à l'étape du projet ou des travaux, doivent savoir prendre les mesures qui s'imposent en vue de répondre aux exigences requises en matière de qualité, de délais ou de coût.

Cet ouvrage décrit exhaustivement quels sont les principes des systèmes de protection; il aborde la question des normes officielles, des directives en vigueur dans les travaux publics; il fait le point sur les incidences, les mécanismes de dégradation et de vieillissement, la surveillance de la qualité, le respect de l'environnement. Après une introduction générale qui expose à quelles exigences sont soumis les systèmes de protection et quels sont leurs critères de choix, chaque chapitre traite d'un matériau différent: le béton, l'acier, le bois, la pierre naturelle. Le tout est suivi d'une bibliographie très complète.

ISBN 3-905234-32-7

Edition originale: ISBN 3-905234-14-9

1993, 168 pages

N° de commande 724.455 f

Fr. 38.–

Protection des ouvrages de génie civil

La présente documentation «Protection des ouvrages de génie civil» a été élaborée par le groupe de travail «Technologie» de «PI-BAT – Entretien et rénovation des constructions». Les noms des auteurs figurent dans la liste ci-après. Un certain nombre d'experts spécialisés ont fait bénéficier le groupe de travail de leur expérience et lui ont donné de précieuses informations.

Membres du groupe de travail «Technologie» pour la Suisse allemande

- R.P. Frey, bureau d'ingénieurs Frey & Schwartz, Zoug
- M. Lugeon, bureau d'ingénieurs Rochat et Lugeon SA, Cossonay-Gare
- M. Matalon, Emch + Berger SA, Bienne
- P. Matt, ingénieur-conseil, Ittigen
- A. Muttoni, Studio Grignoli Martinola Muttoni, Lugano

Animation du groupe et supervision de la rédaction

- P. Matt, ingénieur-conseil, Ittigen

Membres du comité d'experts

- A. Arnold, Institut pour la conservation des monuments historiques, ETH, Zurich
- A. Bernhard, Tecnotest SA, Zurich
- M. Donzel, Office fédéral des routes
- B. Furrer, conservation des monuments historiques, Ville de Berne
- M. Gut, direction des travaux publics du Canton de Nidwald
- F. Hunkeler, Société suisse pour la protection contre la corrosion, Zurich
- C. Meuli, Office fédéral des routes
- P. Schliessl, Institut de recherche de génie civil, RWTH, Aix-la-Chapelle, Allemagne
- O.W. Studer, LFEM, Dübendorf
- R. Suter, Schindelholz + Dénéréaz SA, Lausanne
- M. Tschumi, direction générale des CFF, Berne
- S. Zingg, Centrale suisse de la construction métallique, Zurich
- P. Zwicky, bureau d'ingénieurs, Sarnen

Liste des auteurs

- R.P. Frey, bureau d'ingénieurs Frey & Schwartz, Zoug, et
- A. Muttoni, Studio Grignoli Martinola Muttoni, Lugano (chap. 3)

- U. Meierhofer, Institut suisse d'essai des matériaux, Dübendorf, et
- J. Fischer, Lignum, Zurich (chap. 6)
- P. Matt, ingénieur-conseil, Ittigen

Nous remercions ici tous les spécialistes, qu'ils soient praticiens, enseignants ou chercheurs, pour leurs précieuses informations et leurs conseils avisés.

Supervision de la traduction pour la Suisse romande:

- M. Lugeon, bureau d'ingénieurs Rochat-Lugeon, Cossonay-Gare

Ce document a été édité grâce au soutien des organismes suivants:

SIA Société suisse des ingénieurs et des architectes

UTS Union technique suisse

VSS Union suisse des professionnels de la route

Traduction

Transcript, 1113 Saint-Saphorin sur Morges

Mise en page et photocomposition

Consortium DAC / City Comp SA, Lausanne et Morges

ISBN 3-905234-32-7

Edition originale: ISBN 3-905234-14-9

Copyright © Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, 1993.

Reproduction partielle autorisée avec mention de la source.

Diffusion: Coordination romande du programme d'action «Construction et Energie» EPFL-LESO, Case postale 12, 1015 Lausanne (N° de commande 724.455 f).

Form 724.455 f 5.93 2000 U11793

Avant-propos

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

PI-BAT – entretien et rénovation des constructions
RAVEL – utilisation rationnelle de l'électricité
PACER – énergies renouvelables

Ces trois programmes d'impulsion 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'impulsion 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 architectoniques 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.

Les objectifs de PI-BAT seront poursuivis 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, Gustave MARCHAND, Ernst MEIER, Niklaus KOHLER, Andreas SCHMID, Dieter SCHMID, Rolf SAEGESSER, 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.

Documentation

Le présent document traite des systèmes de protection des ouvrages de génie civil; il met l'accent sur les travaux d'entretien et de renouvellement et présente une vue d'ensemble des systèmes de protection adaptés aux divers matériaux et modes de construction. On y parle d'ouvrages en béton, en acier, en bois et en pierre naturelle, tous matériaux susceptibles de vieillir et de se dégrader. Les systèmes de protection servent à préserver les matériaux menacés, de sorte que les ouvrages puissent continuer à répondre à leur vocation. La brochure que vous tenez entre les mains contient de nombreuses indications sur les systèmes de protection

existants, les mécanismes de vieillissement et de dégradation, la surveillance et l'entretien, ainsi que sur l'entretien et le renouvellement des systèmes de protection.

En théorie comme en pratique, les métiers du bâtiment ont l'habitude de travailler séparément. Événement réjouissant: pour cette brochure, des experts de tous bords ont œuvré main dans la main. Il en est ressorti que la problématique de l'entretien n'est pas aussi cloisonnée qu'on ne l'imaginait: l'expérience des uns peut largement servir aux autres. Ces travaux ont également permis de mettre le doigt sur des inconnues: par exemple, quels sont le comportement et la longévité de tel ou tel système de protection? Il est à souhaiter, pour les hommes de terrain, que des organismes ad hoc puissent, à l'avenir, se préoccuper exclusivement de sujets de ce genre. Notre économie en ressentirait les effets bénéfiques.

Le présent document a fait l'objet d'une procédure de consultation, il a également été soumis à l'appréciation des participants au premier 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.

Dr Heinz Kneubühler
Directeur suppléant de
l'Office fédéral des questions
conjoncturelles

Sommaire

1.	Introduction	7
1.1	Généralités	9
1.2	But de la documentation	9
1.3	Public-cible	11
1.4	Les sujets	12
2.	Bases	19
2.1	Les normes et ce qui s'y rapporte	21
2.2	Directives et ordonnances légales	23
2.3	Sollicitations, mécanismes de vieillissement et de dégradation	25
2.4	La garantie de qualité	27
2.5	Le respect de l'environnement	28
2.6	Les édifices à protéger	29
3.	Exigences relatives aux systèmes de protection et critères de choix	31
3.1	Généralités	33
3.2	Exigences principales des systèmes de protection	34
3.3	Considérations, à l'aide d'un exemple, sur la spécificité d'un ouvrage et de ses matériaux	36
4.	Construction en béton	45
4.1	Généralités	47
4.2	Les systèmes de protection selon leur genre	47
4.3	Mécanismes de vieillissement et de dégradation	52
4.4	Remise en état du béton et de l'armature	55
4.5	Dispositifs d'étanchéité	80
5.	Construction métallique	101
5.1	Généralités	103
5.2	Mécanismes de vieillissement et de dégradation	106
5.3	Types de protection anticorrosion	110
5.4	Surveillance et entretien	116
5.5	Renouvellement	116
6.	Construction en bois	119
6.1	Généralités	121
6.2	Mécanismes de vieillissement et de dégradation	122
6.3	Éléments constructifs	125
6.4	Les mesures de protection et leurs effets	129
6.5	Surveillance, entretien et rénovation	134
7.	Construction en pierre naturelle	137
7.1	Généralités	139
7.2	La construction et la maçonnerie en pierre naturelle	140
7.3	Mécanismes de vieillissement et de dégradation	146
7.4	Surveillance	149
7.5	Entretien et rénovation	150

8.	Bibliographie	155
----	---------------	-----

9.	Annexes	161
9.1	Index des abréviations	161
9.2	Crédit photographique	161

	Publications du programme d'impulsions PI-BAT	163
--	---	-----

1. Introduction

1.1	Généralités	9
1.2	But de la documentation	9
1.3	Public-cible	11
1.4	Les sujets	12

1. Introduction

1.1 Généralités

Les besoins en entretien du bâtiment croissent au fur et à mesure que passent les années. Selon de récentes estimations, la remise en état du parc immobilier suisse (travaux publics et génie civil) représente des travaux d'un montant de 300 à 400 milliards de francs. Le patrimoine doit être préservé. Un nombre toujours accru de bâtiments et d'ouvrages doivent être rénovés tour à tour – ne serait-ce, dans certains cas, que parce qu'ils ne sont plus sûrs ni fonctionnels.

Si l'on considère que les ouvrages de génie civil ont une longévité moyenne de 50 à 100 ans, cela revient à dire qu'il faut investir annuellement de 4 à 8 milliards de francs en travaux d'entretien et de renouvellement. Or l'on n'y consacre, à l'heure actuelle que 2,5 milliards.

L'objectif du programme d'impulsion «Entretien et rénovation des constructions» est de contribuer à l'échange de connaissances en la matière. Notre démarche principale consiste à collationner et à retravailler toutes les données importantes – qu'elles soient suisses ou étrangères – pour les rendre accessibles aux hommes de terrain.

1.2 But de la documentation

Cette brochure fait, pour la première fois, le point sur l'état des connaissances en matière de systèmes de protection destinés à divers matériaux et modes de construction qui sont du ressort du génie civil. Nous axons essentiellement nos propos sur l'entretien et le renouvellement des protections des ouvrages existants. Nous donnons également des indications sur des expériences qui ont été faites et dont il faut tenir compte lors de nouvelles constructions. On devrait ainsi éviter de continuer à choisir des solutions inadéquates et souvent onéreuses qui nous condamneraient à nous retrouver constamment devant les fâcheux problèmes qui se posent aujourd'hui.

La documentation qui suit explique comment protéger les structures porteuses d'hier et de demain, comment concevoir et exécuter les travaux nécessaires. La notion de planification revêt ici une importance particulière. Il faut absolument renoncer aux solutions boiteuses et se dissocier de la «politique du sparadrap». Protéger correctement un bâtiment contre les incidences de son environnement, voilà une des grandes responsabilités dévolues aux ingénieurs.

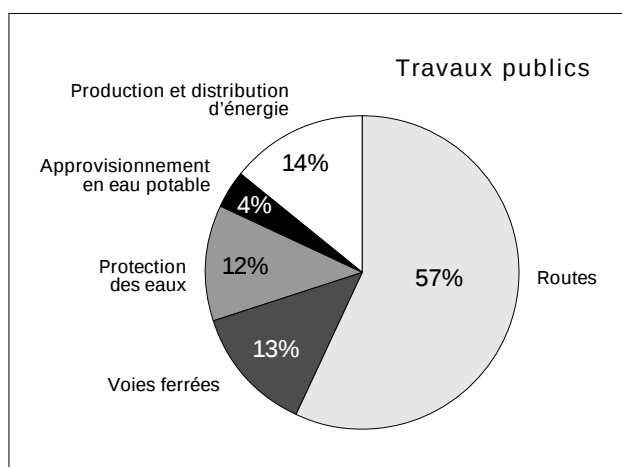


Figure 1.1: Parts, en pourcent, des travaux les plus importants

(Source: Office fédéral des statistiques)

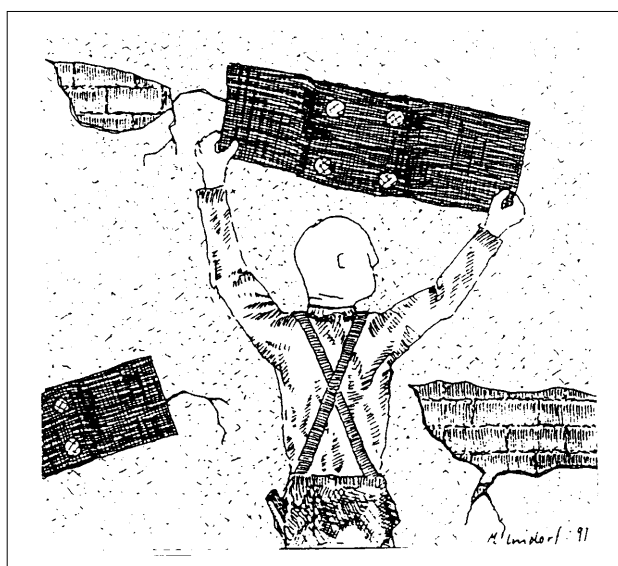


Figure 1.2: Rénover n'est pas bricoler

La réflexion doit débuter dès la conception. C'est lors de l'élaboration du plan d'utilisation qu'il faut dégager les problèmes et définir exactement les objectifs de la protection.

Il faut ensuite traduire ces considérations en termes d'exigences de qualité du produit et des procédés, ce qui conduit à concevoir un appel d'offres très détaillé. Il ne s'agit pas de citer ou de préconiser tel procédé ou tel produit qui vient de sortir, mais bien plutôt d'indiquer les conditions-cadres de leur choix et de leur surveillance ultérieure.

Les entreprises et les fournisseurs ont ainsi toute latitude de travailler selon leurs propres principes, du moment qu'ils parviennent à fournir un travail conforme aux exigences. D'où l'importance de fixer, dans les documents de soumission déjà, des critères de qualité précisément définis. Les entreprises doivent connaître tous les critères relatifs aux prix, aux délais, à la qualité et aux contrôles de qualité. C'est ainsi seulement qu'elles seront en mesure de remettre une offre acceptable et que l'on évitera les plus-values, les dépassements budgétaires et les délais constamment ajournés. Voilà pourquoi l'ingénieur responsable d'un projet doit poser des exigences élevées, non seulement quand il s'occupe d'une nouvelle construction, mais surtout quand il doit planifier l'entretien d'un ouvrage existant.

Dans le cas des ouvrages dont nous allons parler, l'ingénieur traite en principe avec un maître de l'ouvrage (qui est lui aussi un professionnel) ou, à défaut, avec une personne qui le représente. Puisque le rôle de cet interlocuteur est déterminant dès l'établissement des objectifs de qualité, on veillera à établir avec lui un dialogue fructueux.

Notre documentation doit contribuer à éclairer les aspects que nous avons cités, et à donner des indications sur les objectifs de protection ainsi que les critères relatifs aux matériaux et à l'exécution des travaux.

Cette brochure s'appuie sur les manuels publiés par les groupes de travail «Planification de travaux sur les routes à grand débit» et «Méthodes de diagnostic»:

- Maintenance des routes à grand débit en exploitation, N° 724.452f, 1991, [1.4]
- Techniques d'auscultation des ouvrages de génie civil, N° 724.453f, 1991, [1.5].

Les mesures de protection d'un ouvrage existant doivent obligatoirement être précédées d'une évaluation suffisante de la situation. C'est ensuite seulement que l'on déterminera les mesures de remise en état et de renouvellement (fig. 1.3).

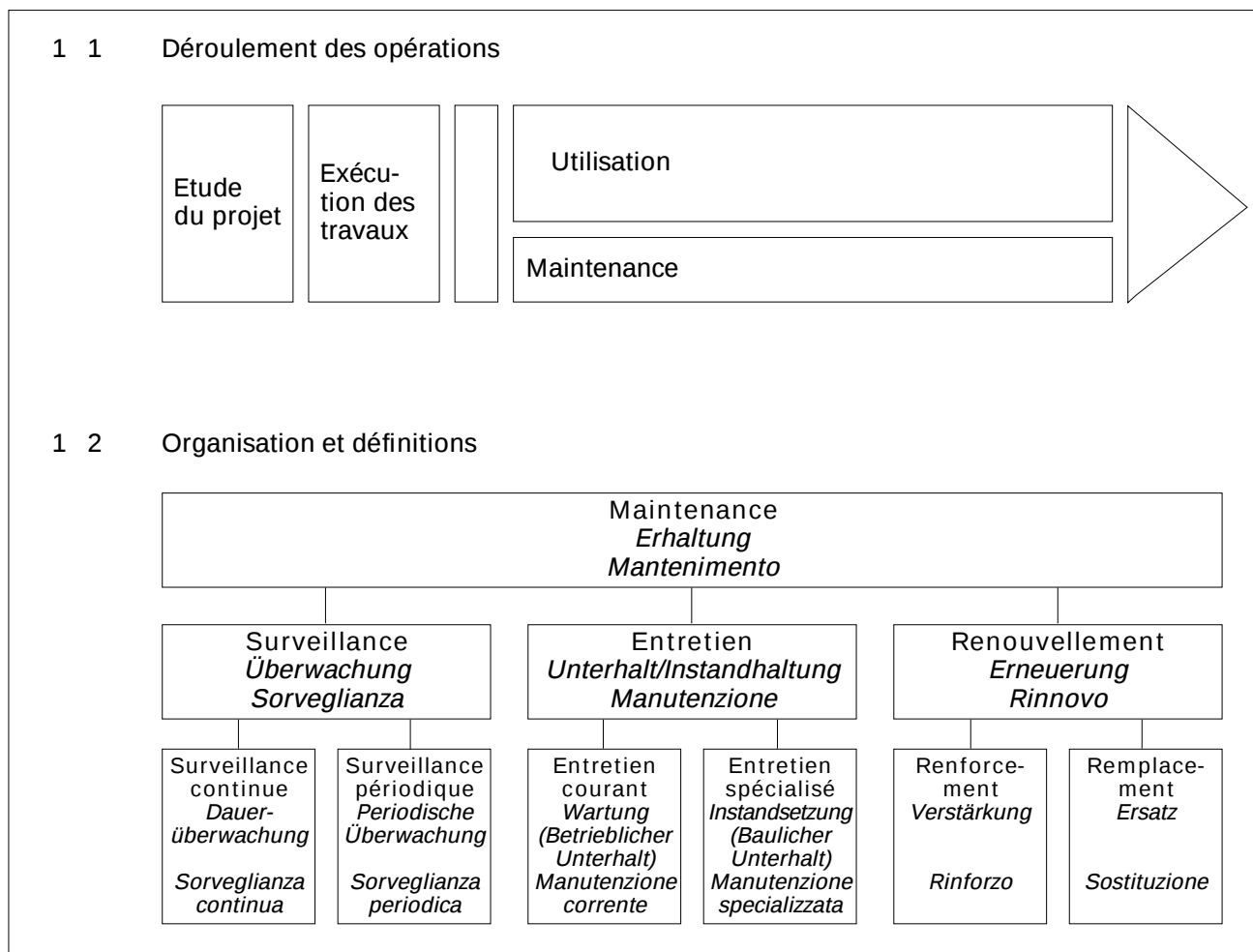


Figure 1.3: Les concepts de la maintenance des ouvrages de génie civil selon la recommandation SIA 169 (1987)

1.3 Public-cible

Notre documentation s'adresse en premier lieu aux ingénieurs de projet et à ceux qui dirigent les chantiers – qu'ils travaillent dans un bureau d'ingénieurs, dans une entreprise ou dans l'administration –, en d'autres termes à des hommes de métier qui, sans forcément être spécialisés à outrance, se voient confrontés quotidiennement à divers problèmes qui relèvent du génie civil et qu'ils doivent résoudre dans les meilleurs délais. Ce manuel leur fera découvrir l'essentiel des

thèmes abordés. Sa lecture attentive, complétée de l'étude de la littérature mentionnée en annexe, leur permettra de mieux maîtriser ces matières.

L'ingénieur de projet doit être capable d'élaborer les mesures qui s'imposent en matière d'entretien spécialisé et de renouvellement; il doit également savoir concevoir des ouvrages en fonction de leur entretien futur.

Quant à l'ingénieur directeur des travaux, il doit garder présent à l'esprit tout ce qui se rapporte à l'exécution des dispositifs de protection. C'est pourquoi

nous traitons ce sujet en fonction de l'importance qu'il revêt, tant au moment du projet qu'à celui de la réalisation. Notre intention n'est pas ici d'initier les exécutants aux méthodes de rénovation, ni même de proposer un perfectionnement à ceux qui sont déjà des spécialistes en la matière.

A propos du langage de la construction.

Les auteurs sont conscients qu'ils s'adressent aussi à des femmes. Il faudrait pouvoir s'adresser à elles en termes adéquats. Or, dans le domaine du bâtiment, les formulations ont toujours été fortement empreintes de machisme. Peu désireux de forger des néologismes, nous utiliserons dans ce document la langue traditionnelle de la profession. Nous souhaitons que nos collègues féminines ne s'en sentent point offusquées.

1.4 Les sujets

Tous nos édifices sont soumis à d'innombrables incidences qui, chacune à sa manière, peuvent affecter leur longévité et donc leur valeur. On a constaté que les nuisances vont en augmentant. Il suffit, pour s'en rendre compte, de penser aux monuments historiques: ils ont traversé les siècles sans grand dommage, et ce n'est qu'au cours de ces dernières décennies qu'ils ont véritablement commencé à souffrir [1.3]. La plupart de ces ouvrages sont bâtis en pierre naturelle, un matériau qui, certes, vieillit naturellement, mais qui craint tout particulièrement les composants agressifs que peuvent contenir l'air ambiant ou la pluie. La surface de la pierre s'érode à tel point que ce sont les contours de l'édifice tout entier qui s'en voient progressivement transformés.

Mais il existe aussi des constructions plus récentes dont les façades s'abîment après quelques années d'existence seulement.

Il est donc temps de penser à prendre des mesures de protection, tant pour les merveilles culturelles que pour les constructions plus récentes qui sont déjà menacées par l'érosion. Ce souci, d'ailleurs, ne doit pas nous dispenser de chercher à maîtriser les nuisances. Il a été possible, dans bien des cas, de

réduire la pollution (p. ex. réduction du SO₂ dans l'atmosphère). Toutefois, la présente documentation est axée essentiellement sur la protection du bâtiment et la prolongation de sa longévité.

Nous nous demandons aussi de quels matériaux il fallait parler. Pour faire pièce à la segmentation toujours croissante de la connaissance et de l'expérience en une foule de microdomaines spécialisés, nous avons choisi de ne pas nous contenter de nous concentrer sur le béton (matériau quantitativement le plus important), mais de nous préoccuper aussi de l'acier, du bois et de la pierre naturelle.

Tous ces matériaux possèdent, jusqu'à un certain point, leur propre protection naturelle ou peuvent, pour le moins, empêcher l'infiltration de certains liquides. Chaque matériau possède ses propres capacités protectrices; par exemple, un réservoir en béton est étanche à l'eau, mais il faut prévoir une protection additionnelle si l'on veut le rendre étanche au mazout.

Il existe donc deux niveaux: d'une part la propre capacité protectrice du matériau ou de la technique de construction, et d'autre part les systèmes de protection additionnels.

Les dispositifs de protection additionnels peuvent être les suivants (fig. 1.4 et 1.5):

- une protection de surface (enduit, revêtement, chape, imprégnation, etc.);
- une étanchéité (lés d'étanchéité, films isolants, etc.);
- un procédé chimique (protection anticorrosive cathodique, etc.).

Pour assurer la longévité d'un ouvrage, on ne se contentera pas de prévoir ses systèmes de protection, mais on appliquera également les méthodes de construction adéquates et on envisagera sa surveillance et son entretien.

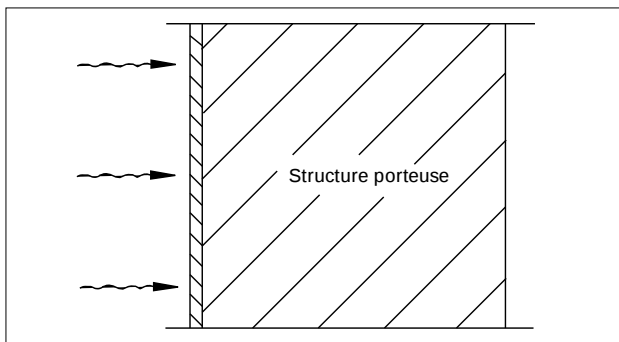


Figure 1.4: Des systèmes de protection appropriés permettent d'empêcher la pénétration de substances indésirables. On prévoit de telles mesures lorsque les capacités protectrices du matériau lui-même s'avèrent insuffisantes

Qu'entend-on par «Ouvrages de travaux publics et de génie civil»?

Comme le montrent les définitions ci-dessous, ces appellations concernent un nombre considérable d'ouvrages qui, néanmoins, se distinguent les uns des autres par leur fonction, leur usage et les sollicitations dont ils font l'objet.

Travaux publics:

A la différence du secteur du bâtiment, les travaux publics se préoccupent des ouvrages placés au niveau du sol ou dans le sous-sol (routes, terrassements, tunnels, voies ferrées, travaux hydrauliques, canalisations, etc.).

Génie civil:

Ce secteur de la construction s'occupe d'ouvrages qui se distinguent par leur réalisation technique et statique (ponts, ouvrages métalliques et en béton armé, maisons-tours, tours, bâtiments industriels, halles, ouvrages hydro-électriques, barrages, etc.).

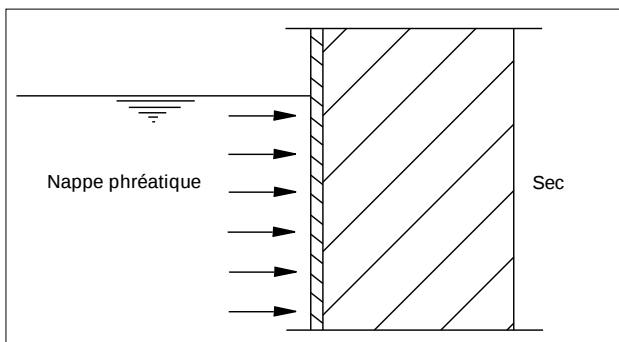


Figure 1.5: Des systèmes de protection appropriés permettent d'empêcher la pénétration de substances indésirables. On prévoit de telles mesures lorsque les capacités protectrices du matériau lui-même s'avèrent insuffisantes

Avant d'aborder chaque sorte d'ouvrage en fonction de ses caractéristiques, voici quelques indications sur des ouvrages particuliers et les principaux objectifs que vise leur protection.

Précisons ici que certaines données de la présente documentation s'appliquent aussi au secteur du bâtiment. Nous pensons en particulier à l'isolation de toits plats ou à la protection de façades en béton, en pierre naturelle et en bois.

Cuves étanches (fig. 1.6 et 1.7)

Il s'agit en principe d'ouvrages récents dont l'apparition du béton a permis la réalisation.

Faisons une première digression au sujet de la méthode de construction en béton armé. Une cuve étanche peut se concevoir de deux façons:

- cuve en béton étanche à l'eau (parfois appelée «cuve blanche») conçue, lorsque c'est possible, comme une structure monolithique, de sorte à n'avoir que peu ou pas de joints (qui posent très souvent des problèmes de longévité);
- cuve recouverte d'un film isolant souple ou rigide.

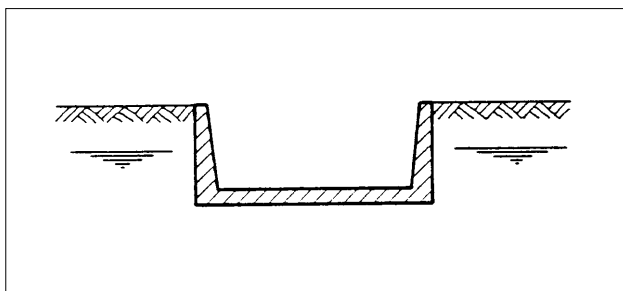


Figure 1.6: Passage inférieur, ou route en tranchée:

- A l'intérieur, protection de l'armature contre le sel de déverglaçage
- Etanchéité du point bas aux eaux souterraines (e.a. formation de verglas sur la chaussée)

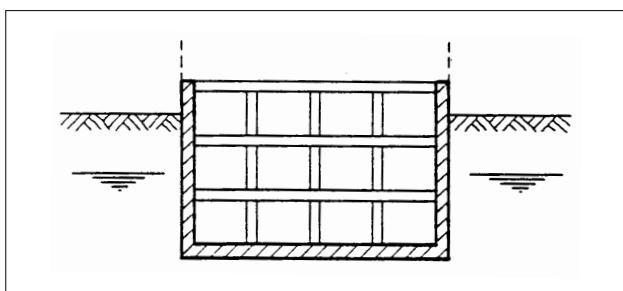


Figure 1.7: Sous-sol d'une maison-tour

- Etanchéité des parois extérieures et des dalles de béton (il peut y avoir des exigences supplémentaires concernant l'humidité c'est-à-dire que même s'il n'y a pas d'infiltrations visibles, l'humidité est encore trop élevée par rapport à l'usage prévu)
- Protection des surfaces extérieures contre les impuretés que contient l'eau et qui risquent d'attaquer le béton ou l'armature métallique

Ouvrages enterrés (fig. 1.8)

Ce que nous avons dit au sujet des cuves est également valable ici, à la différence qu'une aire supérieure mal ou non isolée peut compromettre le bon fonctionnement de l'ouvrage, mais surtout entraîner des problèmes de résistance qui sont invisibles. Les plafonds plats en béton armé ou précontraint sont les plus courants; dans ce cas, l'armature supérieure joue un rôle déterminant, notamment dans l'apparition de perforations. En

effet, si la protection est insuffisante, l'armature peut rouiller au point d'entraîner la formation de perforations locales puis un collapsus progressif, avec les conséquences catastrophiques qu'on imagine. La même remarque est valable pour le radier dans la mesure où il se trouve exposé à des substances agressives en provenance du sous-sol.

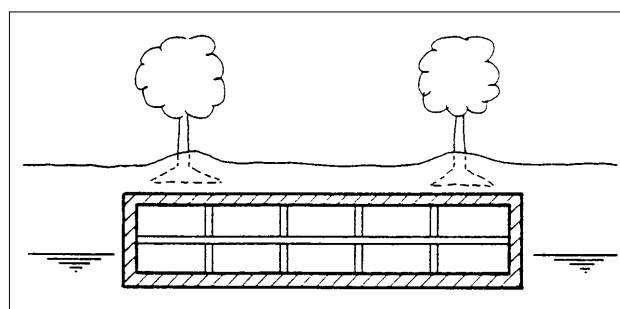


Figure 1.8: Parking souterrain, gare souterraine, etc.:

- Etanchéité des parois extérieures et du radier
- Protection du béton et de l'armature de la dalle de couverture
- Protection des éléments intérieurs contre les atteintes dues au sel de déverglaçage

Ouvrages de soutènement (fig. 1.9 et 1.10)

Ces ouvrages sont généralement réalisés soit en béton armé, soit en pierre naturelle, soit encore, à l'étranger, en palplanches métalliques.

On peut assurer ces ouvrages de soutènement à l'aide de tirants d'ancrage en terrain meuble ou de boulons d'ancrage. Les éléments en traction de ces ancrages sont faits en métaux à haute résistance qui, de par leur matière et l'effort qu'ils subissent constamment, s'avèrent très sensibles à la corrosion; il faut donc les protéger avec un soin tout particulier.

PI-BAT abordera dans une autre brochure la question des éléments en traction fabriqués en acier de précontrainte, comme les fils étirés, les torons et les barres écroûies.

Galeries de protection (fig. 1.11 et 1.12)

Ces galeries sont généralement réalisées en béton armé (coulé sur place ou préfabriqué). Les éléments de couverture peuvent également être en béton, quoique les plafonds de certaines galeries aient été réalisés en construction mixte.

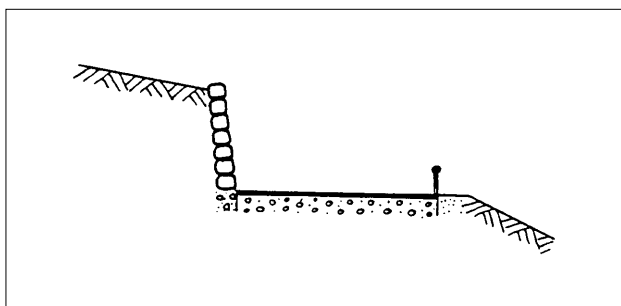


Figure 1.9: Mur de soutènement caractéristique en pierre naturelle:

- protection de la surface de la pierre et des joints contre les éléments agressifs de l'air et de l'eau de pluie, et contre la projection d'eau contenant du sel de déverglaçage

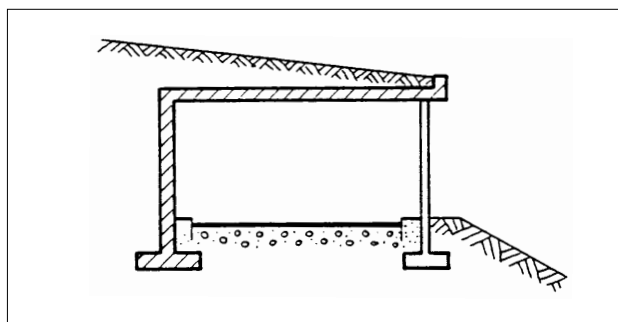


Figure 1.11: Galerie de protection comportant une file de piliers:

- étanchéité du système de toiture (e.a. empêcher la formation de glaçons sous la toiture et de verglas sur la chaussée)
- protection des éléments de construction contre les effets du sel de déverglaçage

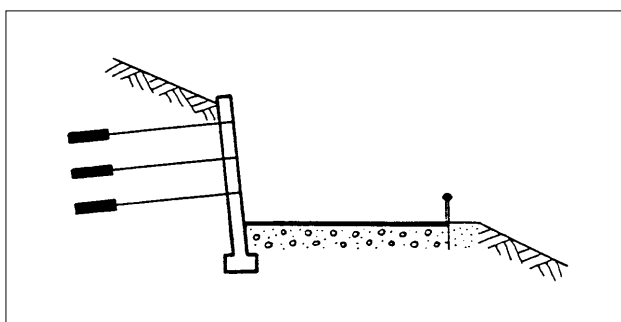


Figure 1.10: Mur de soutènement ancré en béton armé:

- protection de la paroi contre les éléments agressifs de l'air et de l'eau de pluie, et contre la projection d'eau contenant du sel de déverglaçage
- protection des ancrages au sol et des boulons d'ancrage permanents et précontraints et cela globalement, c'est-à-dire de la cape de protection jusqu'à l'autre extrémité (voir à ce sujet [1.4])

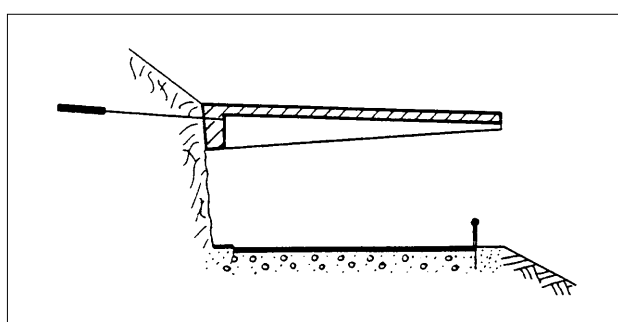


Figure 1.12: Galerie de protection ancrée en encorbellement:

- étanchéité du système de toiture (e.a. empêcher la formation de glaçons sous la toiture et de verglas sur la chaussée)
- protection des éléments de construction contre les effets du sel de déverglaçage
- en ce qui concerne l'ancrage, voir les indications données sous «Ouvrages de soutènement»

Ponts (fig. 1.13 à 1.16)

Ils réunissent à eux seuls tous les matériaux dont il est question dans cette brochure: aux ponts anciens en bois ou en pierre naturelle, et aux ponts ferroviaires métalliques du siècle dernier, ont succédé les ponts en béton de cette fin de millénaire – en béton armé d'abord, puis, ces dernières décennies, en béton précontraint. Ces années passées, on s'est remis à s'intéresser au bois pour l'édification de ponts. Ces ouvrages démontrent à l'envi l'importance que revêt la conception si l'on veut jouer la carte de la longévité; on peut par exemple protéger les structures porteuses par une toiture.

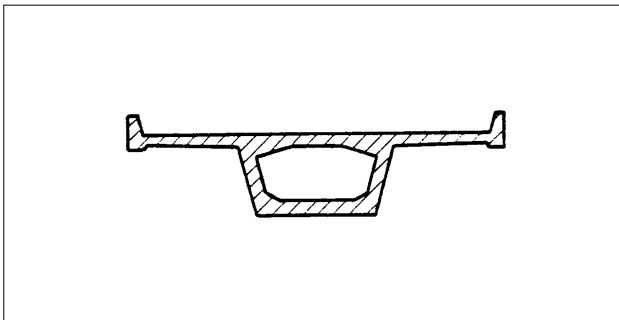


Figure 1.13: Pont en béton précontraint, destiné au trafic routier ou ferroviaire:

- protection des éléments de construction exposés aux effets de l'eau et du sel de déverglaçage; protection de la dalle de roulement, des garde-corps, ainsi que des piliers et des fondations si la base du pont est voisine d'une autre route

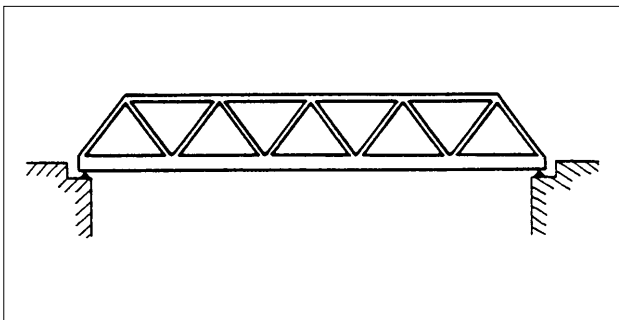


Figure 1.14: Pont métallique ferroviaire:
– protection anticorrosion de la structure métallique

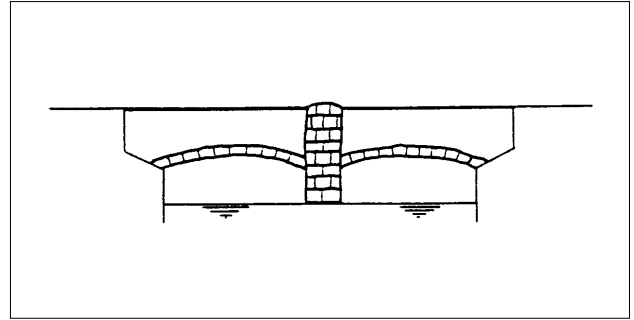


Figure 1.15: Pont en pierre naturelle:

- protection de la surface et des joints contre les éléments agressifs qui se trouvent dans l'air et dans l'eau de pluie; protection de la voie de roulement et des parapets contre les atteintes du sel de déverglaçage

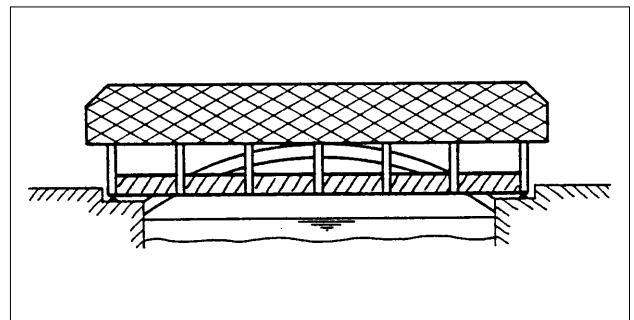


Figure 1.16: Pont en bois:

- protection de la structure porteuse contre les substances attaquant le bois

Tunnels (fig. 1.17 à 1.19)

Les tunnels, creusés pour la plupart au siècle dernier pour assurer le trafic ferroviaire, sont généralement revêtus de pierre naturelle.

Dans le domaine des réalisations routières et de la construction de nouveaux tronçons ferroviaires, les revêtements et autres éléments ont été faits en béton armé, comme c'est le cas pour les dalles de roulement. Après forage, les tunnels ont été parés de béton coulé sur place ou préfabriqué.

Les tunnels construits à ciel ouvert sont généralement en béton coulé sur place.

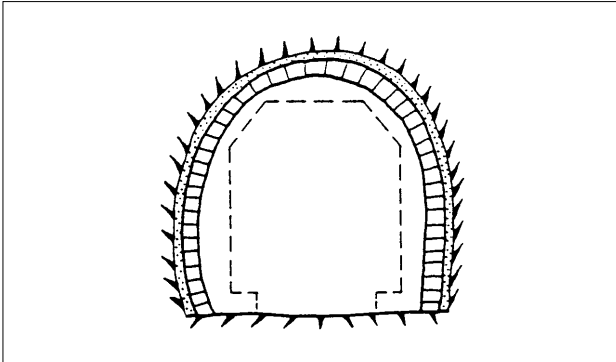


Figure 1.17: Tunnel ferroviaire avec habillage en pierre naturelle:

- protection de la pierre et des joints contre les intempéries
- étanchéité de l'habillage: dans la zone des portails, empêcher la formation de glace dans des joints humides

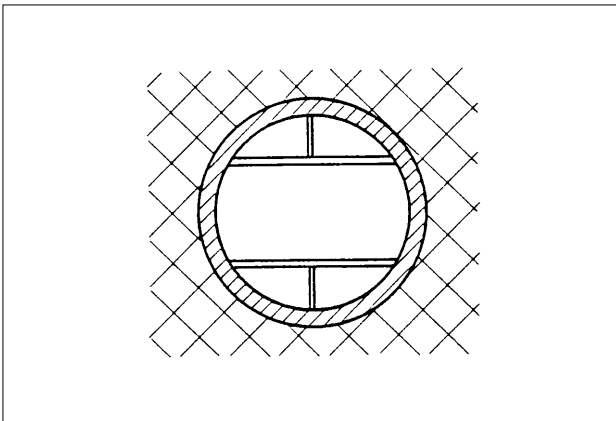


Figure 1.18: Tunnels destinés au trafic ferroviaire et routier:

- protection des dalles de roulement et des autres surfaces internes contre le sel de déverglaçage (tunnels routiers)
- protection des éléments de suspension et de fixation contre la corrosion (pour plus de détails, voir [1.5])
- étanchéité du revêtement en béton armé (particulièrement dans la zone de portails, empêcher la formation de glace dans les joints; ce principe est également valable pour les voies de roulement)
- protection des surfaces externes en béton armé contre les eaux susceptibles d'attaquer le béton et l'acier d'armature

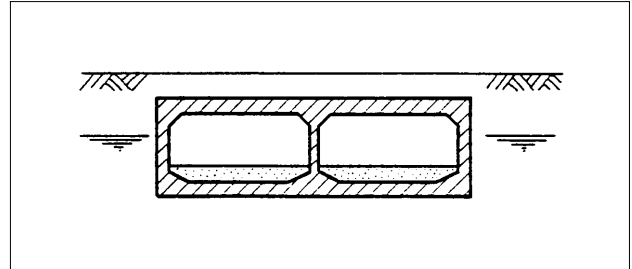


Figure 1.19: Tunnels construits à ciel ouvert et destinés au trafic routier et ferroviaire:

- protection des surfaces intérieures contre le sel de déverglaçage (tunnels routiers)
- étanchéité de la structure en béton armé (empêcher la formation de glace dans les joints et sur la chaussée)
- protection des surfaces extérieures en béton armé contre les eaux susceptibles d'attaquer le béton et l'acier d'armature

Réservoirs pour liquides (fig. 1.20 et 1.21)

Le stockage de l'eau se fait d'habitude dans des réservoirs ou des cuves en béton armé. Il arrive que l'on utilise du béton précontraint pour les réservoirs de grande dimension; dans ce cas, la précontrainte de la ceinture s'exécute à l'aide soit de fils étirés répartis dans les parois, soit de câbles qui ceinturent leur face externe. Dans ce dernier cas, on assure la protection de l'acier précontraint en le recouvrant soigneusement d'une couche de béton projeté.

Pour le stockage de liquides nocifs ou polluants, les réservoirs sont habituellement soit en métal, soit en béton armé muni d'un système de protection, soit encore, exceptionnellement, en bois cerclé. Conformément aux dispositions légales, les grands réservoirs sont équipés de bassins qui assurent la rétention des liquides en cas de défaillance du réservoir principal.

La question des réservoirs est un domaine particulier que nous ne traiterons pas plus avant sous peine de sortir du cadre de notre sujet. Vous trouverez quelques références d'ordre juridique dans le paragraphe 2.2.

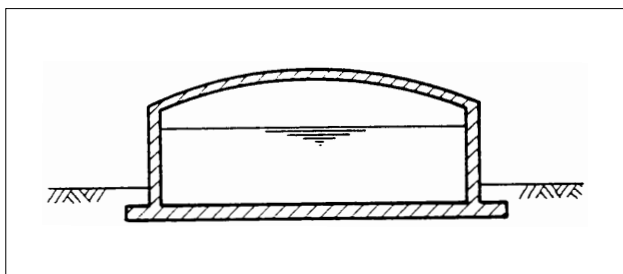


Figure 1.20: Stockage d'eau (réservoirs, piscines):

- étanchéité du réservoir
- protection des surfaces extérieures et intérieures contre les eaux et autres substances susceptibles d'attaquer le béton et l'acier d'armature

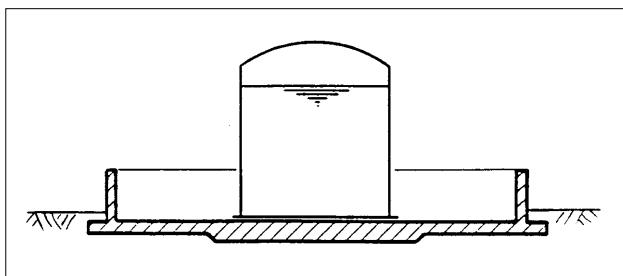


Figure 1.21: Stockage de liquides nocifs et polluants (combustibles liquides, produits chimiques):

- étanchéité des parois du réservoir et du bassin de rétention contre les attaques du contenu et contre les agressions extérieures

La présente documentation ne traite pas des systèmes de protection pour les domaines d'application suivants:

- canalisations d'eaux claires, d'eaux usées, de gaz, etc.;
- éléments en traction en acier précontraint pour fils étirés, ancrages, torons et barres écrouies;
- systèmes de fixation et de suspension en acier.

PI-BAT envisage de traiter ces sujets dans des publications et des cours ultérieurs.

2. Bases

2.1	Les normes et ce qui s'y rapporte	21
2.2	Directives et ordonnances légales	23
2.3	Sollicitations, mécanismes de vieillissement et de dégradation	25
2.4	La garantie de qualité	27
2.5	Le respect de l'environnement	28
2.6	Les édifices à protéger	29

2. Bases

2.1 Les normes et ce qui s'y rapporte

L'avènement d'une nouvelle génération de normes SIA a donné à la Suisse un outil moderne qui tient compte de l'évolution récente et des expériences accumulées pendant ces 15 dernières années [2.1 à 2.6]. La recommandation SIA 169, en particulier, traite de la maintenance des ouvrages de génie civil. Toutes ces normes et ces recommandations ont été présentées aux professionnels à l'occasion de cours d'introduction assidûment fréquentés.

Si de nombreuses innovations n'ont qu'une importance relativement limitée dans le contexte de la présente brochure, il vaut la peine de signaler l'introduction de l'organigramme. Les causes de lacunes dans le secteur du bâtiment ont fait l'objet d'évaluations statistiques qui ont démontré la nécessité d'améliorer l'échange d'informations entre toutes les personnes et les instances concernées par un projet. Cet échange passe par l'élaboration des documents ou des plans spécifiques que sont:

- le plan d'utilisation;
- le plan de sécurité;
- le programme de contrôle;
- les états d'utilisation;

- le programme de surveillance;
- le programme d'entretien.

Pour les ouvrages existants, ces documents – s'il y en a! – ne sont généralement pas disponibles sous la forme requise. Il faut donc les établir au moment où l'on envisage d'entreprendre des mesures d'entretien. Ils serviront à susciter la discussion entre toutes les parties concernées. Ainsi, par exemple, le plan d'utilisation soulèvera les questions suivantes:

- Quelle est la durée d'utilisation de l'ouvrage?
- Y a-t-il un accord à ce sujet?
- Quelles sont les exigences à respecter pour que l'ouvrage soit apte au service?
- Quelles sont les données actuelles sur l'état de l'ouvrage qui peuvent être prises en compte?
- Quelles mesures prendre pour garantir l'aptitude au service?
- Quelles sont les possibilités d'entretien?

L'élaboration de l'ordonnancement doit tenir compte des mesures de protection appropriées.

Les références (en particulier aux normes SIA et de l'Union suisse des professionnels de la route, VSS) qui concernent directement les systèmes de sécurité, figurent dans les chapitres correspondants de la présente documentation.

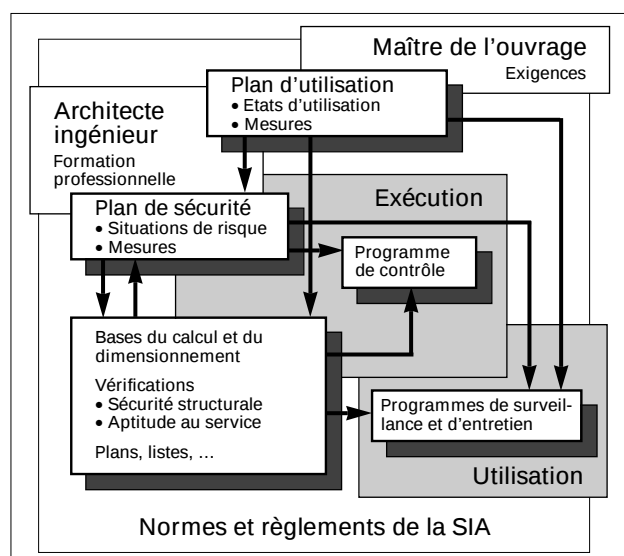


Figure 2.1: Représentation schématique de la conception hiérarchique de l'organigramme

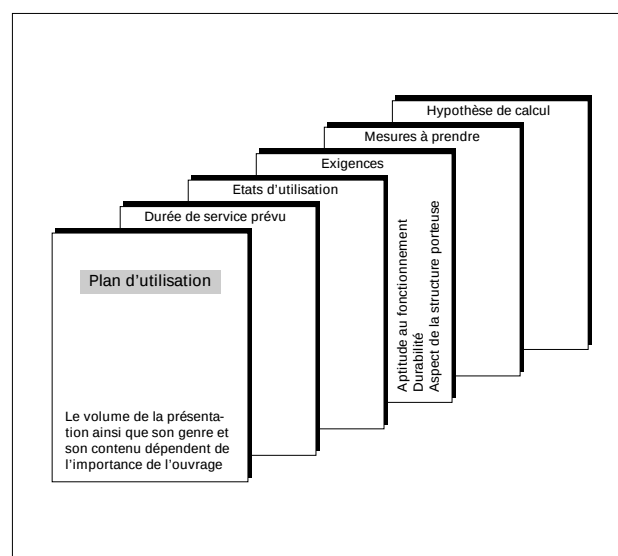


Figure 2.2: Présentation schématique du contenu d'un plan d'utilisation, selon [2.10]

On peut s'attendre à ce que l'harmonisation technique en Europe s'étende prochainement à notre pays. Dans ce contexte, il s'agit de tenir compte de la directive de la CE 89/106 du 21.12.1988. Ce document fixe les exigences relatives à toutes les réalisations du secteur du bâtiment, ainsi que les principes qui régissent la libre circulation des marchandises dans le cadre de la Communauté européenne (et aussi, en cas de signature de l'EEE, dans les Etats de l'AELE). Les exigences seront détaillées dans les normes techniques que publiera le Comité européen de normalisation (CEN). Le CEN est une association de droit privé qui regroupe les associations nationales de normalisation des 18 Etats de la CE et de l'AELE. C'est l'Association suisse de normalisation (ASN), organisation faîtière de la normalisation dans notre pays, qui représente la Suisse au sein du CEN. La SIA tout comme l'Union suisse des professionnels de la route (VSS) font partie de l'ASN; l'une se préoccupe des normes relatives au secteur du bâtiment, et l'autre des normes relatives au secteur routier.

Voici, selon [2.17], quelles sont, pour notre pays, les conséquences de la directive sur les produits du bâtiment:

«Pour la Suisse, la directive sur les produits du bâtiment est importante à plus d'un titre.

D'une part, les maîtres de l'ouvrage dûment mandatés doivent se référer aux spécifications techniques que donnent les directives de la CE sur les fournitures. Ces spécifications s'inspirent de l'art. 10 de la directive sur la coordination dans le bâtiment (89/440/CEE), et plus particulièrement des art. 13 et 27 al. 3 des directives par secteur (90/531/CEE). Si la Suisse adopte les directives sur les fournitures, la directive sur les produits du bâtiment prendra alors une importance accrue. En effet, des appels d'offres qui ne correspondraient pas aux spécifications techniques européennes, pourraient faire l'objet d'une procédure de recours. (Ici, une précision: les ingénieurs et architectes doivent absolument se tenir au courant de l'évolution des normes européennes s'ils sont mandatés pour établir des documents d'adjudication dans le cadre de la CE. Ne pas respecter les normes européennes dans un appel d'offres, c'est risquer des poursuites pour négligence et le paiement d'un dédommagement).

D'autre part, l'Association suisse de normalisation (ASN) est membre du CEN où les travaux sur la normalisation des produits du bâtiment battent leur plein. Dans le cadre de l'ASN, c'est la SIA qui s'occupe des questions du bâtiment.

L'ASN a pris envers le CEN l'engagement de retirer les normes suisses au moment où paraîtront les normes européennes correspondantes; dès lors, les normes européennes influenceront considérablement notre mode de construction, indépendamment d'une éventuelle convention politique entre la Suisse et la CE sur les produits du bâtiment.

De plus, les Etats de l'AELE et de la CE, dans le cadre de leurs négociations, sont à la recherche d'un accord sur les produits du bâtiment. La première démarche de cet accord, c'est que les pays de l'AELE reprendront probablement, sans changement ou presque, les termes de la directive de la CEE sur les produits du bâtiment. Conséquence d'un accord CEE-AELE sur ce point: la libre circulation, dans les 18 pays membres, des marchandises appartenant au secteur du bâtiment».

Depuis quelque temps, le secteur du bâtiment a engendré d'innombrables comités et sous-comités techniques chargés d'élaborer les normes CEN. Certaines sont déjà prêtes, d'autres sont en gestation pour des années encore.

L'élaboration de ces normes concerne aussi, bien évidemment, les systèmes de protection et les produits qui s'y rapportent. Des spécialistes suisses participent aux travaux d'élaboration. Il s'agit de définir les exigences auxquelles ces produits (ou groupes de produits) devront répondre, les tests auxquels ils devront être soumis et les contrôles de qualité qu'ils devront subir pour obtenir le label (Certificat européen) de la CE.

Si un produit porte ce label, c'est qu'il répond aux exigences et peut donc être utilisé dans n'importe lequel des pays membres.

Le label de la CE se présente sous le graphisme suivant:



De plus, le produit doit mentionner:

- le nom ou la marque du fabricant et, le cas échéant;
- des indications sur les caractéristiques du produit, voire certaines informations techniques;
- les deux derniers chiffres du millésime de fabrication;
- la marque de l'instance de surveillance;
- le numéro du certificat de conformité de la CE.

Dans un proche avenir, ce label va certainement acquérir de l'importance dans notre pays aussi, quelles que soient les décisions helvétiques à l'égard de l'EEE ou de la CE.

Liste des directives les plus importantes:

- Office fédéral des routes (OFR):
 - Directives détails de construction des ponts.
 - Directives pour l'utilisation d'armatures passives revêtues de résine époxy, Berne, 1991.
 - Directives pour les projets de tunnels routiers.
- Chemins de fer fédéraux (CFF)
 - Instructions DG 36/89, Règles générales, sections transversales types et détails constructifs de ponts ballastés.
- Société suisse de protection contre la corrosion (SSC)
 - Directives pour la protection des structures métalliques contre les corrosions provoquées par les courants vagabonds d'installations à courant continu, C3.

2.2 Directives et ordonnances légales

Divers maîtres de l'ouvrage public ont édité des directives qui leur sont propres; pour la plupart, ces textes visent à réglementer la planification et l'exécution des nouvelles constructions. Les définitions qu'ils contiennent sont souvent applicables aux mesures d'entretien.

Ces directives déterminent pour une bonne part le choix des systèmes de protection.

Ainsi, l'Office fédéral des routes (OFR) et les Chemins de fer fédéraux (CFF) exigent l'étanchéité des dalles de roulement des ponts.

La liste ci-après vous indique où trouver des directives sur la protection des ouvrages et sur leur longévité; vous pouvez également vous référer à des documents officiels (conditions de concours, notices internes ou brochures techniques). Vous y découvrirez, par exemple, que l'OFR et les CFF exigent que l'armature soit recouverte de 40 mm de béton au moins.

Des associations privées ont, elles aussi, édicté leurs propres directives qui traitent parfois des systèmes de protection.

Comme mentionné dans le paragraphe 1.4, la question des systèmes de protection des ouvrages destinés au stockage de substances nocives et polluantes, constitue un sujet à part que nous nous abstenons de traiter dans le présent ouvrage.

Pour vous aiguiller, nous vous donnons ci-dessous la liste des normes, directives et lois sur la construction de réservoirs. Afin que vous puissiez avoir une vue d'ensemble, nous y avons inclus des ouvrages qui ne traitent pas toujours explicitement la question des systèmes de protection.

Normes, directives et lois sur la construction de réservoirs et d'ouvrages analogues

- Directives de la CARBURA pour le stockage d'hydrocarbures
- Loi sur la protection des eaux (LEaux), en particulier
 - Ordonnance du 28.09.81 sur la protection des eaux contre les liquides pouvant les altérer (OPEL)
 - Ordonnance du 21.06.90 sur les installations d'entreposage et de transvasement des liquides pouvant altérer les eaux (PEL)
- Loi sur la protection de l'environnement (LPE), en particulier
 - Ordonnance du 19.12.1983 sur la prévention des accidents et des maladies professionnelles (OPA)
- Inspection fédérale des installations à courant fort
 - Directives concernant les mesures de sécurité contre les actions dangereuses du courant électrique dans les dépôts autonomes de carburants et dans tous les dépôts de carburants avec raccordements ferroviaires (DeDC)
- Brandschutz-Normen VKF (titre prov.)
- CNA directives, feuillets d'information, publications en particulier
 - Form. 1825
«Règles concernant l'entreposage et le transvasement de liquides inflammables ayant un point éclair inférieur à 55°C»

- Form. 2153
«Principe de prévention des explosions – zones EX»
- Form. 1469
«Caractéristiques de liquides et gaz»
- Form. 1903
«Valeurs limites tolérables aux postes de travail»
- Form. 44006
Feuillets d'information «Garde-corps»
- Normes SIA, en particulier les normes 160, 161, 162 et 183
- Recommandations
 - Loi sur le travail, ordonnance d'exécution III du 26 mars 1969
- Directives de l'ASCP concernant la construction de réservoirs prismatiques en acier
- Directives de l'ASCP concernant le dimensionnement, l'exécution et le contrôle des réservoirs cylindriques à fonds bombés.
- Réservoirs cylindriques verticaux en acier à fond plat.
- Richtlinien für Berechnung, Ausführung und Prüfung von freistehenden, vertikalen, zylindrischen Tanks mit flachen Böden (Stehtanks) und Stahlauffangtassen, SVDB Zürich.

(Selon l'état actuel à notre connaissance)

2.3 Sollicitations, mécanismes de vieillissement et de dégradation

Pour déterminer comment protéger un ouvrage, il faut d'abord savoir contre quoi le protéger et connaître les mécanismes de vieillissement et de dégradation.

Les diverses sollicitations que subit un ouvrage dépendent de son utilisation et de son exposition. Ces sollicitations peuvent être soit naturelles, soit anthropogènes (dus à l'homme et à ses activités).

La notion de vieillissement correspond aux sollicitations naturelles; celle de dégradation, aux sollicitations anthropogènes.

On considère, en principe, que le vieillissement et la dégradation sont dus à des sollicitations externes à l'ouvrage lui-même.

Les sollicitations externes peuvent être les suivantes:

- Charges statiques et dynamiques: poids de la chaussée, poussée du terrain, pression hydrostatique, vent, éboulements, neige, avalanches, etc.
- Sollicitations mécaniques: abrasion, usure mécanique, etc.
- Influences climatiques: variations de température, rayonnement UV, humidité sous forme de pluie, de brouillard, de verglas, etc.
- Effets chimiques: sel de déverglaçage, eaux sulfatées, pluies acides, gaz (O_2 , CO_2), liquides nocifs, etc. Effets électrochimiques dus à des courants vagabonds.
- Influences biologiques: croissance de végétaux, attaques par les champignons destructeurs du bois, micro-organismes, etc.

De plus, certaines sollicitations provoquent des tensions et des dilatations de la structure porteuse; ces effets mécaniques peuvent altérer le comportement de la surface de l'ouvrage.

Les processus de vieillissement et de dégradation ne dépendent pas exclusivement de facteurs externes: ils peuvent avoir une cause endogène (déclenchement interne). Il peut s'agir, par exemple, de la réaction de deux matériaux incompatibles entre eux, de l'utilisation de substances peu stables, ou encore des effets de l'humidité déjà présente dans les matériaux. Dans la pratique, on constate souvent des dégradations dues à la combinaison de facteurs internes et externes.

Si les sollicitations externes se résument généralement aux influences climatiques, l'incidence anthropogène dans ce domaine n'a cessé de croître. Il suffit de penser à la pollution de l'atmosphère par des gaz acides. Le phénomène n'est pas aussi récent qu'on pourrait l'imaginer: en 1240, l'empereur Frédéric II promulguait un édit exigeant que l'on veille à la pureté de l'air, de l'eau et du sol. Quelques siècles plus tard, les Londoniens durent se conformer à une loi qui prohibait la combustion de houille [2.11]. On sait que les édifices en pierre naturelle souffraient de la pollution atmosphérique au Moyen Age déjà. C'est en Angleterre, au 18^e siècle, que l'on découvrit la corrélation entre le soufre dégagé par la combustion de charbon et la dégradation de matériaux de construction comme la pierre et le fer [2.12].

La figure 2.3 montre l'évolution de la valeur de pH dans les précipitations en Suisse. L'évolution de la courbe atteste une nette tendance à l'acidification des pluies, ce qui correspond aux observations effectuées en Allemagne [2.4].

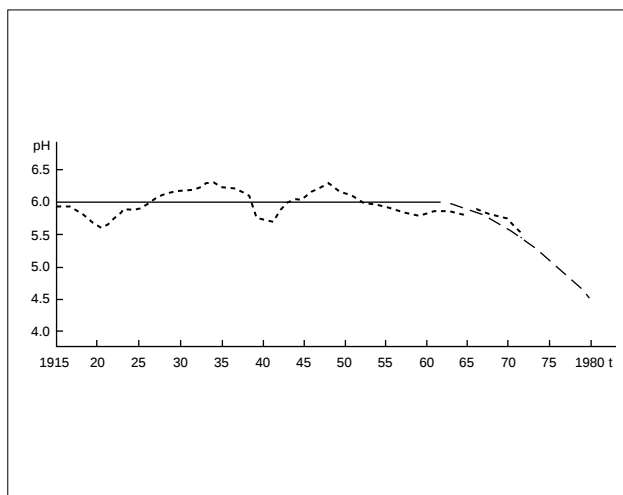


Figure 2.3: Evolution de la valeur de pH dans la glace du Col de Griffeti, 4450 m d'altitude, selon [2.13]
La valeur de pH correspond à la masse de la concentration d'ions d'hydrogène dans une solution:

- eau pure (neutre) val. pH = 7
- solution acide val. pH < 7
- solution basique val. pH > 7

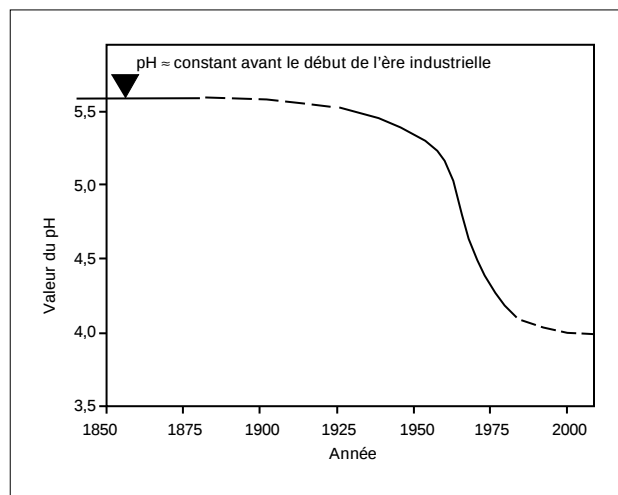


Figure 2.4: Modifications de la valeur de pH de la pluie selon des mesures effectuées par le service allemand de météorologie, selon [4.4]

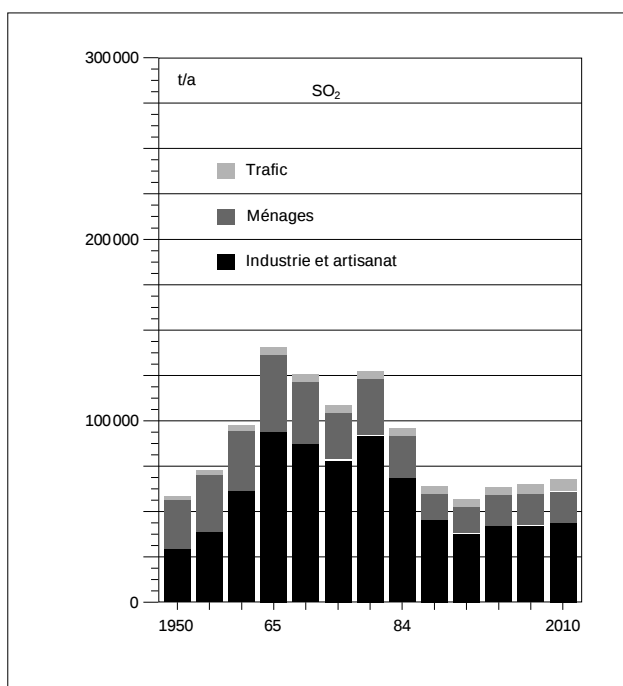


Figure 2.5: Evolution des émissions de dioxyde de soufre de 1950 à 2010 selon [2.14]

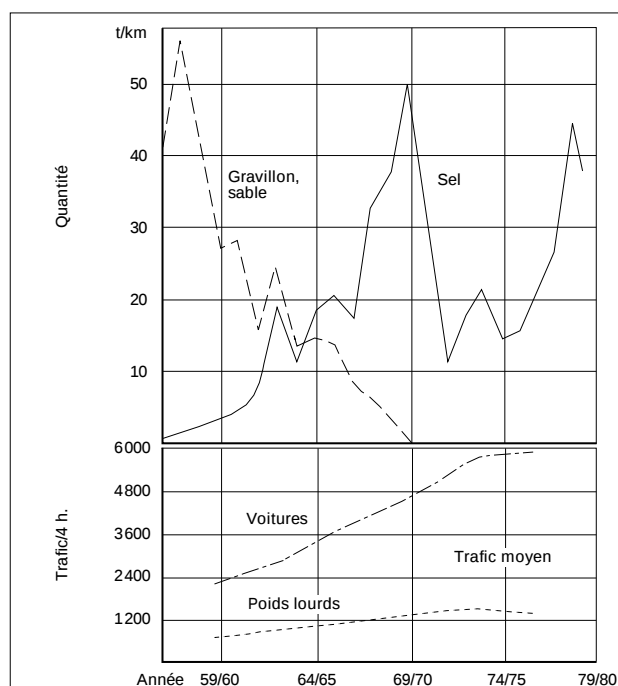


Figure 2.6: Epandage de matériaux et évolution du trafic en Allemagne de 1959 à 1980, selon [4.4]

On peut maîtriser les sollicitations anthropogènes par la législation et par l'utilisation de mesures technologiques appropriées. L'évolution des émissions de dioxyde de soufre, illustrée en 2.5, peut, on le voit, demeurer sous contrôle.

Il est possible de maîtriser l'évolution d'autres nuisances encore.

La figure 2.6 décrit la progression de l'utilisation de sel de déverglaçage. Toutefois, les données manquent dans bien des cas.

Enfin, la relation entre le genre et l'intensité d'une sollicitation et la résistance d'un matériau est très mal connue.

Les mécanismes de vieillissement et de dégradation les plus courants sont:

- La désagrégation, ou effritement
On utilise généralement ces termes en relation avec la pierre naturelle. Ils impliquent la modification superficielle de la pierre par des facteurs externes.
- La corrosion
Dans la bonne acception du terme, la corrosion est la dégradation superficielle d'un matériau par suite de sa réaction chimique à certaines substances de son environnement. Cette notion ne se limite pas à la corrosion des métaux, quoique cette appellation se soit imposée dans la langue courante.
- Le problème des couches limites
Dans une zone de surfaces mobiles où se côtoient puis s'interpénètrent deux substances qui diffèrent par leurs propriétés et leur comportement, il peut survenir des dégradations qui se présentent sous la forme de désagréments. C'est ce qui peut se produire entre une couche de protection et le matériau qu'elle est justement censée protéger.

Pour davantage d'informations sur les mécanismes de vieillissement et de dégradation de tel ou tel matériau, veuillez vous référer aux chapitres correspondants.

2.4 La garantie de qualité

La garantie de qualité (GQ) n'est plus, depuis plusieurs années, une donnée abstraite: elle fait maintenant partie intégrante du paysage industriel. En comparaison de l'industrie, le secteur du bâtiment ne s'en trouve qu'aux balbutiements. Bien sûr, des chantiers spéciaux (centrales nucléaires, plateformes offshore) exigent la notion de GQ. Toutefois, dans ce cadre, l'impulsion décisive n'est pas venue du secteur du bâtiment, mais bien du secteur des machines et des industries nucléaire et pétrolière. Il n'en reste pas moins que la GQ dans le bâtiment bénéficie d'une longue tradition [2.15] dont les premiers témoignages écrits remontent à Hammourabi, roi de Babylone (1727-1686 av. J.-C.).

En Suisse, le secteur du bâtiment est encore peu familiarisé avec la GQ systématique. Si l'on en croit les rapports annuels de la Communauté de travail suisse pour l'encouragement de la qualité (CTSEQ), seuls 10 de ses 700 membres proviennent du milieu du bâtiment.

Ces dernières années, on a vu paraître de nombreuses publications traitant de la GQ et auxquelles nous vous renvoyons [2.16]. La documentation de PI-BAT, elle aussi [1.1], donne des références à ce sujet.

Dans le domaine de la GQ, les normes courantes sont largement dépassées. La figure 2.7 donne une vue d'ensemble des normes ISO correspondantes qui ont été adoptées par la Suisse.

Néanmoins, les notions et les principes d'organisation véhiculés par ces normes ne sont pas directement applicables au secteur du bâtiment. Un groupe de travail de la SIA se penche sur l'adaptation de ces normes à nos corps de métier. Les nouvelles normes SIA sur les structures porteuses, que nous citons dans le paragraphe 2.1, contiennent déjà les principes d'une GQ; elles exigent, par exemple que certains matériaux ou certaines méthodes fassent l'objet d'une surveillance interne de la part de l'exécutant et d'une surveillance externe de la part d'instances de contrôle officielles. Ce qui est déterminant, c'est l'application conséquente de ces mesures dans la pratique quotidienne. Cette application ne peut survenir que si le maître de l'ouvrage pose des conditions précises et si

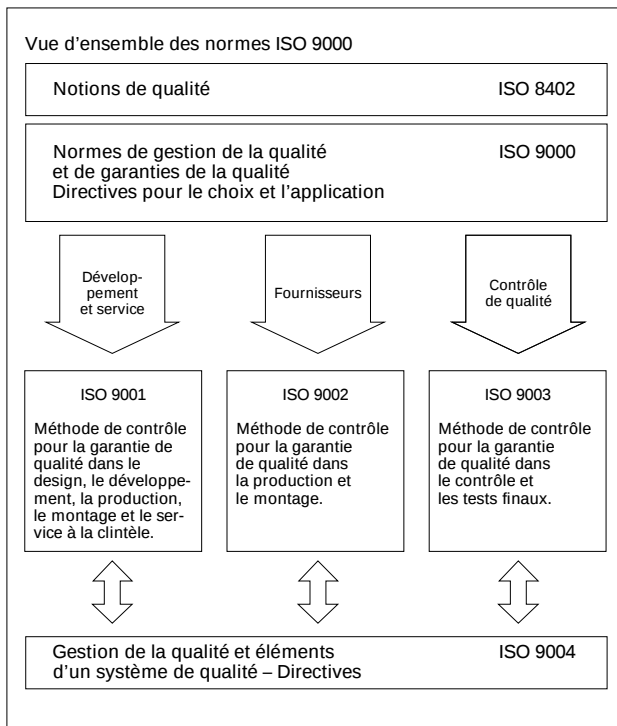


Figure 2.7: Vue d'ensemble des normes ISO 9000 pour la garantie de qualité; elles existent en normes suisses (SN) [2.16]

les entreprises exécutantes (et notamment leur direction) manifestent clairement leur désir de fournir des réalisations de qualité.

Quoi qu'il en soit, le principe de garantie de qualité devrait déborder du cadre de la fabrication et de l'exécution des nouvelles constructions pour s'étendre aux domaines de la gestion de projets et à l'ensemble des travaux d'élaboration. Les outils principaux de cette démarche sont l'organigramme dont nous parlions dans 2.1, une répartition claire des responsabilités et un échange d'informations bien compris.

La planification et l'exécution de mesures d'entretien exigent une longue expérience de l'application des systèmes de protection. Le maître de l'ouvrage doit donc choisir soigneusement les entreprises à qui il confiera tel ou tel travail.

La garantie de qualité coûte cher. On estime que sa part représente de 1% à 5% des coûts globaux d'un ouvrage. Mais une GQ digne de ce nom est également synonyme d'économies: grâce à elle, le maître de l'ouvrage peut s'attendre à une réduction des coûts d'entretien et de rénovation; quant aux entreprises exécutantes, elles éviteront de devoir refaire des travaux insatisfaisants. Voilà pourquoi il faut toujours déterminer le coût de la GQ sur la base du montant global des travaux.

Ce n'est pas en produisant des tonnes de papier et de formulaires que l'on obtiendra une bonne GQ, bien qu'il faille un minimum de prescriptions et de documents. Il ne s'agit pas non plus de se focaliser constamment sur la qualité de ce qui se fait sur le chantier; ce qu'il faut, c'est avant tout adopter une «engineering for quality», c'est-à-dire un mode de pensée prévisionnel et planificateur qui permette de définir précisément les conditions d'exécution des travaux.

2.5 Le respect de l'environnement

Il est certain que les spécialistes du bâtiment vont devoir toujours plus veiller à ce que les matériaux et les méthodes qu'ils utilisent soient compatibles avec la protection de l'environnement.

Les principales bases légales édictées par la Confédération figurent ci-après.

Ces nouvelles ordonnances n'ont, jusqu'ici, eu que peu de répercussions pratiques, mais cela va changer progressivement. Ainsi, les prescriptions européennes imposent par exemple aux professions du bâtiment certaines notions de sécurité et de fiabilité, mais aussi d'hygiène, d'ergonomie et de protection de l'environnement.

Dans les paragraphes qui suivent, nous citons certaines méthodes et certains groupes de produits. Ce n'est qu'exceptionnellement que nous prenons en compte leur compatibilité avec l'environnement. Il existe d'autres publications qui traitent de ce sujet.

Les prescriptions sur le respect de l'environnement influencent déjà la réalisation des systèmes de protection des ouvrages en acier et en bois.

Certains groupes de produits ne doivent plus être utilisés parce que polluants ou nocifs; on a, de ce fait, développé de nouveaux systèmes de protection compatibles avec l'environnement.

Ordonnances légales de la Confédération:

- Ordonnance sur les substances dangereuses pour l'environnement (Osubst) du 9 juin 1986 (état au 1er avril 1991)
Définit la compatibilité des substances avec l'environnement et le comportement à adopter avec des substances polluantes ou nocives. Pose, en particulier, le principe de la responsabilité personnelle (contrôle autonome) du fabricant à l'égard du respect de l'environnement, sans toutefois exiger une déclaration complète de la composition des produits.
- Ordonnance sur la protection de l'air (Opair) du 16 décembre 1986 (état au 1er avril 1991)
Contient, entre autres, la limitation des émissions et la table des substances cancérogènes.
- Ordonnance sur le mouvement des déchets spéciaux (ODS) du 12 novembre 1986 (état au 1er juillet 1991)
Contient la liste des déchets spéciaux.
- Ordonnance sur le traitement déchets (OTD) du 10 décembre 1990
Définit le traitement des déchets selon leur genre (incinération, décharge). Prescrit dans quelles décharges il faut évacuer les déchets (décharge inerte, provisoire, poubelle nucléaire).

2.6 Les édifices à protéger

Avant de commencer à planifier des mesures d'entretien, il s'agit de déterminer si l'ouvrage dont on s'occupe mérite d'être classé monument historique, ce qui permettrait d'éviter certains détours et plus-values. En effet, cette décision peut influencer le choix du système de protection.

Vous trouverez dans le paragraphe 7.5 d'autres considérations sur les monuments historiques en pierre naturelle (entre autres la Résolution de la Société suisse pour la protection des monuments historiques du 14 novembre 1986).

Certains ouvrages modernes en béton ou en acier mériteraient, eux aussi, d'être classés.

3. Exigences relatives aux systèmes de protection et critères de choix

3.1	Généralités	33
3.2	Exigences principales des systèmes de protection	34
3.3	Considérations, à l'aide d'un exemple, sur la spécificité d'un ouvrage et de ses matériaux	36

3. Exigences relatives aux systèmes de protection et critères de choix

3.1 Généralités

Les principes qui figurent dans la norme SIA 160 concernant la planification des structures porteuses, sont applicables pour le choix des systèmes de protection. Ce qui est déterminant en l'occurrence, c'est les exigences de sécurité et d'aptitude au service auxquelles doit répondre la structure porteuse à protéger.

- Sécurité
- Aptitude au service
 - aptitude au fonctionnement
 - durabilité
 - aptitude à l'entretien
 - aptitude au renouvellement
 - aptitude au remplacement (p. ex. du système de protection)
 - aspect

Figure 3.1: Caractéristiques qualitatives et propriétés d'une structure porteuse

En matière de systèmes de protection, l'aptitude au service d'une structure porteuse constitue une donnée essentielle puisque c'est la principale source de problèmes de sécurité. Il faut donc penser aux cas dans lesquels certains éléments de la structure porteuse ne peuvent être testés (ou seulement à grands frais), et où une défaillance du système de protection peut échapper à l'observateur et entraîner à long terme un affaiblissement de la structure porteuse.

Si les caractéristiques qualitatives et les propriétés d'une structure porteuse ne sont pas définies par des normes, elles doivent faire l'objet d'une convention avec le maître de l'ouvrage. A cet égard, les considérations économiques jouent un rôle important.

La figure 3.2 présente schématiquement les facteurs qui amenuisent les qualités d'une structure porteuse au fil du temps. Certaines données, comme la résistance du béton à la compression, peuvent améliorer la configuration de ce schéma. En règle générale, la qualité d'une structure porteuses et de ses éléments pris isolément ne se dégrade pas subitement. Comme à toute règle, il existe des exceptions (chocs, incendie, etc.).

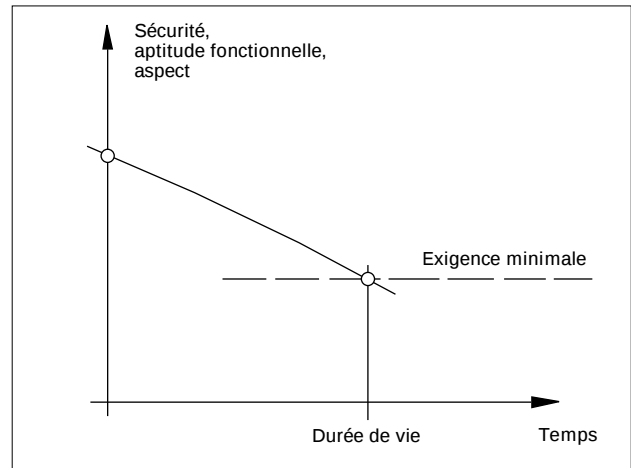


Figure 3.2: Evolution générale des propriétés d'une structure porteuse en fonction du temps

On peut empêcher, ou du moins freiner la régression qualitative en prenant régulièrement des mesures d'entretien; la durée de vie d'un ouvrage (fig. 3.3) est d'autant plus élevée que sa structure porteuse se prête bien à des travaux d'entretien et de renouvellement. A cet égard, la possibilité de remplacer des parties entières d'un ouvrage (p. ex. le système de protection) pèse nettement dans la balance.

La durée de vie d'une structure porteuse ou de ses éléments pris isolément prend fin lorsqu'ils ne correspondent plus à certaines exigences minimales. Si ces exigences minimales ne sont pas définies par des normes, on les établira cas par cas.

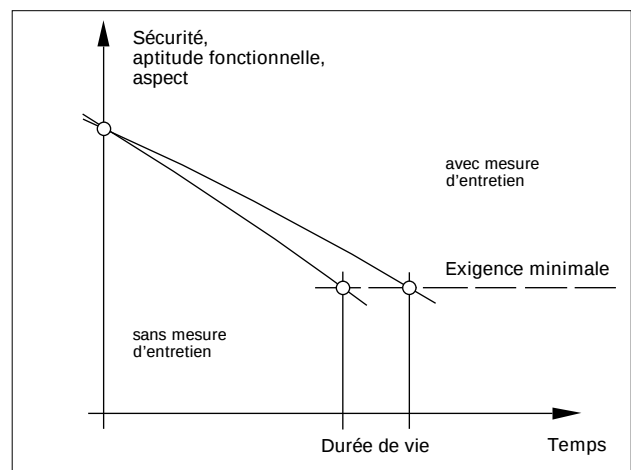


Figure 3.3: Evolution générale des propriétés d'un ouvrage avec et sans mesures d'entretien

3.2 Exigences principales des systèmes de protection

Lorsqu'il est question des exigences posées à une structure porteuse – qu'elle soit ancienne ou à créer –, il faut d'abord établir si les capacités protectrices autonomes de ses matériaux suffisent, ou s'il est nécessaire de prévoir un système de protection additionnel. Les critères de décision en la matière dépendent du genre et de la fonction de la structure porteuse, mais aussi des facteurs suivants:

- durée d'utilisation résiduelle de l'ancienne construction, respectivement durée d'utilisation prévue de la nouvelle construction;
- genre des sollicitations (déterminer, entre autres, s'il est possible, par des mesures appropriées, de réduire ou d'éliminer des sollicitations susceptibles d'entraîner des dégradations);
- prescriptions (lois, normes, prescriptions du maître de l'ouvrage);
- analyse utilité/coûts.

Si l'on se décide pour un système de protection additionnel, il faut le considérer comme faisant partie intégrante de la structure porteuse et agir en conséquence au cours de la planification.

Comme déjà mentionné en 3.1, la présente documentation est principalement axée sur la notion d'aptitude au fonctionnement. Rappelons, une fois encore, qu'il peut exister, dans des cas d'espèce, une relation étroite entre le système de protection et la sécurité porteuse.

Aptitude au fonctionnement et durabilité sont les deux principales qualités d'un système de protection (fig. 3.4). Il s'y ajoute une troisième dans les cas où des critères esthétiques entrent en considération: c'est son aspect. Pour tous les systèmes de protection – sauf pour ceux qui remplissent une

- Aptitude au fonctionnement
 - aptitude au fonctionnement de la structure porteuse
 - durabilité de la structure porteuse
 - aspect de la structure porteuse
- Durabilité
- Aptitude à l'entretien
- Aptitude au remplacement
- Aspect

Figure 3.4: Caractéristiques qualitatives des systèmes de protection

fonction statique –, les exigences porteuses sont relativement secondaires.

Le système de protection doit assurer l'aptitude au fonctionnement de la structure porteuse, sa durabilité et la qualité de son aspect (p. ex. pas de ruissellement d'eau qui défigure l'ouvrage).

Si la durée de vie du système de protection est égale ou supérieure à celle de la structure porteuse, il n'est pas forcément utile d'envisager son remplacement (fig. 3.5). Notons toutefois que des défauts d'exécution peuvent entraîner des répercussions néfastes sur les capacités protectrices du système de protection. D'où la nécessité d'imaginer des stratégies qui permettront de rattraper ces défauts (p. ex. injections, jointoiement de certaines zones d'étanchéité).

Si la durée de vie du système de protection est inférieure à celle de la structure porteuse, on envisagera les mesures nécessaires pour prolonger son existence, de sorte que celle-ci égale ou dépasse celle de la structure porteuse.

Ces mesures sont les suivantes:

- entretien courant;
- remise en état;
- remplacement.

Dans beaucoup de cas, l'entretien courant permet, à lui seul, de prolonger la durée de vie du système de protection (fig. 3.6). Il peut simplement consister à réduire ou supprimer les incidences nuisibles (par un nettoyage régulier des surfaces, l'entretien du système de drainage, etc.).

La figure 3.7 présente schématiquement l'évolution possible de l'aptitude au fonctionnement et/ou de l'aspect d'un système de protection. Ce graphique tient compte des mesures d'entretien et des travaux d'entretien dont bénéficie le système de protection et qui prolongent sa durée de vie (p. ex. injections dans les fissures, entretien des joints, réfections locales du revêtement).

Si la durée de vie du système de protection est inférieure à celle de la structure porteuse, et que des mesures d'entretien courant ou spécialisé ne la prolongeraient guère, il faut alors procéder au remplacement du dispositif. La figure 3.8 présente l'évolution de l'aptitude au fonctionnement et/ou de l'aspect d'un système de protection régulièrement remplacé.

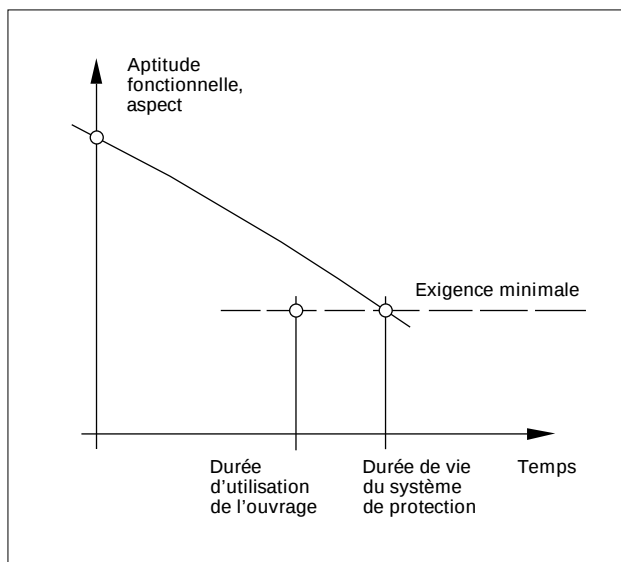


Figure 3.5: Evolution générale des qualités d'un système de protection sans mesures particulières (durée de vie du système de protection supérieure à la durée d'utilisation de l'ouvrage)

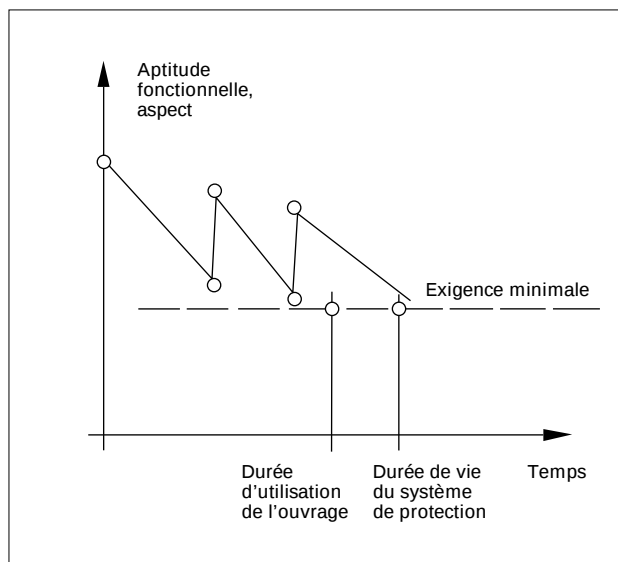


Figure 3.6: Evolution générale des qualités d'un système de protection: l'entretien courant permet de prolonger la durée de vie de l'ouvrage

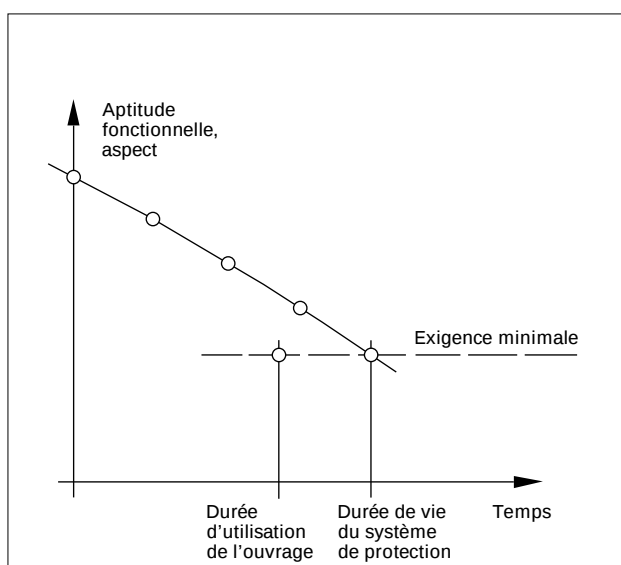


Figure 3.7: Evolution générale des qualités d'un dispositif de protection bénéficiant de mesures d'entretien spécialisé

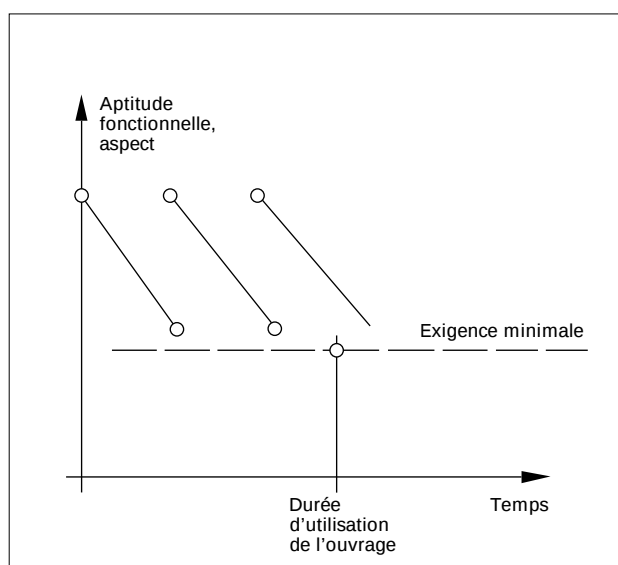


Figure 3.8: Evolution générale des qualités d'un dispositif de protection par son remplacement régulier

3.3 Considérations, à l'aide d'un exemple, sur la spécificité d'un ouvrage et de ses matériaux

Les réalisations que nous allons présenter ci-après nous serviront d'exemple pour exposer quelles sont les considérations qui comptent en matière de systèmes de protection. Nous avons choisi, pour ce sujet, une galerie de protection classique (fig. 3.9). Grâce à elle, les usagers de la route sont à l'abri des avalanches ou des chutes de pierres. Elle présente certaines ressemblances avec les murs anti-bruit qui protègent les bordiers contre les nuisances acoustiques du trafic.

Les considérations que nous allons émettre, tout comme les conclusions que nous tirerons, peuvent s'appliquer par analogie à d'autres sortes d'ouvrages, par exemple à leurs éléments porteurs.

Les considérations qui suivent visent à donner aux ingénieurs de projet des idées qu'ils pourront exploiter et compléter cas par cas.



Figure 3.9: Galerie de protection

Les systèmes de protection des galeries anti-avalanches

La figure 3.10 présente la coupe d'une galerie de protection traditionnelle. Cette sorte d'ouvrage est généralement réalisé en béton armé et le toit en construction mixte.

Pour décider si une galerie doit recevoir des systèmes de protection additionnels, on commence par analyser l'utilisation et la fonction de l'ouvrage – en d'autres termes, on en établit le plan d'utilisation. Une galerie de ce genre sert avant tout à protéger la chaussée des avalanches et des éboulements, et cela dans le cadre d'un temps d'utilisation (resp. résiduelle) donné. Le maintien de la sécurité du trafic exige en outre qu'il n'y ait pas de pénétration d'eau qui entraînerait non seulement l'apparition de verglas sur la chaussée, mais aussi la formation de stalactites de glace au-dessus des voies de roulement. Ces données conduisent à formuler les exigences d'aptitude au service et les exigences de sécurité, en mettant l'accent sur l'aptitude au service dans ce contexte particulier.

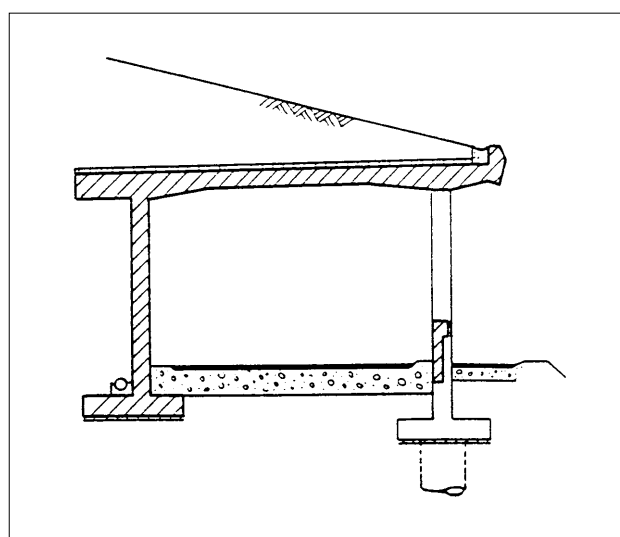


Figure 3.10: Coupe d'une galerie de protection traditionnelle avec une file de piliers côté vallée

Autres critères de décision: le genre des sollicitations et les divers autres paramètres d'affectation que nous avons déjà survolés dans le paragraphe 2.3:

- Charges statiques et dynamiques:
Poids propre, couverture du sol, poussée des terres, pression hydrostatique, avalanches (chute et amoncellement), neige, chutes de pierres, collisions de véhicules.
(A l'exception de la pression hydrostatique, ces données n'ont pratiquement rien à voir avec l'option pour ou contre un système de protection. Au cas où l'on a prévu un système de protection additionnel, il ne faut pas oublier de compter sa charge).
- Sollicitations mécaniques:
Dégradations dues aux véhicules automobiles et aux chasse-neige, pression de la glace, érosion locale en surface.
- Influences climatiques:
Variations de température (déformations), rayonnement solaire, cycle gel-dégel.

- Effets chimiques:
Sel de déverglaçage dans l'eau projetée, eau stagnant au sol et contenant des substances (p. ex. sulfates) susceptibles d'attaquer le métal et le béton, gaz nocifs du trafic.
- Influences biologiques:
Croissance de végétaux (perforation), micro-organismes.

Ce n'est que cas par cas que l'on peut définir les sollicitations qui existent, et à quel degré. Il peut y en avoir d'autres que celles citées dans la liste ci-dessus.

L'étape suivante consiste à définir dans quelle mesure les sollicitations connues peuvent porter atteinte à l'aptitude au fonctionnement à la durabilité et à l'aspect de l'ouvrage. C'est à ce moment-là que l'on décidera si les capacités autoprotectrices du béton armé supporteront ces sollicitations, ou si, au contraire, il faut accorder un système de protection additionnel à certains éléments de la structure porteuse.



Figure 3.11: Bouillie de neige collée aux appuis de la galerie; son effet est comparable à celui d'une projection d'eau



Figure 3.12: A la fin de la période hivernale, on repère très nettement des dépôts de sel le long de la chaussée et sur le trottoir.

Lors de la conception et de l'exécution d'une nouvelle galerie, on s'efforcera de se souvenir des erreurs commises dans le passé et d'en tirer parti pour optimiser l'élaboration de la structure et des détails.

Lorsqu'on se trouve en face d'une galerie existante, on commence par la surveillance et l'évaluation de son état. Ce n'est qu'ensuite que peut commencer la planification des mesures d'entretien.

Les divers éléments porteurs d'une galerie sont soumis à des sollicitations différentes; les exigences varient en conséquence. Nous les avons classées comme suit:

- Toiture, sollicitations venant du haut (extérieures) ①
- Toiture, sollicitations venant du bas (intérieures) ②
- Extrémité de la toiture ③
- Paroi, sollicitations venant de l'extérieur ④
- Paroi, sollicitations venant de l'intérieur, supports ⑤

Toiture d'une galerie Sollicitations venant du haut (extérieures) ①

Les toitures d'une galerie de protection sont presque toujours en béton armé ou en construction mixte. Pour la face supérieure de la toiture, on peut admettre qu'elle est toujours en béton armé. Le tableau ci-dessous présente les sollicitations qui déterminent le choix du système de protection, ainsi que leurs principaux effets sur les caractéristiques qualitatives de l'ouvrage:

Sollicitations	Caractéristiques qualitatives		
	Aptitude au fonctionnement	Durabilité	Aspect
Eau	*	*	*
Eaux sulfatées		*	
Erosion des surfaces		*	
Croissance de végétaux		*	*
Pression de la glace		*	

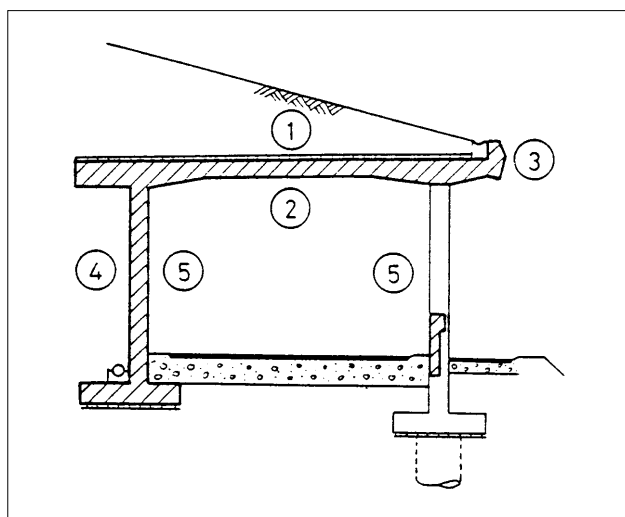


Figure 3.13: Coupe d'une galerie de protection traditionnelle et de ses diverses zones de sollicitation



Figure 3.14: Formation de stalactites de glace à la perforation des joints de dilatation par de l'eau

L'eau ne doit pas traverser la toiture, ce qui porterait préjudice à l'aptitude au fonctionnement de la galerie. En effet, les goutelettes d'eau peuvent former des stalactites de glace et entraîner la formation de dangereuses plaques de verglas sur la chaussée (fig. 3.14).

Le ruissellement de l'eau peut également avoir des répercussions sur l'aspect: taches d'humidité, croissance de végétaux, mousses. En outre, la pénétration d'eau constitue un facteur de corrosion de l'armature, corrosion qui réduit la durée de vie de l'ouvrage et qui peut même, en dernier ressort, compromettre la sécurité porteuse.

La pénétration de l'eau dans le béton armé de la toiture, favorisée par des défauts du béton (nids de gravier, joints de retrait ou bétonnés) permet la formation de fissures. L'intensité de la sollicitation dépend de la pression de l'eau; on peut donc, quand il s'agit de nouvelles galeries, réduire considérablement ce risque en prenant des mesures appropriées, par exemple en posant un drainage ou en ménageant une pente d'écoulement suffisante.

Ces considérations démontrent clairement que la problématique de la pénétration de l'eau ne dépend pas uniquement de l'efficacité d'un système de protection additionnel, mais aussi de beaucoup d'autres détails (existence de joints, de drainages, d'une pente d'écoulement suffisante, etc.), du déroulement de la construction (joints de retrait ou bétonnés), de la qualité du béton, de la composition de l'armature et de la sollicitation statique (fissures).

Exécution d'une toiture de galerie avec étanchéité et joints de dilatation

Les toitures de galerie telles qu'elles ont été exécutées jusqu'à ce jour sont, dans la majorité des cas, des surfaces homogènes séparées par une isolation flexible. Tous les 20 à 25 mètres, on trouve des joints de dilatation qui restent étanches grâce à un système de jointoiement. Pour ce mode de construction très courant, on a choisi un système de protection additionnel qui conjugue l'étanchéité des surfaces, le système de joints de dilatation et la conception de l'extrémité de la toiture. Dans quelques cas, on a renoncé à rendre étanche toute la surface: les joints constituent un système d'étanchéité à eux seuls.

Le système de protection vise à empêcher l'eau de parvenir à proximité des voies de roulement. La question est de savoir comment ces ouvrages ont été menés à bien jusqu'ici. Des enquêtes menées par l'Office fédéral des routes ont montré que les problèmes d'étanchéité ne provenaient pas forcément des revêtements, mais plutôt des joints et des extrémités de toiture (fig. 3.15).

L'état des systèmes de joints des toitures de galeries d'une région de montagne fait l'objet d'une surveillance qui a prouvé que les joints restent étanches pendant 5 à 10 ans. Après 10 à 15 ans, la quantité de joints défectueux augmente dans des proportions considérables; après 30 ans, 80% des joints ne sont plus étanches (fig. 3.16, expériences menées sur la route du Simplon N° 9). L'illustration 3.17 présente des systèmes de joints qui, tous, ont perdu leur étanchéité avec le temps. Voilà la confirmation que les joints peuvent, eux aussi, constituer un point faible.

La remise en état des systèmes de joints défectueux est extrêmement coûteuse. Selon l'état de la galerie de protection à flanc de coteau, et en fonction des sollicitations prévisibles (chute de pierres, avalanches), on opte généralement pour une épaisse couverture de terre qui peut atteindre, côté montagne, une épaisseur de 2 à 3 mètres. On comprend donc mieux pourquoi les travaux de surveillance du système de protection sont compliqués et chers. Dans ces cas, un système de protection peut-il vraiment répondre aux exigences mentionnées dans le paragraphe 3.2 (aptitude à l'entretien et aptitude au remplacement)? La question se pose. Plus la couverture de terre est mince, plus les mesures d'entretien sont aisées, tout en restant coûteuses malgré tout.

Il faudra trouver des solutions nouvelles pour les futures galeries. On pourrait, par exemple, imaginer des structures monolithiques (voir plus bas).

Cela ne signifie pas pour autant qu'il faille renoncer, à l'avenir, à poser des systèmes de protection additionnels. En effet, bien des arguments continueront de parler en leur faveur, ne serait-ce que parce qu'ils s'inscrivent dans le développement d'une stratégie globale d'aptitude des ouvrages à l'entretien et à l'interchangeabilité (pour davantage de précisions, voir 3.1).



Lors de la remise en état des systèmes de joints défectueux, on teste s'il est possible de supprimer les joints de dilatation pour les remplacer par du béton coulé sur place. Ce genre d'intervention, bien sûr, modifie le principe du système; il faut tenir compte de cette situation nouvelle, notamment en relation avec les fondations.



Figure 3.15: Etanchéité endommagée sur la face extérieure de la toiture d'une galerie (côté vallée), et angle paroi/toiture endommagé côté montagne

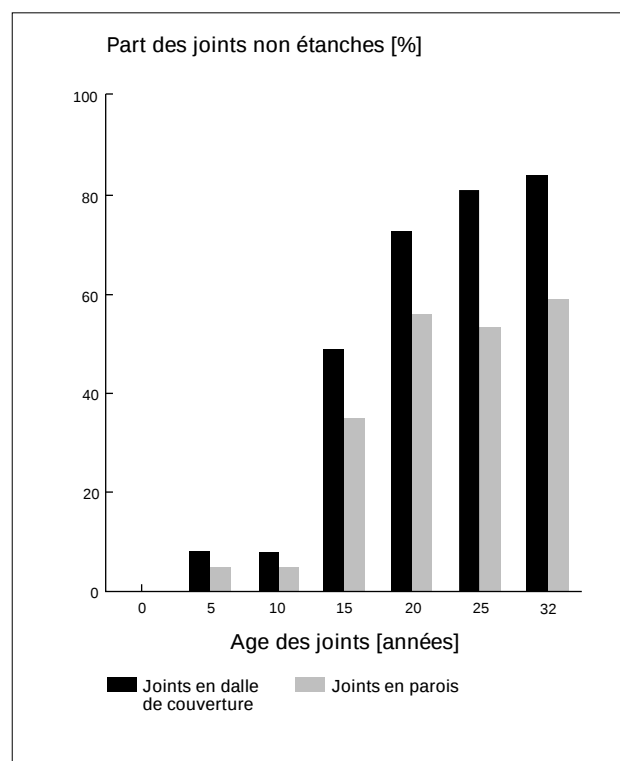


Figure 3.16: Evolution des dégâts des joints de dilatation de galeries de protection, selon [3.1]

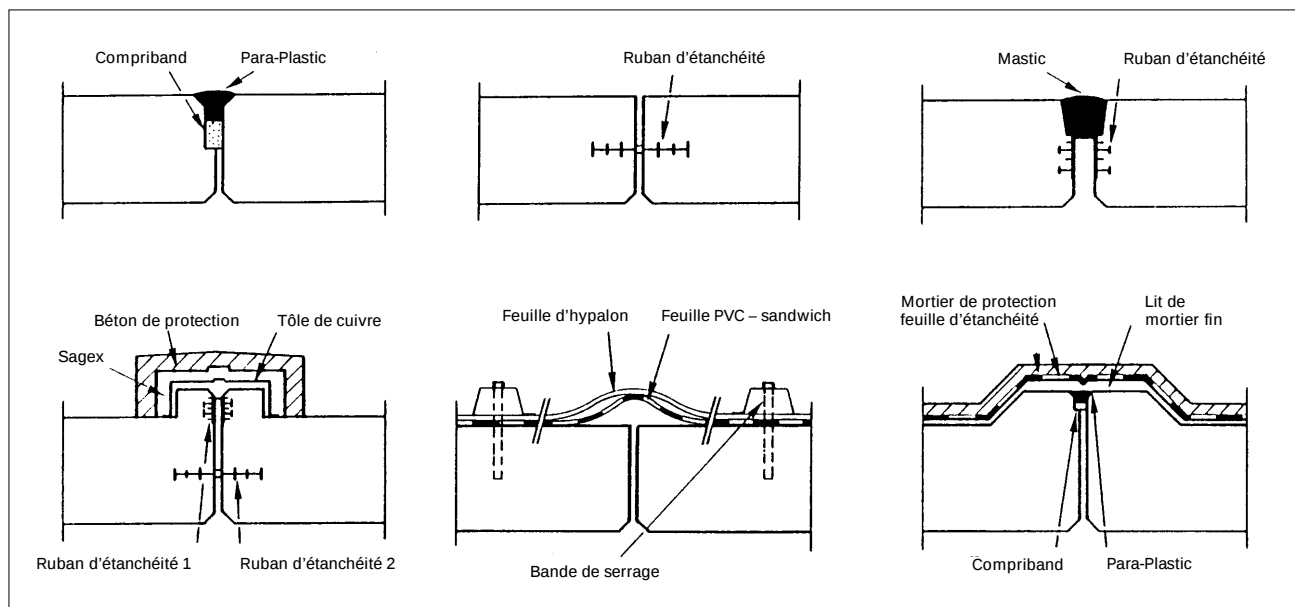


Figure 3.17: Systèmes de joints réalisés dans des toitures de galeries anti-avalanches. Tous ces joints ont perdu leur étanchéité avec le temps, selon [3.1]

Exécution d'une toiture de galerie de construction monolithique sans dispositif de protection additionnel extérieur

Ce mode de construction exploite les capacités autoprotectrices du béton armé. Dans ce cas, on renonce à un dispositif de protection additionnel. Si l'on veut empêcher l'eau de pénétrer et de traverser, il faut que le béton soit épais et que les fissures ne soient que minuscules. S'il existe, à proximité, de l'eau susceptible d'attaquer le béton, on utilisera un ciment approprié (p. ex. du ciment résistant aux sulfates si l'eau contient des sulfates).

Il faut à tout prix éviter que l'eau ne traverse le béton, puisque ce phénomène réduit la durabilité, l'aptitude au fonctionnement, et surtout l'aspect de l'ouvrage. L'eau qui pénètre dans le béton mais ne le traverse pas, ne compromet que la durabilité des ouvrages en béton: on a découvert récemment que

la largeur des fissures n'exerce guère d'influence sur la durabilité, sauf dans les cas où les fissures devenaient de véritables canaux [3.2], [3.3].

Les exigences sur les mesures à prendre pour limiter les fissures se trouvent dans la norme SIA 162 (1989). Précisons ici que, du point de vue actuel de la technologie du béton, les mesures que sont la définition des étapes, la réduction du facteur eau/ciment, le traitement ultérieur du béton et la surveillance de la qualité, toutes ces mesures revêtent un rôle plus important que les mesures décidées par voie de calcul.

Dans les cas où l'eau traverse le béton en passant par une fissure, il est possible de prendre des mesures simples de remise en état en procédant à des injections (fig. 3.18). Ce genre d'intervention peut s'effectuer depuis la chaussée; seule une hauteur parfois trop restreinte peut alors poser problème.



Figure 3.18: Injection de fissures

La sollicitation principale qui s'exerce sur la face inférieure de la toiture de la galerie, c'est le crachin qui contient du sel de déverglaçage et qui vient se coller sur toute la surface.

Dans une construction massive en béton armé privée de système de sécurité additionnel, diverses mesures permettent de contrer cette sollicitation. Ce qui est déterminant pour la protection de l'armature, c'est la solidité de la couverture et la qualité du béton (porosité). Pour la remise en état des constructions en béton armé, référez-vous à [4.4]. Les possibilités de remise en état ne sont limitées que par les nécessités de l'exploitation et la hauteur parfois insuffisante. Dans le cas d'une nouvelle construction, cette problématique doit faire partie intégrante des travaux au moment du projet déjà.

En ce qui concerne l'utilisation d'un système additionnel de protection des surfaces bétonnées, référez-vous au paragraphe 4.4.

Enfin, pour les toitures de galeries qui comportent des structures porteuses en métal, référez-vous aux recommandations que donne le chapitre 5 en matière de protection de l'acier.

Toiture d'une galerie
Sollicitations venant du bas
(de la chaussée)

②

Les sollicitations suivantes entrent en compte pour le choix de protection:

Sollicitations	Caractéristiques qualitatives		
	Aptitude au fonctionnement	Durabilité	Aspect
Sel de déverglaçage (crachin)		*	
Gaz nocifs		*	
Végétation			*
Sollicitations mécaniques		*	*

Zone extrême de la toiture / piliers

③

C'est une zone à concevoir, à exécuter et à entretenir avec beaucoup de soin puisqu'elle fait l'objet de toutes sortes de sollicitations. Elle doit endurer les mêmes sollicitations que la toiture, mais aussi des influences climatiques très rudes, du fait de son emplacement particulièrement exposé. Dans cette zone d'extrémité, la couche de terre est peu épaisse et il y a donc moins d'inertie thermique et de protection mécanique, d'où des chocs thermiques plus violents et plus rapprochés. A cet égard, le détournement des eaux de surface et d'infiltration requiert une attention particulière au moment du projet déjà.

Même le projet le mieux détaillé peut se révéler insuffisant si l'on a négligé l'existence de ces sollicitations multiples et leur combinaison mutuelle.

Paroi d'une galerie Sollicitations venant de l'extérieur ④

Pour l'essentiel, les sollicitations et les exigences sont les mêmes que pour ①.

Comment entretenir un système de protection additionnel sur celle des faces de la paroi tournée vers la montagne? Voilà qui est quasiment impossible. Si l'on a prévu un système de ce genre, il faut que sa durée de vie soit égale ou supérieure à celle de l'ouvrage [3.2].

Les mesures d'entretien courant ne sont possibles que depuis la chaussée. Si la paroi en béton armé présente des fissures par lesquelles l'eau peut passer, on procédera à des injections. Dans les ouvrages existants qui sont restés longtemps sans être entretenus, ces fissures sont souvent «auto-colmatées» et donc étanches.

Sollicitations	Caractéristiques qualitatives		
	Aptitude au fonctionnement	Durabilité	Aspect
Sel de déverglaçage (projection d'eau)		*	(*)
Sel de déverglaçage (crachin)		*	(*)
Gaz nocifs		*	(*)
Végétation		(*)	*
Sollicitations mécaniques		*	*

Paroi d'une galerie et piliers Sollicitations venant de l'intérieur (de la chaussée) ⑤

Les sollicitations sont, en gros, les mêmes que pour ②. Pour les galeries routières, les sollicitations dues au sel de déverglaçage sont prépondérantes; en effet, ce sel est véhiculé par le crachin que les voitures projettent à leur passage.

L'intensité du salage est plus élevée dans les zones où il y a projection d'eau que dans celles où la projection se réduit à du crachin (fig. 3.19, 3.20).

Le choix d'un système de protection des parois intérieures et des piliers exige beaucoup d'attention, car les quantités de sel projetées contre les surfaces bétonnées exigent que l'on prenne des dispositions exceptionnelles. Si l'on ne veut pas poser un système de protection spécial, il faut alors que le béton soit de première qualité, ce qui n'est possible qu'en faisant appel aux technologies les plus récentes et en surveillant sévèrement les travaux. Notons à ce propos que les dégradations du béton et de l'armature sont pratiquement irréversibles. Dans ce cas, la remise en état revient presque plus cher que le renouvellement du système de protection tout entier.

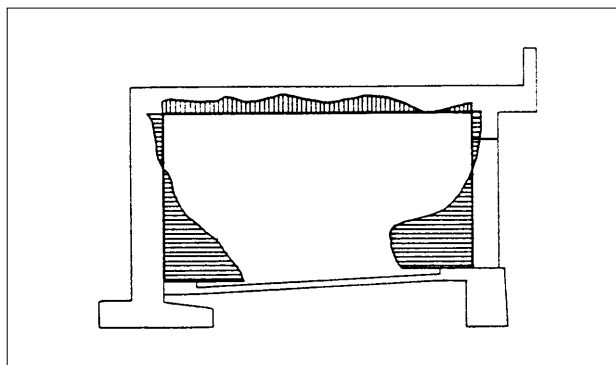


Figure 3.19: Evolution qualitative de l'humidité au sol, au plafond et aux parois d'une galerie (coupe)

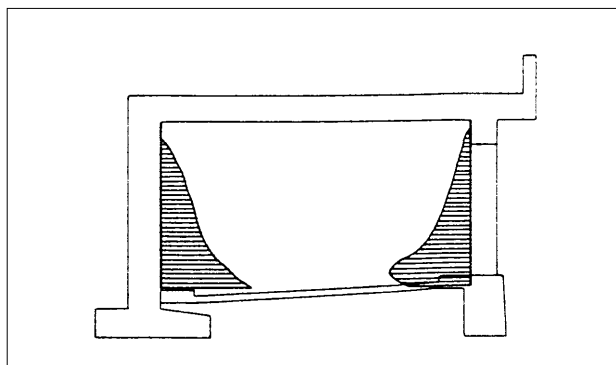


Figure 3.20: Evolution qualitative de la teneur en chlorures dans les éléments armés d'une galerie (coupe)

En choisissant un dispositif de protection additionnel, il s'agit de penser non seulement au sel mais aussi aux risques de collisions de véhicules et de paquets de neige collée à la surface du béton. Ces considérations conduiront inévitablement à choisir, pour la zone où il y a projection d'eau, un système de protection renouvelable ou, pour le moins, réparable.

En ce qui concerne les piliers, les éléments peuvent être remplacés intégralement, pour autant que l'on prévoie cette possibilité au moment du projet (p. ex. piliers en acier, en béton préfabriqué).

Commentaire final

En élaborant ce chapitre, les auteurs ont dû constater qu'il existait de nombreuses lacunes dans nos connaissances quand il s'agit de fixer les critères de choix d'un système de protection. Ces lacunes concernent notamment l'estimation réaliste de la durée de vie des divers systèmes de protection et l'analyse comparative utilité/coûts en tenant compte des coûts d'entretien courant. Or ce sont justement les éléments dont l'ingénieur de projet a besoin pour le choix optimal d'un dispositif de protection. Souhaitons que la recherche en matière de construction puisse combler ces lacunes dans un proche avenir.

4. Construction en béton

4.1	Généralités	47
4.2	Les systèmes de protection selon leur genre	47
4.3	Mécanismes de vieillissement et de dégradation	52
4.3.1	Généralités	52
4.3.2	Les mécanismes et les risques de corrosion	52
4.4	Remise en état du béton et de l'armature	55
4.4.1	Généralités	55
4.4.2	Principes pour la protection et la remise en état du béton	59
4.4.3	Principes pour la protection de l'armature contre la corrosion	60
4.4.4	Couches de support et conditions atmosphériques	70
4.4.5	Prétraitement de l'armature	76
4.4.6	Bétons et mortiers de remise en état	77
4.4.7	Systèmes de protection des surfaces	78
4.4.8	Pontage des fissures	80
4.5	Dispositifs d'étanchéité	80
4.5.1	Généralités	80
4.5.2	Les différents dispositifs d'étanchéité. Normes et directives	81
4.5.3	Longévité	87
4.5.4	Surveillance et entretien	93
4.5.5	Remplacement	99

4. Construction en béton

4.1 Généralités

La notion de construction en béton comprend surtout les ouvrages en béton armé. Dans notre pays, ce mode de construction a été utilisé dès la fin du siècle dernier (fig. 4.1).

Au début des années 40, on a vu apparaître la technique du béton précontraint, d'abord pour des ponts de petites dimensions destinés aux CFF. Plus tard, dans le cadre de la construction des routes nationales, les ponts en béton précontraint se sont multipliés.

Comme on l'a vu dans le paragraphe 1.4, le béton n'a pas été utilisé uniquement pour la construction de ponts, mais aussi pour quantité d'autres ouvrages de travaux publics et de génie civil.

L'entretien des ouvrages en béton fait actuellement l'objet de moult considérations dans la littérature spécialisée, la publicité et toutes sortes de séminaires, à tel point que les spécialistes sont littéralement submergés d'informations dans lesquelles on trouve à boire et à manger: parmi les innombrables produits que l'on nous vante, il est difficile de séparer le bon grain de l'ivraie.

Au cours des années, on a vu apparaître toutes sortes de système de protection; l'ingénieur de projet a parfois bien du mal à faire le bon choix. Le chapitre 3 présente les principes qui doivent le diriger dans ce dédale.

Pour les nouvelles réalisations, on prêtera une attention particulière aux joints. Des joints, on en trouve partout dans les ouvrages en béton existants. Or s'ils constituent souvent des points faibles en matière d'étanchéité et de longévité [3.1], ils sont nécessaires et les détails d'exécution doivent être soigneusement étudiés.

Il est de première importance d'assainir les ouvrages en béton avec le plus grand soin. Des techniques d'investigation non destructrices seront mises en œuvre le plus souvent. Les techniques d'investigation destructrices seront mises en œuvre par des spécialistes qui auront soin de ne pas aggraver les dégradations sur l'ouvrage.



Figure 4.1: Le premier pont en béton armé qui ait été construit en Suisse a été érigé en 1890 au-dessus d'un canal proche de Wildegg (selon [4.1])

4.2 Les systèmes de protection selon leur genre

Nous avons déjà vu, dans les chapitres 2 et 3 à quelles exigences les systèmes de protection doivent répondre. Répétons – car on ne le dira jamais assez – que le béton armé est un mode de construction mixte; à ce titre, tant le béton que l'armature doivent être protégés contre les agressions dont ils sont l'objet:

- Le béton doit être protégé contre les sollicitations mécaniques (p. ex. l'abrasion), les effets chimiques (p. ex. eaux sulfatées) et les effets physiques (p. ex. le gel).
- L'armature doit être protégée contre la corrosion (p. ex. consécutive à l'épandage de sel de déverglaçage).

La construction en béton a ceci de particulier que le milieu alcalin du béton constitue une excellente protection pour l'armature. Ce n'est vrai, bien sûr, que si, par exemple, la couverture de béton a une épaisseur suffisante pour que le milieu soit suffisamment alcalin; le béton se trouve alors en mesure d'assurer lui-même sa protection. Que ce soit pour les nouveaux projets ou pour la remise en état des ouvrages existants, il faut absolument respecter les exigences de qualité, en particulier celles qui se rapportent aux critères de durabilité. A cet égard, les normes citées ci-dessous indiquent les critères généraux, mais elles sont insuffisantes pour la fabrication d'un béton réellement durable.

Ces années passées, notre pays a vu la publication de très nombreuses études sur la durabilité des ouvrages en béton armé.

L'examen de certains ouvrages, les travaux menés en laboratoire et les études théoriques ont donné naissance à des recommandations [4.2] destinées d'une part à la fabrication d'un béton armé durable, et d'autre part à l'évaluation de l'état des structures porteuses existantes.

On a constaté que l'étanchéité et l'épaisseur de la couche de couverture de l'armature jouent un rôle primordial dans la durabilité de l'ouvrage. L'étanchéité dépend de la porosité et de la présence de fissures. Si l'on veut obtenir une étanchéité suffisante (tableau 4.1), il faut non seulement que les détails constructifs aient été correctement pensés, mais aussi et surtout que l'on utilise une technologie haut de gamme. Ainsi, le béton de construction doit présenter une valeur eau/ciment de 0,45 – 0,55, et il doit subir un post-traitement approprié.

Quoique l'on puisse déceler certains progrès sur les chantiers, le post-traitement s'avère généralement insuffisant. L'objectif de ce traitement est d'empêcher qu'un séchage trop rapide du béton de surface entraîne, à cause de la chaleur d'hydratation de l'élément concerné, une diminution de son gradient thermique. Ce phénomène provoque notamment la formation de fissures de retrait et, par manque d'eau, le blocage du processus d'hydratation: le revêtement devient poreux.

- Enrobages nécessaires:
 - Norme SIA 162 (1989): paragraphe 4 32 ou si disponible
 - Directives des maîtres de l'ouvrage
- Exigences d'aptitude au service ou durabilité par rapport à l'étanchéité à l'eau, à la résistance au gel, à la résistance au sel de déverglaçage, à la résistance chimique (p. ex. aux eaux qui attaquent le béton), à la résistance à l'abrasion:
 - Norme SIA 162 (1989) et 162/1 (1989): paragraphe 5 1

Etanchéité du béton	Mesures	
Porosité	Valeur eau/ciment	(béton de couverture et de noyau)
	Post-traitement	(béton de couverture)
	Constructives	(béton de couverture et de noyau)
Fissures	Post-traitement	(retrait, ΔT)
	Armature minimale	(autocontrainte ou tensions internes)
	Constructives	

Tableau 4.1: Mesures destinées à influencer l'étanchéité du béton, selon [4.2]

Les graphiques 4.2 illustrent les relations entre l'étanchéité, la porosité, la composition des capillaires, le degré d'hydratation et le facteur eau/ciment. On constate que plus le degré d'hydratation diminue, plus la porosité augmente.

Quant au schéma 4.3, il démontre clairement que la diffusion d'oxygène reste élevée si le post-traitement dure moins de 7 jours.

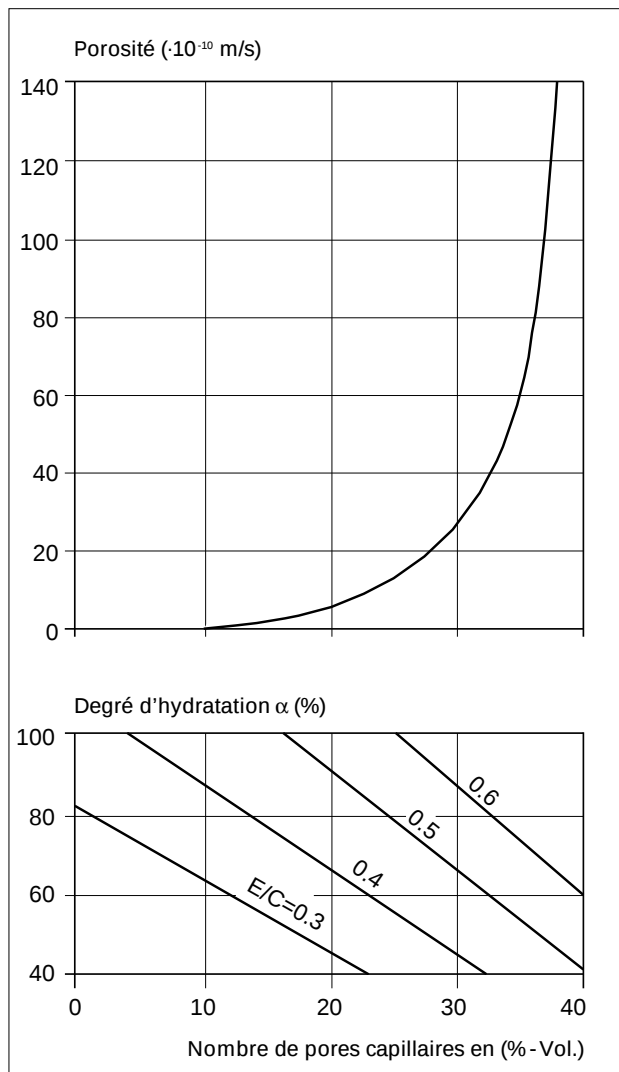


Figure 4.2: Influence du degré d'hydratation et de la valeur eau/ciment sur la porosité de la pâte de ciment durcie, selon [4.2]

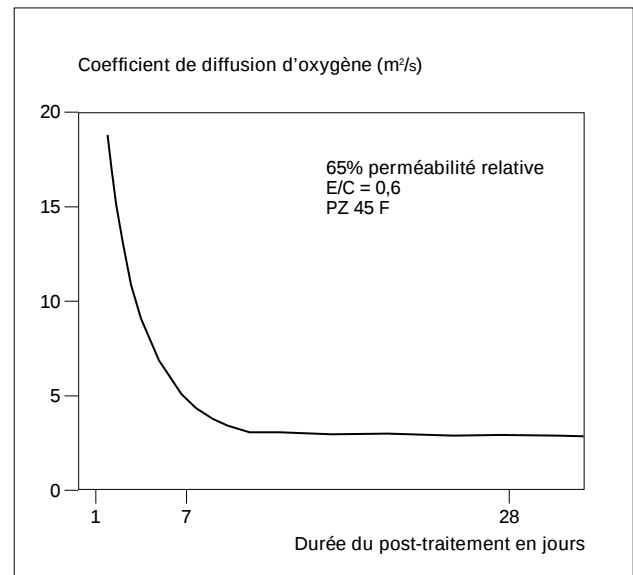


Figure 4.3: Influence du post-traitement sur la porosité, tiré de [4.2] selon [4.5]

Les documents [4.3] et [4.4] démontrent les avantages du béton à hautes performances. Cette notion de «béton à hautes performances» va être affinée à l'avenir. L'effort principal doit porter sur la résistance et la durabilité. On n'y parviendra qu'en choisissant soigneusement les divers agrégats, en utilisant des adjuvants (p. ex. fluidifiants), des additifs (p. ex. silicate en poudre); ces procédés doivent faire descendre le facteur eau/ciment au-dessous de 0,4. Des essais préliminaires et des réalisations pratiques démontrent que l'utilisation de ces bétons permet de fabriquer des éléments capables de résister aux agressions du sel de déverglaçage dans les zones exposées.

Le document [4.4] présente les résultats de 82 contrôles du béton frais exécutés sur des ponts tessinois. On a constaté qu'un facteur eau/ciment peu élevé peut encore donner un béton maniable.

Néanmoins, il ne faut pas tomber dans le piège de la recherche systématique du facteur eau/ciment le plus bas. Certes, il est possible d'améliorer certaines propriétés du béton en descendant à des valeurs

inférieures à 0,35. Mais on se trouve alors confronté à des inconvénients considérables comme une mise en place difficile (notamment la formation de nids de gravier), un risque accru de voir apparaître des fissures, une certaine fragilité et, enfin, des coûts élevés.

Si nous avons émis toutes ces réflexions sur la durabilité du béton, c'est qu'elles illustrent bien que la construction en béton armé possède en soi d'excellentes capacités d'autoprotection. Dans les nouvelles constructions, il faut veiller avant tout à respecter les conditions-cadres, tant au moment du projet que pendant l'exécution. Ce n'est alors qu'exceptionnellement qu'un système de protection additionnel s'avérera nécessaire.

Dans les ouvrages en béton armé existants, en revanche, on rencontre souvent des couches de couverture de qualité et d'épaisseur insuffisantes. Selon l'exposition de l'élément et les sollicitations auxquelles il est exposé, le béton ou l'armature subiront tôt ou tard des dégradations (fig. 4.4).



Figure 4.4: Dégradations dues à la corrosion de l'acier d'armature. Documents photographiques tirés de [4.7]

Ce tableau donne une classification des capacités autoprotectrices des matériaux et des systèmes de protection additionnels.

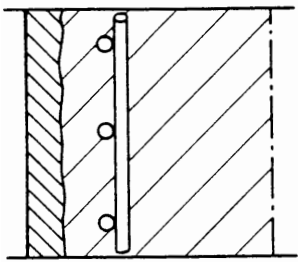
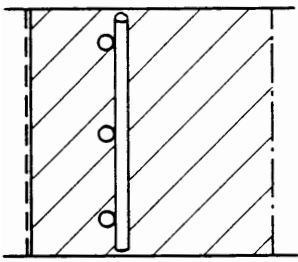
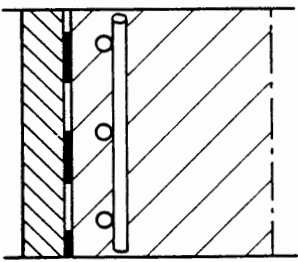
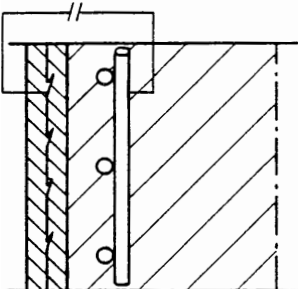
	Genre de système de protection	
Autoprotection des matériaux	Bétons et mortiers: – béton – mortier – béton projeté	
	Protection des surfaces: – imprégnation hydrophobe – colmatage – enduits – habillages (p.ex. avec des dalles céramiques) – etc.	
Systèmes et procédés de protection additionnels	Etanchéité: – lés d'étanchéité (flexibles) – matière synthétique liquide (flexible) – jointoiement mastic (flexible) – étanchéités agglomérées au ciment (rigide) – etc.	
	Procédés électrochimiques: – protection anticorrosive cathodique – extraction des chlorures – réalcalinisation	

Tableau 4.2: Classification des systèmes de protection pour l'entretien spécialisé. Les systèmes de protection additionnels sont applicables aux nouvelles constructions. Selon les cas, ces systèmes de protection doivent être complétés par des injections dans les fissures

4.3 Mécanismes de vieillissement et de dégradation

4.3.1 Généralités

Il semble banal d'affirmer que le béton armé est constitué de béton et d'une armature métallique. Toutefois, cette formulation exprime bien qu'il s'agit d'un mode de construction mixte dont la longévité dépend d'une part des propriétés de chacun des éléments utilisés, et d'autre part de leur interaction. Il ne faut pas oublier non plus que le béton lui-même est un matériau composite qui contient du ciment, du gravier, de l'eau de gâchage, des agrégats et des additifs.

Le paragraphe 2.3 donne toutes les références utiles sur le vieillissement et la dégradation; il s'agit là de différencier avant tout les sollicitations et les charges externes, de celles qui sont internes. Ces deux sortes de sollicitations sont susceptibles d'altérer ou de dégrader les composants du béton armé. De plus, dans un mode de construction mixte, il est important à plus d'un titre que les composants soient parfaitement compatibles entre eux. Pour de plus amples informations sur la composition et le comportement des composants du béton armé, référez-vous à la littérature spécialisée (p. ex., en ce qui concerne le béton, au document [4.8]).

Si nous nous penchons particulièrement ci-après sur les dégradations de l'armature dues à la corrosion, c'est parce que les recherches ont démontré que c'est le genre le plus répandu de dégradation. Il va de soi qu'on ne saurait négliger non plus les dégâts dus au gel, au sel de déverglaçage, à l'eau et aux réactions alcalines. Néanmoins, les mesures à prendre dans ces cas déborderaient du cadre de cette documentation; vous voudrez donc bien vous référer à la littérature spécialisée (p. ex. [4.7]).

Le problème de la corrosion suscite généralement un certain malaise parmi les ingénieurs civils qui ne sont pas forcément familiarisés avec les processus électrochimiques qui la déclenchent. Quoi qu'il en soit, il faut absolument connaître certains principes. D'autre part, il existe de la littérature accessible aux non-spécialistes de la corrosion ([4.6, 4.7]).

4.3.2 Les mécanismes et les risques de corrosion

Une des conditions primordiales pour que le béton armé soit impeccable, c'est que l'acier d'armature soit correctement protégé par le béton qui l'entoure. Pour que la corrosion apparaisse malgré tout, il faut que trois conditions soient remplies (cf. fig. 4.9):

- présence d'un électrolyte;
- aggravation due à l'effet de la couche passive;
- pénétration d'oxygène jusqu'à l'acier.

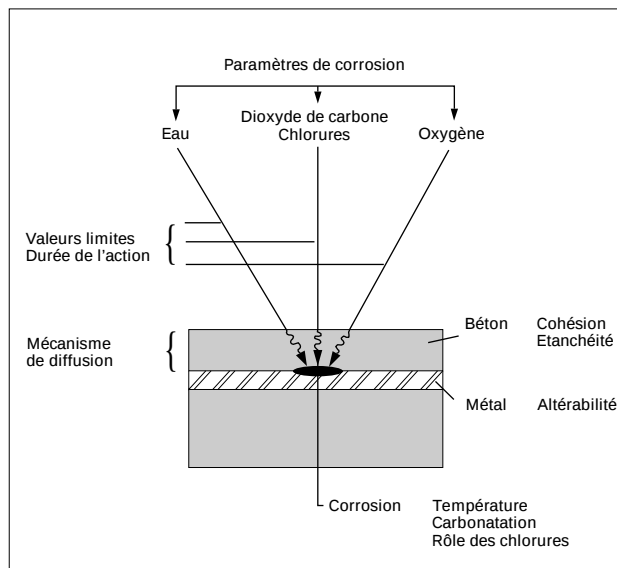


Figure 4.9: Facteurs qui exercent un effet sur la corrosion de l'armature noyée dans le béton (tiré de [4.7])

Formation d'un électrolyte, selon [4.7]

Si le béton est humide, la première des conditions que nous avons citées est remplie. Comme l'humidité peut également pénétrer dans le béton par la condensation de vapeur d'eau dans l'air (condensation capillaire), la pénétration de l'humidité dans le béton ne se fait pas forcément par la présence d'eau sous forme liquide. L'humidité de l'air des pièces intérieures est en principe trop faible pour pouvoir former un électrolyte. En plein air, en revanche, le taux d'humidité s'avère généralement suffisant pour susciter l'apparition d'un électrolyte dans le béton. Le taux d'humidité du béton lui-même varie en fonction des conditions atmosphériques.

Perte de passivation, selon [4.7]

La couche passive sur la surface métallique peut:

- augmenter par carbonatation du béton (fig. 4.10), ou
- être entamée par la présence de substances déclenchant la corrosion, p. ex. de chlorures (fig. 4.11).

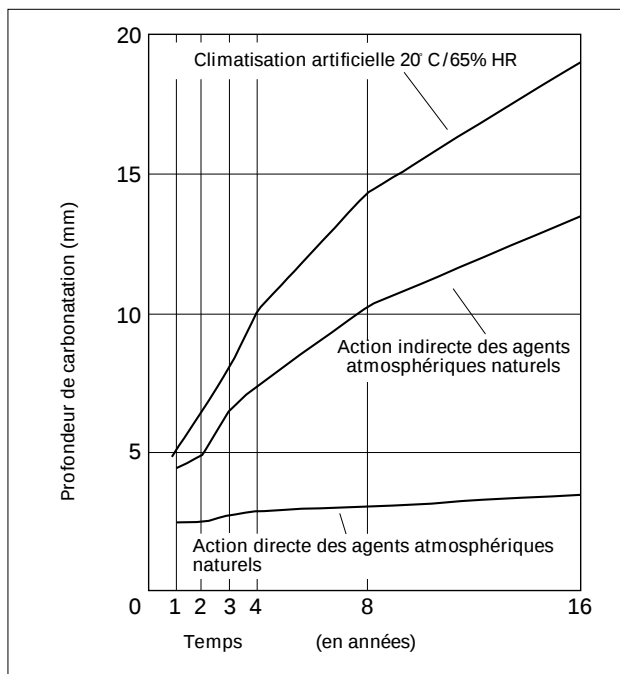


Figure 4.10: Relation profondeur de carbonatation / temps dans différentes conditions atmosphériques, d'après [4.6]

Direct: exposé à la pluie

Indirect: sous abri

Remarque: les résultats que présente ce diagramme ne sont qu'un exemple; en pratique, il peut apparaître des écarts dans les deux axes (temps et carbonatation)

Si l'on veut prendre comme critère le facteur déclenchant, on peut appeler «corrosion par carbonatation» la corrosion susceptible d'apparaître dans le premier cas cité; dans le deuxième cas, il s'agit plutôt de «corrosion due aux chlorures».

Dans la carbonatation, le CO_2 de l'air réagit avec l'hydroxyde de calcium du béton pour produire du carbonate de calcium, libérant ainsi de l'eau.

On trouve, outre les chlorures, d'autres substances déclenchant la corrosion, comme les combinaisons sulfureuses, les sulfates en particulier. Nous continuons ci-après à parler du rôle des chlorures dans la corrosion, puisque c'est, selon les expertises, la cause principale des dégradations du métal dues à la corrosion. Pour les dégradations dues aux sulfates, on se référera à la littérature ad hoc, p. ex. à [4.8].

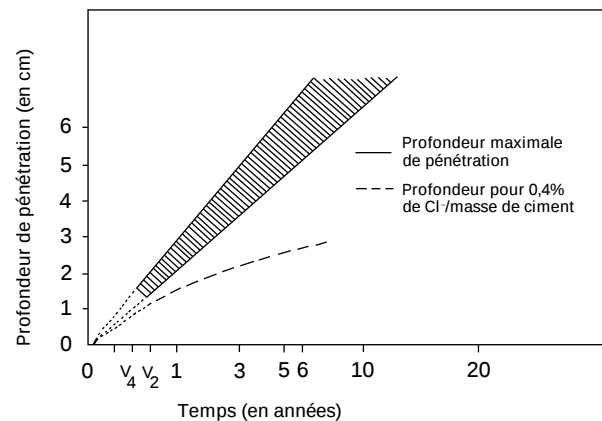


Figure 4.11: Profondeur de pénétration des chlorures en relation avec le temps (tiré de [4.3])

Remarque: les résultats que présente ce diagramme ne sont qu'un exemple; en pratique, il peut apparaître des écarts dans les deux axes (temps et carbonatation)

Oxygène, selon [4.7]

L'oxygène et le dioxyde de carbone agissent de façon différente.

Comme le dioxyde de carbone se lie lorsqu'il pénètre dans le béton, la rapidité de pénétration du front de carbonatation dépend aussi de l'importance de l'apport. Il en va différemment pour l'oxygène

dont la rapidité de diffusion est déterminée essentiellement par l'étanchéité et le taux d'humidité de l'objet. C'est pourquoi l'oxygène – qu'il se présente sous forme gazeuse ou dissout dans de l'eau – peut parvenir jusqu'à la surface du métal plus rapidement que ne le fait le front de carbonatation. Il est extrêmement difficile de mesurer la quantité d'oxygène au voisinage des surfaces métalliques. Il n'est utile de prendre des dispositions destinées à réduire la quantité d'oxygène proche du métal (p. ex. par une chape) que si la corrosion ne peut être enrayée par l'élimination des autres paramètres qui contribuent à sa formation.

Pour que la corrosion puisse s'attaquer à la surface métallique, il faut donc que l'eau, l'oxygène et les chlorures, soit le front de carbonatation, puissent parvenir jusqu'au métal. Mais la pénétration est plus ou moins aisée selon les configurations. Ainsi, plus la teneur en eau est élevée, plus la pénétration d'oxygène et de dioxyde de carbone sera freinée, mais plus aussi les conditions seront favorables aux substances déclenchantes comme le Cl^- . Si la teneur en eau est basse, l'oxygène pénétrera plus facilement, mais la réaction de carbonatation sera empêchée par manque d'humidité. C'est quand la teneur en eau varie, selon l'humidité relative de l'air, entre 40% et 60%, que la carbonatation est la plus importante. Dans cette fourchette d'humidité de l'air, la teneur en eau du béton est généralement trop faible pour permettre la formation d'un électrolyte; la corrosion n'apparaît donc pas. Le tableau 4.12 présente schématiquement ce phénomène d'interdépendance. Il en ressort que, dans des situations régulières, les conditions favorables à la corrosion n'apparaissent que dans une zone réduite. Hors de cette zone, la corrosion ne progresse que très lentement, voire pas du tout. C'est ainsi qu'il n'existe, par exemple, aucun risque de corrosion dans des pièces intérieures sèches, cela malgré une carbonatation relativement élevée.

Pour pouvoir évaluer les risques de corrosion, il faut disposer – en plus des influences citées sous [4.2] (telles l'épaisseur et l'étanchéité de la couche de couverture) et des paramètres de corrosion dont nous avons déjà parlé – d'informations complémentaires sur les facteurs déclenchants et précipitants dont il est question dans le tableau 4.12 et dans les remarques qui suivent [4.9]:

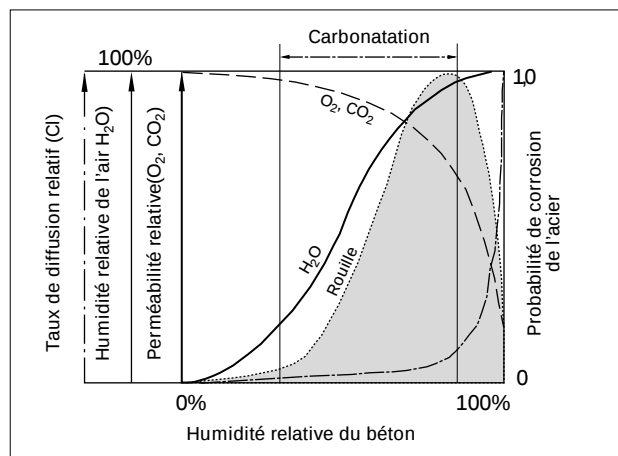


Figure 4.12: Interaction des paramètres de corrosion (tiré de [4.7])

- Chlorures
Dans un béton totalement alcalin, une concentration de chlorures $> 0,4\%$ Cl^- /masse de ciment constitue une menace de corrosion pour l'armature. On peut procéder à des carottages qui fourniront un profil de profondeur des chlorures, ce qui donnera des informations sur les zones de l'armature qui sont sérieusement, potentiellement ou pas du tout menacées.
- Pénétration de l'humidité
Les zones extrêmement humides se repèrent soit par contrôle visuel, soit par des mesures de la résistance électrique du béton. On accordera une attention particulière à l'exposition de l'élément concerné, puisque le béton qui subit régulièrement des phases successives de mouillage et de séchage est tout particulièrement exposé aux risques de corrosion, notamment en présence de chlorures.
- Carbonatation
Le métal noyé dans du béton carbonaté (c'est-à-dire qui n'est plus suffisamment alcalin) court un risque élevé de corrosion. Encore faut-il, dans ce cas, que d'autres facteurs de corrosion soient présents. On ne peut en aucun cas pronostiquer l'évolution du phénomène (et donc le moment où apparaîtra réellement la menace de corrosion) uniquement sur la base des caractéristiques du béton – p. ex. le facteur eau/ciment – et d'une généralisation d'une loi du genre $\sqrt{t}$.

L'exposition en soi (lieu soumis aux intempéries ou, au contraire, protégé de la pluie, etc.) revêt ici toute son importance.

On détermine les risques sur la base de l'état de corrosion de l'armature (données recueillies sur le site), des facteurs de risque connus et de leur interaction, ainsi que de l'usage présent et prévisible de l'ouvrage. Le tableau synoptique 4.3 présente un classement approximatif des cas les plus caractéristiques. Dans le béton non carbonaté attaqué par les chlorures, les attaques corrosives se présentent le plus souvent sous la forme de piquûres.

Si l'enrobage de l'armature est conforme aux normes et que le béton est épais, la pénétration de matières dégradantes et l'apparition de la corrosion sont considérablement retardées [4.2 et 4.10].

4.4 Remise en état du béton et de l'armature

4.4.1 Généralités

Quels sont les objectifs de la remise en état?

Les mesures d'entretien spécialisé servent à rétablir ou à améliorer l'aptitude à la résistance des structures porteuses en béton. Il s'agit, par exemple, de remplacer (par du béton ou du mortier) du béton qui aurait été pollué par des chlorures. Si l'armature est corrodée, il faudra rétablir une protection anticorrosion suffisante. Pour éviter un problème de résistance, on renouvellera tout ou partie de l'armature.

Il est possible de prendre isolément les mesures suivantes, selon (4.11):

- Garnissage des fissures (fig. 4.15)
Le garnissage des fissures sert, en fonction du résultat exigé, à rendre étanches des éléments poreux, à empêcher la pénétration de substances corrosives, à rétablir un comportement monolithique ou, dans des cas particuliers, à protéger l'armature contre la corrosion.
- Garnissage de cavités localement circonscrites (fig. 4.16)
Cette mesure sert à restituer à l'élément constructif sa surface originelle (refaçonnage). Elle ne peut, en principe, s'avérer suffisante que lorsque les dégâts ne viennent pas d'une armature corrodée. L'application s'exécute manuellement, soit par jointoiement, soit par projection si les cavités sont nombreuses. On utilise soit du mortier ou du béton à base de ciment avec ou sans apport synthétique, soit, exceptionnellement, du mortier ou du béton à base de résine réactive.
- Application de mortier et de béton sur des grandes surfaces (fig. 4.17)
Cette mesure sert p. ex. à augmenter l'enrobage de l'armature, à créer un nouvel aspect de la surface ou à renforcer la section du béton. L'application se fait en principe avec du béton coulé sur place (coffrage pour les surfaces non horizontales) ou avec du béton projeté (p. ex. sur les parois, les piliers et les sous-faces).
On utilise du mortier ou du béton à base de ciment avec ou sans apport synthétique. Pour l'application de mortier ou de béton sur des

Age de l'ouvrage	Carbonatation	Exposition	Quantité de chlorures en contact avec l'armature		
			Béton dense		
			couverture importante		
Béton dense couverture importante	Béton totalement alcalin	Très mouillé	–	–	–
		Sec	–	–	+
		Humide	–	+	++
		Variable	–	++	+++
	Carbonaté jusqu'à l'armature	Très mouillé	–	–	–
		Sec	–	+	++
		Humide	+	++	+++
		Variable	++	+++	+++

Tableau synoptique 4.3: Risque prévisible de corrosion (probabilité de l'apparition de corrosion sur les armatures noyées dans le béton en fonction de divers paramètres), tiré de [4.9]

- très faible
- + moyen à important
- ++ très important
- +++ corrosion inévitable

1) Ces données se rapportent au pourcentage de chlorures par rapport à la masse de ciment

grandes surfaces en vue d'améliorer la résistance aux sollicitations mécaniques et chimiques, on peut également utiliser des matériaux à base de résine réactive.

- Application d'imprégnations hydrophobes (fig. 4.18)
Les imprégnations hydrophobes empêchent l'absorption capillaire de l'eau et des substances destructrices qu'elle peut contenir. On fait appel à cette méthode pour améliorer l'adhérence des enduits pelliculaires. Il faut choisir les produits en fonction de leur compatibilité.
- Application de colmatage ou d'enduits pelliculaires (fig. 4.19 et 4.20)
Cette mesure sert à empêcher la pénétration de substances liquides ou gazeuses dans le béton (peu efficace contre l'oxygène). On utilise cette méthode pour l'application d'une couche de fond, p. ex. en vue d'améliorer la résistance du support ou l'adhérence de la couche suivante. On utilise des matériaux à base synthétique.

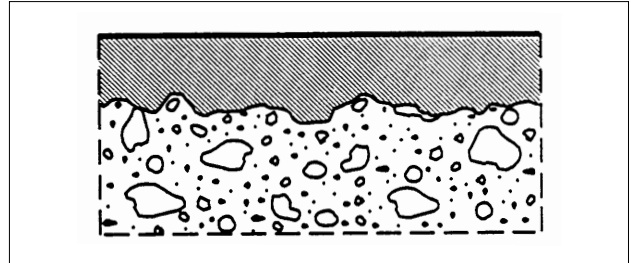


Figure 4.17: Application de mortier ou de béton sur une grande surface
L'armature n'est pas représentée sur le dessin

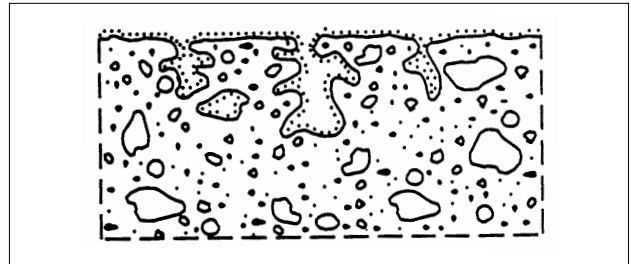


Figure 4.18: Application d'imprégnation hydrophobe
L'armature n'est pas représentée sur le dessin

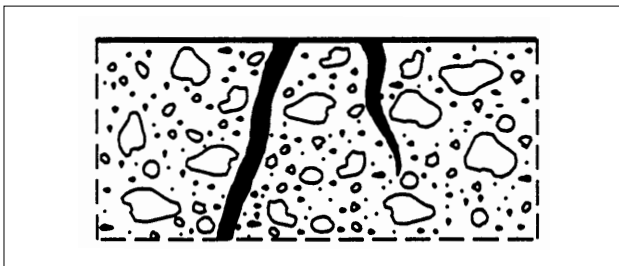


Figure 4.15: Garnissage de fissures à l'aide d'une résine réactive ou de pâte de ciment pure
L'armature n'est pas représentée sur le dessin

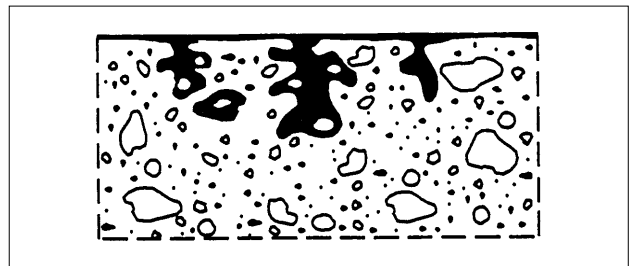


Figure 4.19: Application d'un cachetage (ou colmatage) (partiellement pelliculaire)
L'armature n'est pas représentée sur le dessin

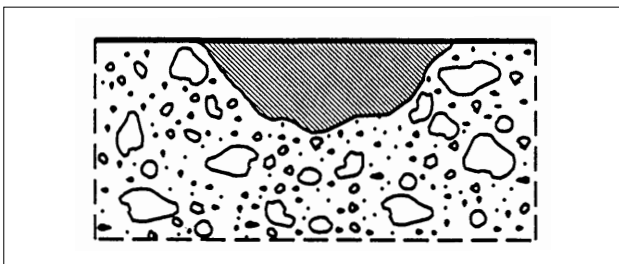


Figure 4.16: Garnissage de défauts localement circonscrits à l'aide de mortier ou de béton
L'armature n'est pas représentée sur le dessin

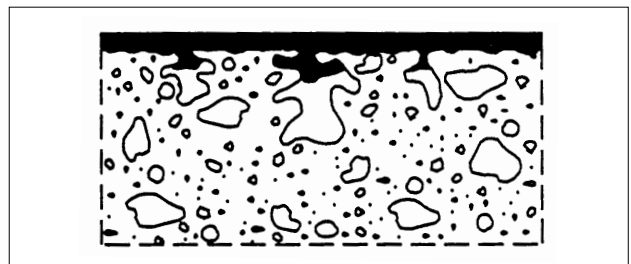


Figure 4.20: Application de couches pelliculaires
L'armature n'est pas représentée sur le dessin

Les mesures que nous venons de présenter démontrent que la remise en état peut exploiter toutes sortes de méthodes, notamment l'étanchéité et les procédés électrochimiques dont nous parlerons plus loin.

A la bonne mesure, le bon produit!

Comment, dans un cas concret, choisir la bonne mesure et le bon produit?

L'ingénieur de projet doit connaître les principes de base qui régissent la protection et la remise en état du béton ainsi que la protection anticorrosion de l'acier d'armature. Pour l'appréciation de l'état des surfaces et des caractéristiques des produits d'assainissement, il faut connaître certains paramètres physiques et chimiques, comme on le verra dans les paragraphes qui suivent. Il faut également savoir comment tel procédé ou tel produit résiste au temps – en d'autres termes quelle est leur durabilité dans des conditions données.

Dans de nombreux pays, ces problèmes font l'objet de toutes sortes de recherches et de développements. Des essais comparatifs ont démontré que, malgré nos connaissances toujours accrues, beaucoup de questions restent encore sans réponses.

Nous en trouvons d'excellents exemples dans le mémoire de recherche intitulé «Protection et rénovation des ouvrages routiers en béton armé» [4.12] qui présente les résultats d'essais comparatifs réalisés avec des produits différents. Cet ouvrage résume comme suit les expériences faites avec les revêtements usuels:

«Les revêtements protecteurs les plus courants se classent, en gros comme suit:

Les enduits en dispersion époxy, relativement minces mais très adhérents, constituent une protection peu efficace contre le sel de déverglaçage. Ils manquent de souplesse et ne peuvent donc pas faire la soudure entre les lèvres de fissures même minuscules. On voit trop souvent la surface du béton subir des dégâts dus au gel malgré la présence d'un enduit de protection. Cela trahit l'existence de défauts du revêtement, défauts qui ne peuvent être compensés par l'application d'une couche relativement mince sur le béton poreux.

Des tests tout récents effectués sur l'enduit posé sur le béton des tunnels, ont révélé des concentrations

parfois considérables de chlorures. Ces résultats remettent en question l'efficacité protectrice des couches minces.

Les enduits à base de ciment composés synthétiquement sont appliqués sur une épaisseur de 2 à 3 mm. L'application est simple et ne pose aucun problème même sur un substratum humide. Il est souhaitable de prémouiller soigneusement le béton et de procéder à un post-traitement efficace, sous peine de courir le risque de voir une déperdition d'eau et la formation de fissures de retrait. Les produits utilisés ne peuvent recouvrir que partiellement les fissures. On constate fréquemment une forte diminution de la capacité de déformation à basse température. L'insertion de tissus permet de résoudre à peu près le problème des fissures, en ce sens qu'il en apparaît plusieurs petites au lieu d'une grosse.

Jusqu'ici, ces petites fissures non recouvertes n'ont entraîné aucun inconvénient visible. On n'a constaté ni éclats le long des fissures, ni infiltrations. Cette sorte d'enduit est peu sensible aux sollicitations mécaniques (p. ex. aux lames des chasse-neige).

Les enduits thermoplastiques tendres, même peu épais, peuvent recouvrir les fissures. Selon la substance synthétique utilisée, on constate, ici également, une forte diminution de la capacité de déformation à basse température. Ces enduits sont simples à appliquer et à réparer mais ont tendance à se salir et sont sujets à des dégradations mécaniques. L'adhérence est plutôt faible, d'où un risque accru d'infiltration d'humidité.

Les enduits thermoplastiques durs s'utilisent généralement pour des rebouchages destinés à réduire la pénétration de substances destructrices (comme le CO₂ ou le Cl⁻) dans le béton. Les enduits sont généralement fins, manquent de souplesse et ne peuvent recouvrir les petites fissures. On a constaté quelques cas d'écaillage sans pouvoir en expliquer la raison.

Les enduits élastomères minces (épaisseur < 0,5 mm) à un composant peuvent recouvrir certaines fissures. En général, ils exigent l'application d'un agent bouche-pores. Il faut souvent procéder à plusieurs applications entrecoupées de temps de repos pour que l'on arrive à l'épaisseur de couche désirée. La porosité est plutôt faible. En pratique, ces enduits ne parviennent que rarement à recouvrir les fissures. Visiblement, ces produits perdent de leur flexibilité avec l'âge – peut-être simplement parce qu'ils n'ont pas bénéficié des meilleures

conditions de fabrication. Vu la faible épaisseur, il est impossible de réaliser une couche protectrice totalement dénuée de défauts. Il existe toujours un risque d'infiltration d'humidité et de dégradation mécanique.

Les enduits élastomères épais (il s'agit avant tout de polyuréthanes ou d'une combinaison polyuréthane/époxy) peuvent, eux, recouvrir des fissures mouvantes, même à basse température. Si on les applique sur du béton humide, elles forment des bulles. Un scellement supplémentaire est nécessaire pour une protection contre les UV. Ici aussi, à cause de la faible adhérence, il y a risque d'infiltrations, en particulier si la finition a été négligée. Comme la couche est épaisse, les dégâts éventuels du béton ne peuvent être constatés que relativement tard.

Depuis quelques années, on utilise, en Suisse, des enduits en polyester renforcés par un tissu en fibre de verre. Les expériences effectuées avec ces produits se sont, pour la plupart, avérées positives.

Ce qui manque, pour la majorité des produits, c'est une expérience à long terme. Cette carence s'explique d'une part par l'amélioration et le développement constants des produits, et d'autre part par les connaissances lacunaires que l'on avait du béton lorsqu'on a procédé à des rénovations. Il est d'autant plus ardu d'émettre une appréciation fiable, que les hivers passés ont été exceptionnellement doux. Cela explique que l'on n'ait pas encore pu tirer de conclusions des observations effectuées sur des travaux de rénovations récents, travaux sur lesquels on dispose pourtant de toutes les données nécessaires.

Quel que soit l'enduit utilisé, certains paramètres jouent un rôle déterminant: ce sont le traitement préparatoire, le taux d'humidité du béton et la qualité de l'exécution. Il faut porter une attention toute particulière au problème des raccords.

Les enduits minces et délicats n'assurent, par endroits, qu'une étanchéité médiocre; il faut donc absolument utiliser du mortier de réparation résistant au gel et au sel de déverglaçage, et procéder à l'égalisation. En outre, il faudrait réparer rapidement les dégradations mécaniques.»

Les conclusions de ces travaux de recherche démontrent clairement que nous ne savons pas encore grand'chose du comportement de certains groupes de produits. Cela n'empêche pas que

l'ingénieur de projet se voit quotidiennement forcé de choisir pour telle méthode ou tel produit. Dans notre pays, il n'existe encore aucune réglementation (à l'exception de quelques données qui figurent dans le document [4.23]); il nous faut donc jeter un coup d'œil par-dessus les frontières pour savoir ce qui se fait, dans ce domaine, dans le cadre de l'harmonisation européenne. Il faut s'attendre à ce que les indications de la directive de la CE sur les produits du bâtiment exercent des répercussions sur ce qui se fera dans notre pays (cf. paragraphe 2.1).

Au sein du CEN (Comité Européen de Normalisation), le groupe de travail 8 du CT (Comité technique) 104 se penche sur la question «Protection and repair of concrete structures»; des sous-groupes élaborent les directives sur la remise en état des éléments en béton. Ces groupes accueillent des spécialistes suisses.

Tous ces travaux visent à déterminer quelles exigences fixer pour tel et tel groupe de produits, quels seront les tests d'aptitude et les contrôles de qualité, bref, quelles sont les conditions à remplir pour l'obtention du label de conformité de la CE. Un produit muni de ce label peut être utilisé dans tous les pays du Marché commun. Les travaux de ces groupes dureront quelque temps encore.

Entre-temps, le «Deutsche Ausschuss für Stahlbeton» (Commission allemande du béton armé) a publié la directive pour la protection et la remise en état des éléments en béton [4.11]. C'est la première fois qu'une directive essaie de réglementer ce sujet complexe. Certains de ses passages seront certainement repris dans la directive de la CE.

Il faut aussi savoir que certains fabricants couvrent un marché international; ils doivent donc soumettre leurs produits aux tests qu'exige la directive allemande. Certains de ces tests sont d'ores et déjà effectués, et les produits se trouvent sur le marché.

En ces circonstances, il nous semble logique de prendre en compte le contenu de cette directive qui se divise en quatre chapitres:

1. Réglementation générale et principes de planification, août 1990
2. Planification et exécution des constructions, août 1990
3. Garantie de qualité de l'exécution des constructions, février 1991

4. Conditions de livraison et principes pour les prescriptions d'exécution (paru fin 1991); ce chapitre contient les descriptions des tests, et il est donc essentiel pour les instituts d'essais.

(Beuth Verlag GmbH, Berlin 30 et Cologne 1, n° de référence 65014).

4.4.2 Principes pour la protection et la remise en état du béton

Il faut que les ingénieurs de projet sachent comment déterminer les objectifs de protection et de remise en état en fonction des exigences propres à certains produits ou à certains procédés.

Eu égard à l'harmonisation technique européenne, et en accord avec l'établissement des nouvelles normes de construction SIA, notre pays se devrait d'exiger que tous les produits et procédés soient systématiquement testés. Ces tests montrent si les exigences suivantes sont remplies [4.11]:

- Les matériaux utilisés et les éléments protégés (ou qui font l'objet d'une remise en état) doivent résister aux sollicitations de leur environnement, ainsi qu'à l'usage, dans le cadre d'un temps d'affectation donné. Il faut empêcher le déclenchement d'une agression provenant des couches profondes (p. ex. à la suite d'une infiltration).
- Les matériaux de protection ou d'entretien doivent adhérer correctement et durablement au béton ou à l'acier de l'élément; de même, les différents enduits doivent bien adhérer entre eux. L'adhérence ne doit pas diminuer avec le temps, que ce soit sous l'influence de l'alcalinité ou de l'humidité du béton.
- Les matériaux de protection et d'entretien, ne doivent pas subir les répercussions des tensions mécaniques agissant sur l'élément traité et qui provoqueraient leur décollement ou la formation de fissures, que ces tensions se produisent à la suite de dilatations thermiques, de retraits ou de souspressions
- Les matériaux de protection et d'entretien, ne doivent pas entraver la protection anticorrosion de l'acier d'armature.
- Les produits et les procédés doivent être adaptés au chantier.

Selon la nature du produit, des essais doivent attester des propriétés suivantes:

- Résistance (pression, traction, abrasion)

- Comportement à la déformation en relation avec la température et l'humidité
 - sous charge (court terme, long terme)
 - sans charge (retrait, souspression, dilatation thermique)
- Etanchéité
 - à l'eau
 - à la vapeur d'eau
 - à d'autres liquides, gaz, ions
- Résistance
 - au gel, le cas échéant au gel et au sel de déverglaçage
 - à l'humidité
 - à des substances polluantes ou nocives qui se trouveraient dans l'eau ou dans des solutions organiques
 - à l'alcalinité de la pâte de ciment
 - au rayonnement UV
 - à la température
 - aux dégradations
- Adhérence des enduits au béton et des enduits entre eux
- Longévité des qualités susmentionnées
- Aptitude à la réparation et au remplacement

En plus de ces exigences, le projet doit tenir compte de ce qui suit:

- Le revêtement ou une autre mesure d'entretien ne doit jamais entraîner, dans le béton des éléments à protéger ou à entretenir, des conditions physiques ou chimiques défavorables qui conduiraient à des dégradations.
- Les éléments et les procédés d'exécution doivent être choisis en fonction des qualités du support. Il faut tenir compte du traitement préparatoire. La sollicitation à la traction des enduits de surface dépend de la zone où ils sont appliqués.
- Dès leur début, les grands travaux d'entretien doivent faire l'objet d'une surveillance; on contrôlera si les conditions d'exécution permettent de respecter toutes les exigences du projet d'entretien.
- Les travaux de protection et d'entretien ne doivent être exécutés que lorsque les températures et l'humidité de l'élément en béton, ainsi que les conditions atmosphériques, le permettent. Ces paramètres doivent se situer dans les valeurs-limites fixées par le maître de l'ouvrage (voir sous 4.4.4.2).

4.4.3 Principes pour la protection de l'armature contre la corrosion

4.4.3.1 Généralités

Quand on veut planifier des mesures de remise en état, il est indispensable d'avoir bien compris les mécanismes de corrosion décrits dans le paragraphe 4.3. La base de travail, c'est l'état réel de l'ouvrage; pour le connaître, il faut procéder à un examen soigneux et à une évaluation précise de l'état. Cela fait, l'ingénieur de projet détermine, d'entente avec le maître de l'ouvrage, quel est l'état auquel il s'agit maintenant de parvenir.

Ci-après, nous présentons des solutions de principe et des postulats; ces indications ne concernent que les armatures normales, non précontraintes; on peut les appliquer aux éléments métalliques encastés.

- Protection anticorrosion par le rétablissement du milieu alcalin (principe de remise en état R)
Le principe repose sur la formation renouvelée d'une couche passive sur la surface de l'acier (repassivation) par l'application de matières d'entretien à base de ciment.
Le revêtement de surface de l'acier ne doit jamais empêcher la possibilité d'une repassivation.
- Protection anticorrosion par la limitation de la teneur en eau du béton (principe de remise en état W)
Le principe repose sur une diminution de la teneur en eau du béton, diminution qui réduit la conduction électrolytique de façon que la rapidité de corrosion chute pour se stabiliser à des valeurs pratiquement négligeables.
- Protection anticorrosion par le revêtement de l'armature (principe de remise en état C)
Le principe repose sur l'empêchement d'une division anodique du fer par la pose d'un revêtement approprié sur la surface du métal.
- Protection anticorrosion cathodique (principe de remise en état K)
En injectant du courant de façon ciblée dans l'armature, ou en disposant des anodes actives et passives aux endroits voulus, on provoque une

action cathodique de toute l'armature, empêchant ainsi la corrosion.

- Empêcher l'accès de l'oxygène à proximité de l'acier
On peut empêcher la corrosion en réduisant l'accès de l'oxygène à proximité de l'acier: il suffit de prévoir une couverture de béton suffisante. Toutefois, ce principe ne doit pas faire partie des mesures de remise en état, car il n'est que difficilement maîtrisable dans la pratique.

Si l'examen et l'évaluation de l'état des armatures indiquent qu'il existe des risques de corrosion en cas de poursuite de l'exploitation dans les conditions existantes, il s'agit d'analyser si l'on peut commencer par prendre des mesures préventives. Ces mesures dépendent de la cause de la corrosion en cours ou à venir. Les paramètres correspondants figurent dans le graphique 4.12.

Les mesures anticorrosion préventives peuvent être les suivantes:

- Réduction de la teneur en eau de l'élément.
- Réduction de la pénétration de CO_2 , c'est-à-dire élévation de la résistance à la carbonatation («frein de carbonatation»), p. ex. par la pose d'un système de protection des surfaces ou par l'habillage de l'élément au moyen d'un matériau approprié.
- Réduction de la pénétration de Cl^- , c'est-à-dire élévation de la résistance à la pénétration de chlorures.

Toutes ces mesures visent à réduire drastiquement les sollicitations indésirables.

On entend souvent dire qu'un arrosage intensif de la surface bétonnée suffit à débarrasser le béton des chlorures qui s'y cachent. Or des recherches ont démontré que ce n'est pas le cas. Comme on le constate en observant le graphique 4.21, ce procédé permet, certes, de réduire quelque peu le taux de chlorures en surface, mais aux dépens de la masse bétonnée dans laquelle elles pénètrent. Certains éléments sont rincés régulièrement par l'eau de pluie qui les débarrasse superficiellement des chlorures; c'est l'exception qui confirme la règle; or la règle veut que le taux global de chlorures reste toujours le même. L'arrosage du béton est donc une méthode peu recommandée puisqu'elle accroît le risque de corrosion de l'armature.

Il nous faut néanmoins constater que les principes de ce processus sont mal connus, faute de recherches.

De plus, lorsqu'on doit prendre des mesures de protection, il faut toujours veiller à ce qu'elles ne créent pas des conditions encore pires qui entraîneraient une augmentation de l'entretien. Ainsi, par exemple, en appliquant tel ou tel traitement chimique à la surface bétonnée, on peut lui faire perdre ses capacités d'adhérence et, de ce fait, compromettre de futures mesures de protection.

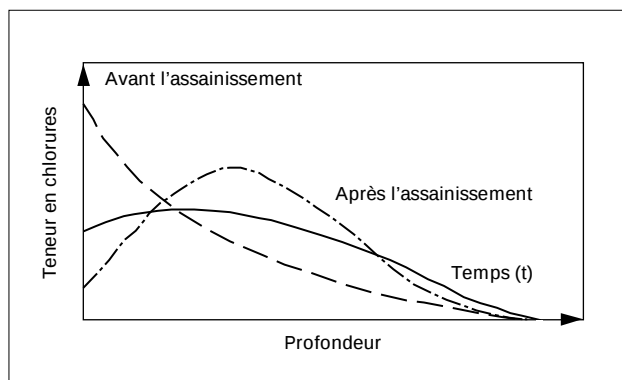


Figure 4.21: Modification de la concentration de Cl^- dans le béton avant et après un «assainissement» au moyen d'un arrosage de la surface bétonnée, selon [4.7]

4.4.3.2 Mesures d'entretien particulières dans les cas de corrosion dus à la carbonatation du béton

On commence par déterminer, grâce aux moyens appropriés et selon la recommandation SIA 162/3 (1990) [4.4], quelle est la composition de la couche de carbonatation sous la surface de l'élément (cf. schéma 4.22).

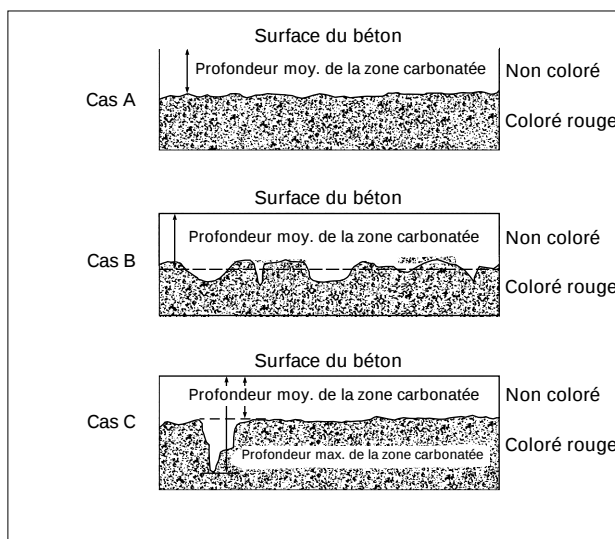


Figure 4.22: Evolution possible du front de carbonatation dans le béton, selon [4.7]

On a le choix entre plusieurs solutions:

- a) Rétablissement du milieu alcalin, selon le cas:
 - par une généreuse application de béton ou de mortier (principe de remise en état R1)
 - ou
 - par une amélioration locale effectuée à l'aide de béton ou de mortier (principe de remise en état R2).
 - Il existe un procédé qui se tient théoriquement, et que l'on applique depuis peu: c'est la réalcalinisation électrochimique (schéma 4.23). Ce procédé vise à réalcaliniser les zones voisines de l'armature de sorte à rétablir l'état initial au moyen de la pellicule passive de protection. Nous ne traiterons pas davantage de

cette méthode, puisque les experts sont divisés sur son action et sa fiabilité. Comme on le voit dans le schéma 4.24, il existe trois procédés électrochimiques sur lesquels on dispose de connaissances et d'expériences peu comparables. Le document [4.16] donne des précisions à ce sujet. En l'état actuel des choses, nous ne recommandons pas d'utiliser la réalcalinisation électrochimique.

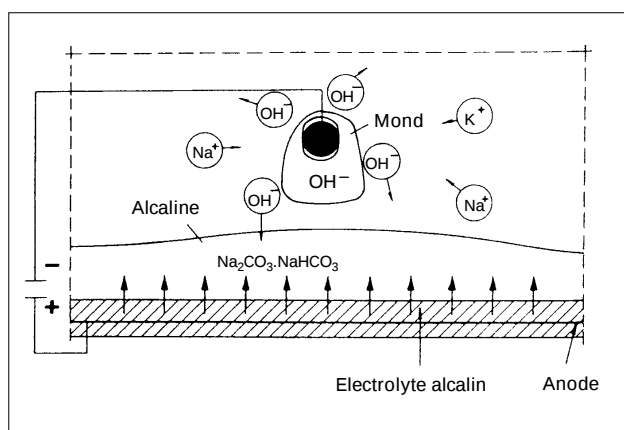


Figure 4.23: Réalcalinisation électrochimique, selon [4.15]

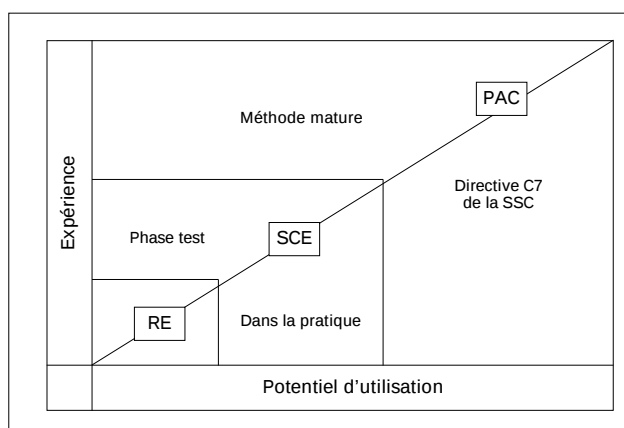


Figure 4.24: Etat des connaissances et de l'application des procédés électrochimiques, selon [4.17]

RE Réalcalinisation électrochimique
 SCE Dessalage électrochimique
 (paragraphe 4.4.3.3)
 PAC Protection anticorrosion cathodique
 (paragraphe 4.4.3.4)

Il nous reste la réalcalinisation à l'aide d'un apport de béton ou de mortier, procédés décrits ci-après, tels que définis par les principes de remise en état R1 et R2.

Une précision encore: quand des mesures de remise en état réclament la démolition de certaines surfaces de béton, on doit immédiatement penser à la sécurité. Si l'armature est trop abîmée par la corrosion, elle doit être remplacée.

De plus, il faut décider s'il y a lieu d'effectuer un goujonage (à cause de l'interaction entre le nouveau béton et l'ancien).

- Généreuse application de béton ou de mortier – Principe de remise en état R1: (R = Réalcalinisation)

Ce procédé vise à établir une action protectrice; pour ce faire, on applique, sur les zones à améliorer et sur toute la surface bétonnée, du béton (ou du mortier) à base de ciment (voir schéma 4.25). On peut appliquer l'enduit aussi bien sur la surface bétonnée originelle que sur des surfaces préalablement travaillées. Le béton (ou le mortier) d'entretien doit présenter une résistance suffisante à la carbonatation, de sorte à garantir une repassivation durable de l'armature, et de façon que la profondeur de carbonatation du béton rajouté demeure inférieure à l'épaisseur du nouveau revêtement, et ce jusqu'à la fin de l'affectation résiduelle. Il ne faut pas prendre en compte l'effet positif qu'apporteraient d'éventuelles mesures complémentaires de protection des surfaces: si l'on s'en tient aux principes que nous décrivons, on peut être sûr que les zones carbonatées de l'ancien béton seront durablement réalcalinisées par diffusion. L'armature aura retrouvé une protection suffisante.

Il ne faut démolir le béton que dans la mesure où la corrosion a fissuré, voire disloqué l'armature. La marge de sécurité S2 doit permettre un remplissage parfait par le béton d'entretien (marge à déterminer en fonction des conditions locales et de l'équipement en machines).

On n'utilise ce procédé que quand la profondeur moyenne de carbonatation n'arrive pas à moins de 20 mm de l'armature. Dans les zones où la profondeur moyenne de carbonatation pénètre jusqu'à moins de 20 mm de l'armature, il faut détruire le

béton jusqu'à l'armature, puis débarrasser cette dernière des matières corrodées qui la recouvrent.

Pour le béton (ou mortier) d'entretien, on utilise du ciment Portland.

- Amélioration locale effectuée à l'aide de béton ou de mortier – Principe de remise en état R2:

(R = Réalcalinisation)

Ce procédé ne vise qu'à une amélioration locale (cf. schéma 4.26). On l'utilise surtout quand le phénomène de corrosion est nettement circonscrit, soit que la profondeur de carbonatation n'est très marquée que localement, soit que l'on se trouve devant des revêtements relativement minces. Il faut dégager l'acier qui se trouve dans la zone de corrosion (zone carbonatée), et cela même s'il est en parfait état. Le béton (ou mortier) de remplacement doit présenter une alcalinité suffisante, et être assez dense et épais pour assurer une repassivation durable.

Pour améliorer la résistance à la carbonatation, on recouvre généralement toute la surface. N'oublions pas que l'effet de cette mesure est restreint dans le temps. On peut y renoncer si l'on peut satisfaire à l'exigence $\ddot{u}_2 \geq \Delta t_{K,I}$ hors de la zone à entretenir sans appliquer d'autre mesure d'entretien spécialisé.

On n'utilise le procédé R2 que quand $\ddot{u}_2$ est plus grand que 10 mm. Pour des revêtements plus minces, on utilisera la solution de principe C.

Les marges de sécurité S_1 et S_2 doivent permettre un remplissage parfait par le béton d'entretien (marges à déterminer en fonction des conditions locales et de l'équipement en machines). Si l'acier d'armature a un diamètre supérieur à 20 mm, (≥ 20 mm) l'épaisseur de la marge de sécurité S_1 devra être augmentée de 15 mm au moins.

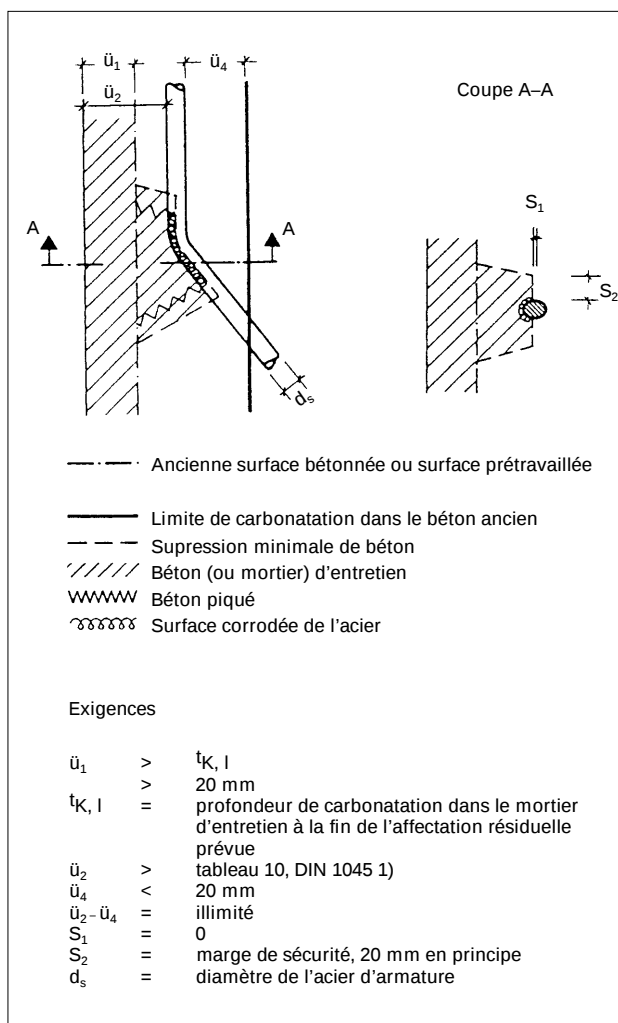


Figure 4.25: Principe de remise en état R1 – Représentation schématique des solutions de principe, selon [4.11]

1) Selon SIA 162 (1989) ou d'après les prescriptions du maître de l'ouvrage

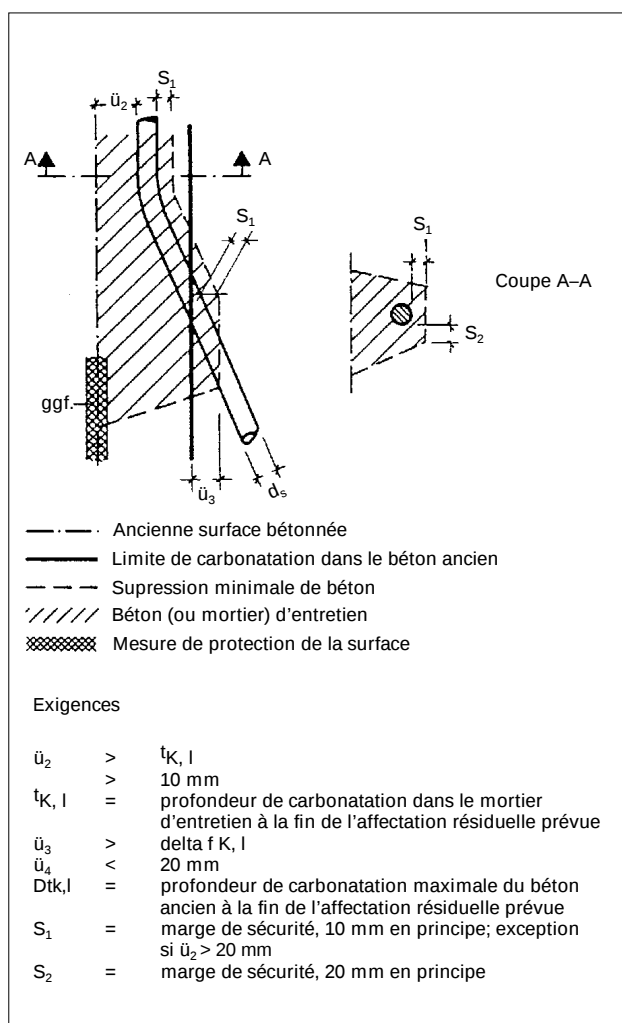


Figure 4.26: Principe de remise en état R2 – Représentation schématique de la solution de principe, selon [4.11]

b) Limitation de la teneur en eau du béton –
Principe de remise en état W

Ce procédé utilise la baisse et l'équilibrage de la teneur en eau, et donc la dépression continue qu'engendre le processus électrolytique partiel. Il est encore impossible de dire précisément quand la teneur en eau d'un béton atteint des valeurs-limites critiques; toutefois, l'expérience nous apprend que l'on parvient à éviter de nouveaux dégâts dus à la corrosion si l'on procède à un traitement de surface qui empêche désormais l'absorption d'eau, et qu'aucune autre source d'humidité n'apparaît (p. ex. humidité du sol, diffusion de vapeur d'eau en provenance des pièces, etc.). Le schéma 4.27 illustre cette solution de principe.

Il faut démolir le béton des zones défectueuses et au-delà, jusqu'à l'endroit où l'acier n'est pas corrodé. Si la corrosion n'a atteint la face externe que de la moitié de la surface occupée par l'armature, on peut opter pour la marge de sécurité $S_1 = 0$ (coupe B-B du schéma 4.27). Si l'acier d'armature a un diamètre supérieur à 20 mm, l'épaisseur de la marge de sécurité S_1 devra être augmentée de 15 mm, dans la mesure où cette précaution s'avère réellement utile. On n'omettra pas de penser aux effets que cette mesure peut exercer sur la sécurité à la rupture.

On peut utiliser tous les bétons et mortiers cités dans le paragraphe 4.4.6.

La réussite du procédé dépend de l'efficacité des mesures de protection des surfaces. Il ne faut utiliser que les types d'enduits que le paragraphe 4.4.7 désigne nommément pour ce procédé. La planification de l'entretien doit prévoir le contrôle régulier du traitement de surface ou de son renouvellement.

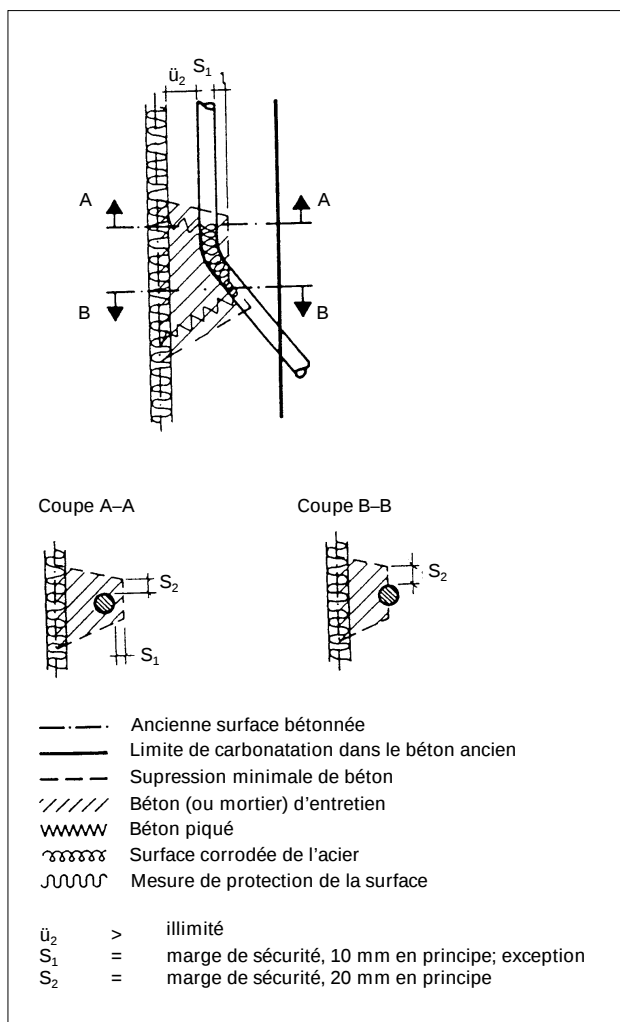


Figure 4.27: Principe de remise en état W – Représentation schématique de la solution de principe, selon [4.11]

c) Traitement de l'armature – Principe d'entretien spécialisé C:
(C = coating = enduit)

Quand on a appliqué le principe R et que le béton (mortier) d'entretien ne peut pas assurer une repassivation suffisante, ou quand on a appliqué la solution de principe R2 et que le revêtement bétonné n'excède pas 10 mm, ou quand on n'a pas pu ou pas voulu appliquer le principe W, l'armature doit être protégée contre la corrosion selon les principes de la construction métallique, et cela dans toutes les zones qui peuvent être dépassivées pendant le temps de l'affectation résiduelle prévue.

Ce procédé doit être utilisé en combinaison avec le procédé W, sauf si le béton (cf. schéma 4.28) peut être détruit sans que cette démarche entraîne une dépassection des zones concernées pendant le temps de l'affectation résiduelle prévue. En règle générale, on traite ensuite tout le revêtement bétonné à l'aide d'une protection anticarbonatation. On ne devrait y renoncer que si l'on est certain que les dégâts dus à la corrosion ne concernaient qu'une petite partie du revêtement. La protection des surfaces offre des effets positifs qui méritent d'être pris en considération.

On peut utiliser tous les bétons (mortiers) d'entretien que nous citons. Les dispositifs de protection anticorrosion pour l'acier d'armature doivent correspondre aux descriptions du paragraphe 4.4.6.

Pour répondre à l'exigence $\ddot{U}_3 < t_{K,1}$, une mesure de protection de la surface du béton doit se dérouler conformément aux indications de la section 4.4.7. Dans ce cas, la planification de la remise en état doit prévoir le contrôle régulier du traitement de surface ou de son renouvellement.

Si, conformément au principe de remise en état C, on détruit le béton pour dégager l'armature de sorte à pouvoir l'extraire, il faut la remplacer par de l'acier d'armature enduit à la résine époxy. La directive de l'Office fédéral des routes sur «l'utilisation des aciers d'armature enduits à la résine époxy» (1991) règlemente leur utilisation dans les ouvrages d'art du réseau routier et autoroutier national [4.18].

On peut également utiliser des armatures en acier inoxydable.

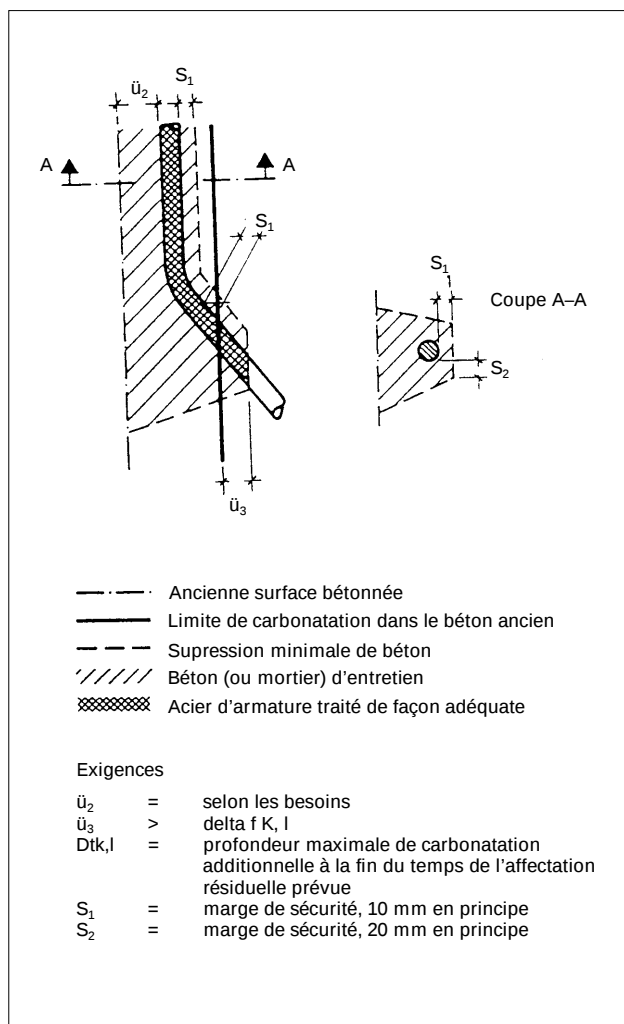


Figure 4.28: Principe de remise en état C – Représentation schématique de la solution de principe, selon [4.11]

4.4.3.3 Mesures de remise en état dans les cas de corrosion due aux effets des chlorures

Lorsqu'on définit les mesures de remise en état, il faut prendre en compte les mécanismes de dégradation dus aux effets des chlorures, mécanismes dont il a été question dans le paragraphe 4.3. Pour l'ingénieur de projet, il est important d'obtenir des informations complètes sur l'importance de la contamination par les chlorures, y compris des profils de profondeur. Selon les cas, le contrôle s'effectue de manière non-destructive grâce à la mesure du potentiel [4.9, 4.19, 4.20], ou de façon destructive au moyen de carottages (prélèvements solides ou pulvérisés) ou de sondages, suivis d'une analyse en laboratoire [4.21, 4.22].

Le niveau critique de la teneur en chlorures dans le béton dépend de divers facteurs (cf. tableau 4.2). D'autre part, il est important d'analyser correctement les résultats du contrôle en fonction de la méthode d'analyse choisie (voir les figures 4.29 et 4.30).

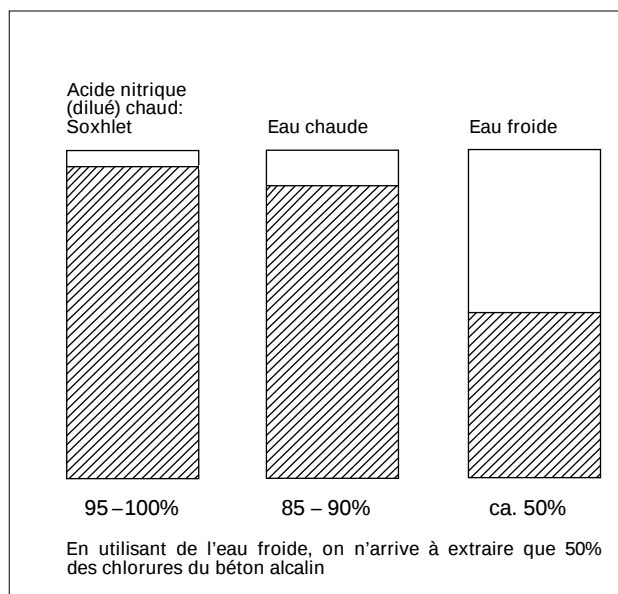


Figure 4.29: Détermination de la teneur en chlorures réalisée en laboratoire: le rendement des divers procédés d'extraction des chlorures, selon [4.22]
L'extraction à l'eau froide, selon [4.21], n'est pas recommandée

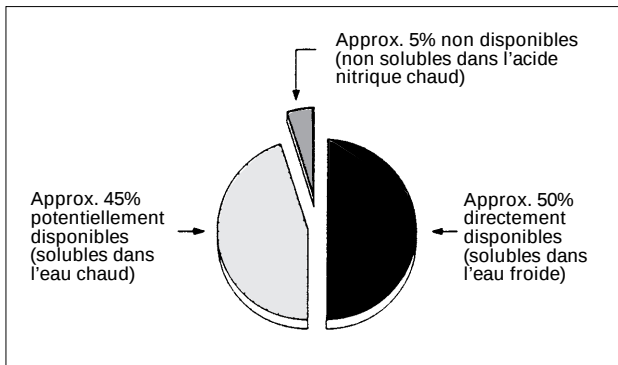


Figure 4.30: Près de 95% des chlorures responsables de la corrosion du béton peuvent être extraits, selon [4.22]

La littérature spécialisée et les ouvrages de référence n'indiquent pas les mêmes valeurs-limites de chlorures. Ce ne sont donc que des données indicatives; dans la pratique, on a adopté la valeur de 0,4% Cl^- de la masse du ciment. Si l'on découvre cette valeur-limite dans un élément proche de l'armature, c'est qu'il existe un risque de corrosion. Mentionnons toutefois que l'on connaît encore peu les processus de diffusion qui permettent aux chlorures de se déplacer ici et là dans la masse du béton.

Si l'on continue à soupçonner l'existence d'une teneur élevée en chlorures, on procédera à des sondages dans la couche de béton qui recouvre l'armature. Si ces sondages indiquent une teneur en chlorures supérieure à 0,2% de la masse du ciment ou à 0,03% de la masse du béton, il faut alors rechercher les compositions de concentration dans toute l'épaisseur de l'élément, là où la concentration de chlorures en surface était inquiétante. Si la couche de surface d'un élément en béton armé accuse un taux de chlorures supérieur à 0,5% Cl^- de la masse de ciment (ou supérieur à 0,2% Cl^- quand il s'agit d'éléments en béton précontraint), on demandera à un ingénieur spécialisé de définir les mesures à prendre, et cela même si aucun symptôme de corrosion de l'armature n'est visible en surface. Si l'on ignore la composition du béton, on estimera sa teneur en ciment en prenant une marge de sécurité.

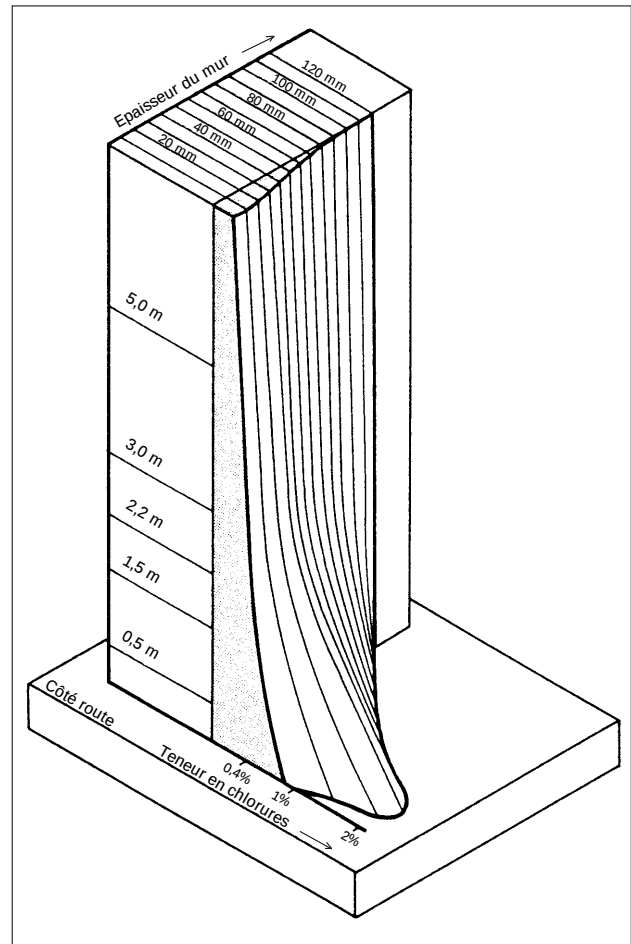


Figure 4.31: Répartition des chlorures dans un mur de soutènement érigé au bord d'une autoroute berlinoise, selon [4.7]

Il est possible de prendre les mesures de remise en état suivantes:

a) Rétablissement du milieu alcalin

En analogie avec 4.4.3.2 a), on dispose des solutions suivantes:

Revêtement épais de béton (ou mortier) alcalin – Principe de remise en état R1 – Cl^- : Quand on se trouve devant des éléments en béton armé dont la surface est dépassivée ou corrodée, il est impossible de procéder à la repassivation à l'aide d'un épais revêtement alcalin si la dépassivation est due à l'effet de chlorures.

On ne peut appliquer ici sans autre la solution de principe R1 (décrite en 4.4.3.2, corrosion due à la carbonatation du béton). Il s'agit donc de détruire le béton jusqu'à l'armature, en prenant une bonne marge de sécurité (selon la figure 4.32), partout où un taux de chlorures excessif a été constaté, et cela qu'il existe ou non des symptômes de corrosion aux abords immédiats de l'armature. La marge de sécurité S3 compense les instabilités de la profondeur de pénétration des chlorures; elle devrait être appliquée partout où l'on constate une instabilité supérieure à celle indiquée dans la figure 4.33.

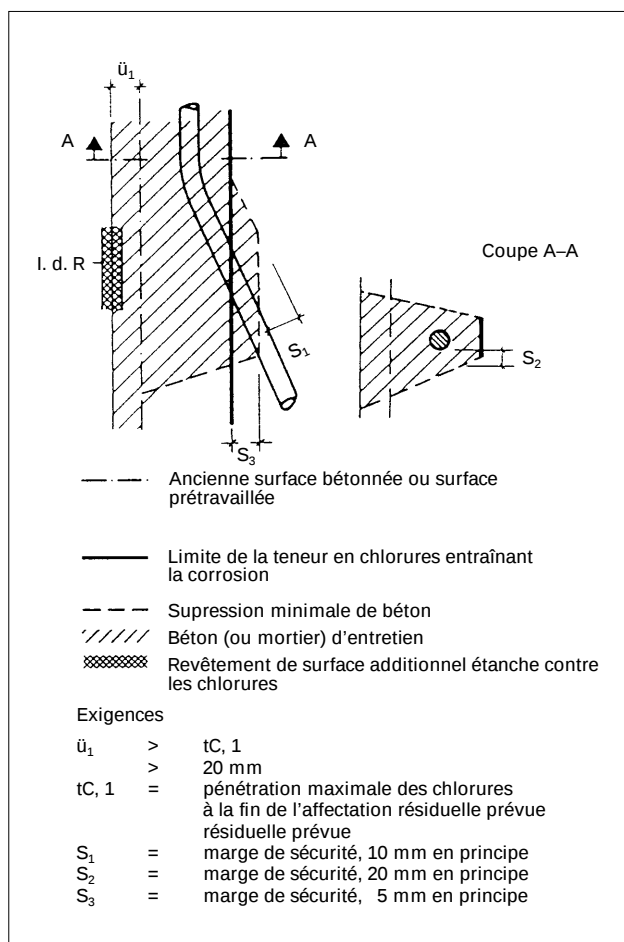


Figure 4.32: Principe de remise en état R1-Cl. Représentation schématique des solutions de principe, selon [4.11]

Le revêtement de béton (ou mortier) alcalin (et, le cas échéant, une protection des surfaces) vise à empêcher toute nouvelle pénétration de chlorures pendant la durée d'affectation résiduelle prévue. Il faut y ajouter, en principe, une couche pelliculaire étanche destinée à prévenir l'infiltration de chlorures; on applique cette couche sur la surface bétonnée. Le béton (ou mortier) d'entretien doit être composé de sorte à garantir que les chlorures corrosifs présents dans l'ancien béton ne viennent pas envahir le matériau d'entretien que l'on vient de poser. Pour cela, il convient de suivre les indications du paragraphe 4.4.6.

Amélioration locale au moyen de béton ou de mortier alcalin – Principe de remise en état R2 - Cl:

Les exigences et les conditions sont sensiblement les mêmes que celles formulées dans le principe de remise en état spécialisé R2. La limite de la teneur en chlorures entraînant la corrosion correspond à la limite de carbonatation indiquée dans la figure 4.26. La méthode de protection des surfaces doit désormais empêcher l'infiltration de chlorures.

- b) Limitation de la teneur en eau du béton – Principe de remise en état W – Cl:

La présence de chlorures dans le béton élève la conductivité électrolytique. C'est la raison pour laquelle les mesures de protection destinées à abaisser et à équilibrer la teneur en eau doivent être plus efficaces que celles que l'on prend pour lutter contre la corrosion par carbonatation. Là aussi, on ne dispose encore que de connaissances insuffisantes; on n'utilisera donc ce procédé qu'après avoir effectué des essais sur des surfaces ou des éléments de référence; ces essais permettront d'observer quels effets les mesures prévues exercent sur l'évolution de la corrosion de l'armature. On procédera, par exemple, en installant un dispositif approprié destiné à mesurer le degré de corrosion.

Pratiquement, les exigences et les conditions sont les mêmes que celles mentionnées dans le principe de remise en état W. Simplement, on remplace la limite de carbonatation indiquée dans la figure 4.26 par la limite de la teneur en chlorures entraînant la corrosion.

On peut utiliser tous les bétons (ou mortiers) d'entretien spécialisé mentionnés dans le paragraphe 4.4.6.

Le système de protection des surfaces doit répondre aux exigences citées dans le paragraphe 4.4.7, de sorte à empêcher l'infiltration de chlorures.

c) Traitement de l'armature – Principe de remise en état C – Cl:

Les exigences et les mesures sont fondamentalement les mêmes que pour le principe de remise en état C.

Là aussi, on remplace la limite de carbonatation (fig. 4.26) par la limite de la teneur en chlorures entraînant la corrosion.

d) Extraction des chlorures (ou décontamination)

Depuis plusieurs années, chercheurs et entreprises développent des méthodes électrochimiques destinées à réduire la teneur en chlorures des ouvrages en béton (cf. fig. 4.33 et 4.34).

Dans certains pays, on dispose déjà d'une certaine expérience pratique dans ce domaine. Le document [4.16] résume l'état des connaissances à ce jour. Comme le montre la figure 4.24, ce procédé atteint tout juste son seuil de fiabilité et n'atteindra sa maturité que lorsqu'une quantité de questions auront enfin trouvé leur réponse.

Selon le document [4.11], on ne dispose pas encore, à l'heure où paraissent ces lignes, d'un procédé véritablement sûr pour l'extraction des chlorures. On ne peut donc y faire appel que dans des cas particuliers où l'on est sûr de pouvoir procéder à l'extraction sans modifier l'alcalinité et la teneur en eau du béton, et de sorte à éviter ainsi, à long terme, tout inconvénient dû à la corrosion. De plus, il faut veiller à ce que cette mesure ne provoque pas de dégâts aux joints en pâte de ciment.

Reste le danger de propagation des chlorures à de grandes profondeurs. Il faut, après l'extraction, établir un profil de la répartition des chlorures à proximité de l'armature et jusqu'à 5 cm plus profond au moins.

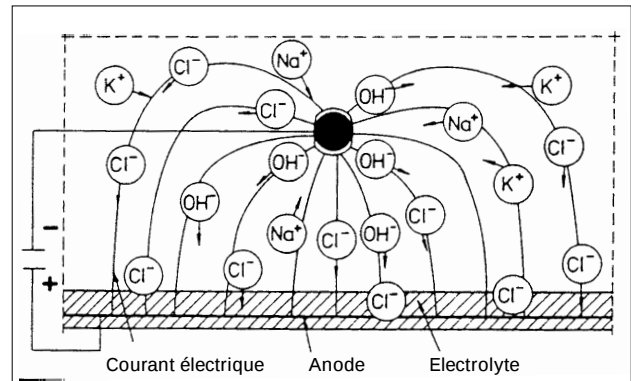


Figure 4.33: Extraction électrochimique des chlorures, selon [4.16]

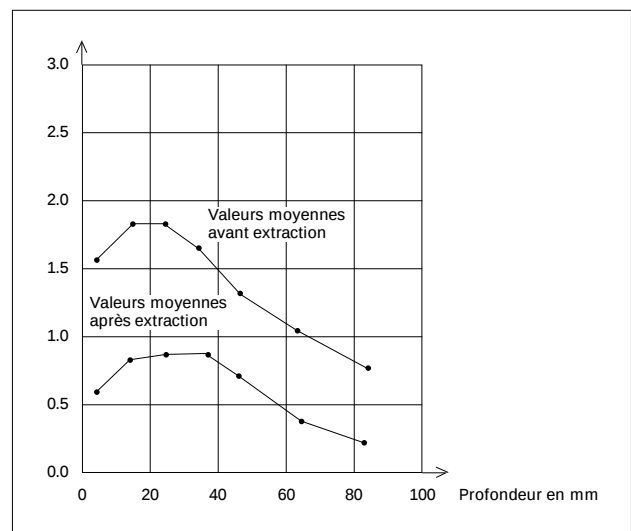


Figure 4.34: Exemple d'extraction des chlorures – Résultat du dessalage après 3 semaines, selon [4.16]

4.4.3.4 Protection anticorrosion cathodique – Principe remise en état K

Le principe de la protection anticorrosion cathodique est connu depuis longtemps; on l'utilise avec succès dans l'entretien des conduites souterraines. C'est au début des années 70, en Amérique du Nord, que l'on a commencé à l'appliquer au béton armé. Dans notre pays, voilà plus de 6 ans que l'on mène des recherches et des projets-pilotes [4.23, 4.24].

Le principe de la protection anticorrosion cathodique est le suivant: on procède à l'injection contrôlée d'un courant étranger et/ou à la disposition d'anodes actives ou inertes, de sorte à rendre l'armature cathodique. La corrosion ne peut donc pas apparaître (fig. 4.35).

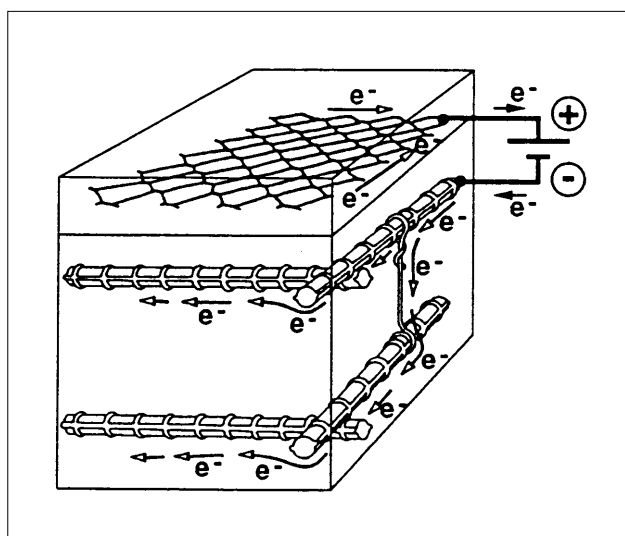


Figure 4.35: Principe de la protection anticorrosion cathodique avec anodes inertes et source de tension continue, selon [4.23]

Cette mesure convient aussi aux ouvrages gravement contaminés par les chlorures. Les expériences effectuées se sont avérées positives mais le procédé requiert une certaine science en la matière. La Commission anticorrosion a publié une directive sur la planification, l'exécution et la surveillance de la protection anticorrosion cathodique des ouvrages en béton armé [4.25].

4.4.4 Couches de support et conditions atmosphériques

4.4.4.1 Généralités

On oublie souvent l'influence considérable de la couche de support et des conditions atmosphériques lorsqu'il s'agit de poser des matériaux additionnels sur des éléments existants.

Que ce soit à sa surface ou près de sa surface, la couche de support doit posséder des propriétés bien définies. La longévité dépend essentiellement de la qualité d'adhérence. C'est pourquoi l'interface ne doit pas reposer sur du béton abîmé, pas plus qu'elle ne doit comporter des saletés susceptibles de gêner la liaison.

Citons ici brièvement un intéressant travail de recherche mené à l'ETH de Zurich. Ce travail porte notamment sur le problème de la liaison résistante au cisaillement des anciennes et des nouvelles constructions. Par des simulations, on a observé le comportement des surfaces de contact et de leur érosion, ainsi que les divers effets du goujonnage. Il s'est avéré que l'efficacité des goujons dépendait considérablement du degré de rugosité. Ce travail visait notamment à définir les exigences de rugosité des surfaces. On attend le rapport final pour la fin 1992 [4.13].

En ce qui concerne les conditions atmosphériques admissibles pendant l'application et le post-traitement des systèmes de protection, on se basera sur les données recueillies lors des mesures de remise en état particulières.

4.4.4.2 Exigences

Les bétons (ou mortiers) d'entretien et les méthodes de protection des surfaces qui sont cités dans les paragraphes 4.4.6 et 4.4.7, font l'objet de certaines exigences relatives à leurs propriétés:

- Qualité des surfaces
Il ne s'agit pas seulement de la surface proprement dite, mais aussi de la couche de surface (attention aux fissures).
Pour la réparation locale, resp. pour les enduits posés à plat, la couche de support doit:
 - être débarrassée des parcelles détachées ou friables (p. ex. aussi des angles de fissures) ainsi que des couches qui se défont facilement

(p. ex. la peau de ciment); être repiquée et nettoyée;

- être dépourvue de fissures ou d'écaillures en formation qui se développeraient parallèlement à la surface;
- être dépourvue d'arêtes;
- présenter des propriétés de rugosité appropriées au matériau qu'elle recevra;
- être dépourvue de substances étrangères (résidus de caoutchouc, séparateurs, restes d'anciens enduits, efflorescences, huile, etc.).

Les nids de gravier et autres irrégularités doivent être corrigés comme il se doit.

En ce qui concerne les fissures qui se présentent perpendiculairement à la surface, référez-vous au paragraphe 4.4.8. En ce qui concerne l'humidité des surfaces, voir page suivante. Pour les imprégnations, se référer aux indications du fabricant.

– Propriétés mécaniques

Il s'agit avant tout de la résistance à la traction dans la zone superficielle du béton. Pour les valeurs exigées et les tests à effectuer, se référer à la littérature spécialisée, p. ex. [4.26, 4.7] ainsi qu'au tableau 4.4.

– Propriétés chimiques

Les critères relatifs aux propriétés chimiques de la couche de support concernent surtout la question du front de carbonatation et de l'évolution de la teneur critique en chlorures. Veuillez vous référer au paragraphe 4.4.3.

– Humidité du béton

Immédiatement avant l'intervention locale (imprégnation ou enduit à plat), la zone concernée doit répondre aux exigences suivantes:

- la plupart des bétons (mortiers) à base de résine synthétique, les produits d'imprégnation et les enduits pelliculaires doivent être appliqués sur un béton sec à très légèrement humide;
- la couche de support doit être humide pour l'application d'une couche à base de ciment ou d'un pont de liaison, pour une réparation locale au moyen de béton (mortier) contenant ou non des additifs synthétiques, et pour l'application d'enduits dispersifs pelliculaires synthétiques;
- si l'on emploie la méthode de protection OS8 qui exige des additifs particuliers, la couche de support doit être mouillée (les diverses sortes de protection des surfaces sont répertoriées dans le tableau 4.9).

La directive [4.11] donne les définitions suivantes:

- «Sec»: une surface de rupture toute fraîche, d'une profondeur de 2 cm, ne doit pas s'éclaircir à cause du séchage (contrôle de visu). En cas de doute, on considère que le béton est sec quand il présente une humidité de 23/50.
- «Humide»: la surface offre un aspect humide terne sans présence d'une pellicule d'eau brillante. Le système poreux de la couche de support ne doit pas être saturé d'eau, c'est-à-dire que les gouttes que l'on verse à la surface doivent être absorbées, et que la surface doit reprendre rapidement son aspect antérieur.
- «Mouillé»: le système poreux de la couche de support doit être saturé; la surface doit être brillante mais sans être recouverte d'une pellicule d'eau.

Si le fabricant mentionne des valeurs précises, il faut oublier les définitions ci-dessus au profit de celles indiquées dans la documentation relative au produit.

– Températures

Le tableau 4.6 présente les valeurs indicatives pour les températures de la couche de support et de la couche d'air avoisinante. Ces valeurs font foi à défaut d'indications précises. Il faut tenir compte de l'évolution de la température pendant l'exécution des travaux et pendant la période qui suit (à déterminer): refroidissement nocturne, particularités locales, etc.

Pour les matériaux synthétiques, la température de la surface du béton et des couches immédiatement inférieures doivent toujours se situer au moins 3K au-dessus du point de rosée.

– Autres conditions atmosphériques

Pour autant que les matériaux utilisés ne fassent pas l'objet d'indications spéciales de la part du fabricant, on peut se fier aux données que fournit le tableau 4.7.

– Vibrations

Comme c'est notamment le cas pour les travaux qui concernent les ponts, les mesures de remise en état doivent parfois composer avec les vibrations engendrées par le trafic, voire par les travaux eux-mêmes. Il faut auparavant s'assurer que les matériaux prévus supporteront cette nuisance, ou s'il convient de réduire les trépidations. Voilà un problème qui n'a encore jamais été traité de façon exhaustive. On trouvera quelques indications utiles dans la littérature spécialisée [4.7, 4.27].

	Mesures de protection ou de remise en état: Réfection locale soit application d'un enduit à plat	Résistance des surfaces à la traction ¹⁾		Divers
		Valeur moyenne	Valeur minimale	
		N/mm ²		
	1	2	3	4
1	Béton/mortier à base de ciment, aussi avec additifs synthétiques	≥ 1,5	≥ 1,0	Indiquer résistance à la traction et le module E ^{2), 3)}
2	Béton /mortier à base de résine réactive pour les surfaces non carrossables	≥ 1,5	≥ 1,0	–
3	OS2, OS4 ⁴⁾	–	≥ 0,5	–
4	OS3 ⁴⁾	–	≥ 0,5	–
5	OS5 ⁴⁾	≥ 1,0	≥ 0,8	–
6	OS6, OS7, OS9, OS10, OS11 ⁴⁾	≥ 1,5	≥ 1,0	–
7	OS8, OS12 ⁴⁾	≥ 2,0	≥ 1,5	–
¹⁾ La résistance des surfaces à la traction se rapporte au procédé avec préforage (cf. DIN 1048, partie 2) ²⁾ Quand classe de contrainte M3 ³⁾ C'est à l'ingénieur de projet de déterminer les exigences de cas en cas ⁴⁾ OS voir paragraphe 4.4.7 ⁵⁾ En fonction de la charge				

Tableau 4.4: Propriétés mécaniques, selon [4.11]

	Procédé		Fonctionnement 1)	Application												Exigences particulières	Charge, profondeur de la démolition impact	Traitement ultérieur minimum	Dépollution, protection de l'environnement 5)	
	Genre	Outillage		But 2)				Surface				Situation 3)	Dimensions 4)							
				A	B	C	D	w	s	û	ô		f							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17				
1	Découpage	Meuleuse d'angle	m	—	—	—	—	x	x	x	N'importe quelle longueur		Outils appropriés	Selon l'outil, jusqu'à		Aspiration	Poussière, bruit			
2		Coupe-béton	M						(x)						3 cm	Aspiration	Eau, boue, bruit			
3	Renforcement	Trépan	m	(x)	x	—	x	x	x	(x)	x	—	Outil acéré. Attention à l'armature	Ebranlement dégâts plus profonds	(Projection, balayage) Soufflage et aspiration	Poussière, bruit				
4			M													50 cm	Aspiration			
5	Percussion	Appareil à secousses	m	—	x	—	—	x	x	—	x	—	—	Ebranlement dégâts plus profonds	(Projection, balayage) Soufflage et aspiration	Poussière, bruit				
6			M																	
7			m	—	—	—	x	x	x	x	x	—					Aspiration	Poussière, bruit		
8	Fraisage	Fraiseuse	m	x	x	—	—	x	x	x	x	—	Outil acéré	Selon la résistance du béton et le réglage de l'outil, approx.	(Projection, balayage) Soufflage et aspiration	Aspiration de la poussière				
9			M													1-3 mm	Vibrations			
10	Abrassage (surfaçage, fissures)	Meuleuse	m	x	—	—	(x)	x	x	(x)	x	x	Profondeur <2 mm	Soufflage ou aspiration	Soufflage ou aspiration	Poussière, bruit				
11			M													3-8 mm	Aspiration de la poussière, bruit			
12	Jet	Matériau de projection solide 6)	m	x	x	—	x	x	x	x	x	—	Air comprimé sans eau	Dépend de la durée du brûlage et de la résistance du béton jusqu'à quques mm	Soufflage ou aspiration	Aspiration de la poussière				
13			M																	
14		Mélange eau/sable	m	x	x	—	x	x	x	x	x	x	x	Air comprimé avec <0,01 ppm de lubrifiant	Rincer à l'eau sous pression, sécher dans la mesure du possible	Eau, boue				
15			M																	
16	Eau sous haute pression > 600 bar	Appareils de projection	m	x	x	—	x	x	x	x	(x)	x	Eau sans matières susceptibles d'endommager le béton	Dépend de la durée, de la pression et de la résistance du béton jusqu'à quques mm	Sécher dans la mesure du possible	Poussière				
17			M																	
18	Brossage	Brosse à main	m	—	—	(x)	—	x	x	x	(x)	x		Profondeur <1 mm	Soufflage ou aspiration	Poussière				
19																				
20																			La poussière est presque entièrement aspirée	

Tableau 4.5: Procédés à appliquer pour respecter les exigences, selon [4.11]

	Procédé			Application										Exigences particulières	Charge, profondeur de la démolition impact	Traitement ultérieur minimum	Dépollution, protection de l'environnement
	Genre	Outillage	Fonctionnement 1)	But 2)				Surface									
				A	B	C	D	Situation 3)			Dimensions 4)						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
21	Balayage	Balai	m	—	—	x	—	x	x	x	—	x	—	Soufflage ou aspiration	Les balayures sont aspirées		
22		Balai magnétique	M	—	—	—	—	x	—	—	—	—	—				
23		Balayeuse	M	—	—	—	—	x	—	—	—	—	—				
24	Soufflage		m	—	—	x	—	x	x	x	—	x	Air comprimé avec <0.01 ppm de lubrifiant sans eau. Ne pas projeter sur la poussière	—	—	Poussière	
25	Aspiration	Aspirateur industriel	m	—	—	x	—	x	x	x	x	x	Tenir le filtre en état	Procédé de finition	—	—	
26	Brûlage	Chalumeau	m	x	x	—	—	x	x	x	x	—	Vitesse et couche de couverture minimales	Démolition jusqu'à 3 mm	Balayage, projection avec des matériaux solides (avec du sable de quartz pour le béton projeté), aspirer	—	
27			M	—	—	—	—	x	—	—	—	x					x
28	Projection d'infrarouges		m/M	—	—	x	—	x	x	x	x	x	—	—	—	—	
29	Air chaud		m/M	—	—	x	—	x	x	x	x	x	—	—	—	—	
30	Jet d'eau bouillante 7)	Appareil de projection	m	—	—	x	—	x	x	(x)	—	x	Additifs inoffensifs pour l'environnement, l'armature et la stratification	—	Si additifs, rincer à l'eau claire	Eau	
31	Jet de vapeur 7)		—	—	—	x	—	x	x	x	x	x					(Eau)
32	Traitement par substances chimiques		(m)	x	—	—	—	x	x	(x)	(x)	—	Connaissances professionnelles particulières, fiabilité pour le bâtiment et l'environnement	Varie selon les cas	Récupérer les résidus dus au traitement	Eau 5)	
33	Projection contre	Vent Précipit.	—	—	—	—	—	x	x	x	—	x	—	—	—	—	
34		Vent Précipit. Gel	—	—	—	—	—	—	x	x	x	—	x	—	—	—	—
35	Chauffage isothermique	Couverture isothermique Protection Projection de chaleur	—	—	—	—	—	x	x	x	—	x	—	—	—	—	
36	Limiter et éviter les ébranlements	Entraver les phénomènes parasites, condamner l'accès	—	—	—	—	—	x	x	x	—	—	Élément de construction	—	—	—	

Données entre parenthèse selon le genre d'outillage et l'emplacement

1) m Effectué manuellement
M Effectué mécaniquement

2) A Eliminations des couches les plus fines, des vieilles stratifications, des pellicules de post-traitement, des saletés.
B Démolition du béton endommagé et mise au jour de l'armature
C Nettoyage de saletés isolées et élimination des pellicules d'eau
D Réparation de défauts isolés

3) p point bas

4) i incliné à vertical
a au-dessus de la tête
l local
s sur toute la surface

5) En cas de souillure du béton par des substances étrangères, prendre garde aux dispositions légales

6) Sable, granulats, corindon, billes ou grenaille d'acier

7) En principe avec des additifs agissant en surface

Tableau 4.5 (suite)

	Matériau additionnel	Valeur minimale °C	Valeur maximale
	1	2	3
1	Matières à base de ciment, aussi avec additifs synthétiques	5	3
2	Résines réactives et béton/mortier à base de résines réactives OS3 et 6 à 12), ainsi que matériaux de remplissage des fissures	8	40
3	Systèmes de protection des surfaces à un composant, contenant un diluant: OS1 et 2 ¹⁾ OS4 ¹⁾	5 8	30 30
4	Systèmes de protection des surfaces étanches à l'eau (OS5) ¹⁾	10	40
¹⁾ OS voir paragraphe 4.4.7			

Tableau 4.6: Températures limites du substratum bétonné et de l'espace creux environnant (valeurs indicatives), selon (4.11)

	Donnée météo	Matériaux à base de ciment, aussi avec additif synthétique	Matériaux à base de produits synthétiques
	1	2	3
1	Air relativement humide	Aucune exigence	Température du béton > au moins 3K au-dessus du point de rosée
2	Précipitations	Pas de pluie	Ni pluie ni bouillard
3	Vent/Soleil	Dessèchement par le vent (exigence < 3 Beaufort, c.à.d. < 5 m/s) et/ou éviter l'ensolleillement	Evacuer la poussière

Tableau 4.7: Conditions atmosphériques indépendamment de la température, selon [4.11]

4.4.5 Prétraitement de l'armature

4.4.5.1 Généralités

Les travaux décrits ci-après se rapportent aux aciers d'armature compris dans le sens des normes SIA 162 et 162/4. Par analogie, ils s'appliquent également aux éléments de construction. Si l'élément à rénover comporte des aciers d'armature galvanisés, recouverts d'un enduit synthétique ou précontraints, mieux vaut demander l'avis d'un spécialiste.

On trouve des références relatives au prétraitement de l'armature dans les documents [5.6] et [4.11].

4.4.5.2 Décapage de la surface de l'acier

On entend parfois dire qu'il ne faut pas décaper les surfaces d'acier corrodées si le degré de corrosion est trop faible pour que l'on s'en préoccupe. Cette idée ne tient pas debout. Exception (qui confirme la règle): l'utilisation d'une protection anticorrosion cathodique (principe de remise en état K, voir paragraphe 4.4.3.4). Grâce à ce procédé, on peut effectivement se dispenser de décaper l'acier d'armature.

On nettoie mécaniquement l'acier d'armature apparent. Pour ce faire, on applique les principes de remise en état cités dans le paragraphe 4.4.3; dans tous les cas, on s'abstiendra d'utiliser ce qu'on appelle des «transformateurs» et des «stabilisateurs» de rouille.

Les exigences du décapage dépendent du principe de remise en état que l'on compte appliquer. Le document [4.11] mentionne les exigences suivantes:

- Principes de remise en état R et W:
Les surfaces d'acier qui ne recevront pas d'enduit doivent être traitées de manière à atteindre, dans les zones apparentes, un degré de propreté St2 ou Sa2. Le dérouillage se fait généralement à la main, ou par projection d'un matériau sec ou humide (sablage), ou encore à l'eau sous pression (≥ 600 bar). Le dérouillage à l'eau sous pression équivaut à un degré de propreté St2 même si l'effet optique ne correspond pas parfaitement au modèle photographique que donne DIN 55 928, partie 4. En cas de corrosion due à des chlorures, le traitement doit débuter par un décapage à l'eau sous pression.

- Principe de remise en état C:

Les surfaces d'acier destinées à recevoir un enduit doivent, après traitement, atteindre un degré de propreté Sa2 1/2. Il faut donc les traiter par projection d'un matériau sec ou humide. La projection d'un matériau humide permet de satisfaire immédiatement aux exigences. Les exigences de propreté sont les mêmes pour toute la surface de l'acier à traiter, même pour les parties qui ne sont pas directement exposées au jet (face cachée, intersections, etc.). Pour satisfaire aux exigences, il faut adapter les principes mentionnés dans les paragraphes 4.4.2 et 4.4.3. En cas de corrosion due aux chlorures, il est indispensable d'effectuer un prétraitement à l'eau sous pression.

4.4.5.3 Traitement de la surface de l'acier

On recourt au traitement de l'acier d'armature quand aucune autre mesure ne permet d'assurer une protection suffisamment durable contre la corrosion. Il s'agit ici d'une mesure dont l'application concrète se révèle plutôt problématique, et pour laquelle on ne peut opter que dans des cas exceptionnels.

Comme nous l'avons mentionné dans le paragraphe 4.4.3.2, on peut remplacer intégralement l'acier endommagé par une armature traitée à la résine époxy [4.18].

Si l'on doit traiter l'armature d'un ouvrage existant, on peut appliquer les principes de protection des surfaces destinés à la construction métallique [5.6], tout en tenant compte des spécificités du béton armé (voir également les références qui suivent). A cet effet, on utilise généralement la modification possible du comportement mixte qui se produit lorsqu'on pose des aciers traités. Selon les cas, il peut être utile de déterminer la propriété d'adhésivité en appliquant le test n° 35 de la norme SIA 162/1 (1989).

Parmi les matériaux de traitement, citons les durcisseurs réactifs et les coulis de ciment modifiés synthétiquement.

Le travail doit se dérouler conformément aux indications du fabricant. On se gardera de dépasser les valeurs limites de température et d'humidité. A cet égard, veuillez vous référer au paragraphe 4.4.4.

Dans les procédés d'application par couches successives des durcisseurs réactifs, l'épaisseur minimale de chaque couche doit être de 300 microns au moins.

L'épaisseur de couche du coulis de ciment modifié synthétiquement doit atteindre 1000 microns en tout cas. Le travail se déroule en deux phases au moins. Un sablage n'est pas indispensable. Pour davantage de précisions, veuillez vous référer aux indications du fabricant.

La zone intermédiaire (entre les parties de l'acier à traiter et les parties noyées dans le béton) réclame une attention toute particulière. On évacuera soigneusement les débris. L'application de l'enduit doit dépasser le métal pour aller recouvrir le béton voisin sur un millimètre. Eviter d'appliquer un autre enduit sur le béton.

Il faut veiller à ce que le béton d'entretien puisse adhérer correctement à l'enduit protecteur de l'acier. Les substances de l'enduit doivent pouvoir résister à l'alcalinité de la pâte de ciment, constituant ainsi une bonne protection anticorrosion.

4.4.6 Bétons et mortiers de remise en état

Les travaux de remise en état exigent les bétons et mortiers suivants:

- Béton conforme aux normes SIA 162 et 162/1 (1989)
Les exigences des normes ci-dessus sont contraignantes. Toutefois, elles ne sauraient suffire et on les complétera par les données citées dans le paragraphe 4.2 (p. ex. pour le facteur eau/ciment).
- Béton projeté
Jusqu'aujourd'hui, notre pays n'a pas encore totalement réglementé la fabrication de béton projeté. On trouvera des indications utiles dans le document [4.28], notamment en ce qui concerne les constructions souterraines. Toutefois, le document précité ne constitue qu'un projet non encore agréé.
Des gouvernements étrangers ont publié un certain nombre de normes, ainsi, par exemple, la norme allemande DIN 18 551 [4.29]. Pour des informations complémentaires sur le béton projeté en général et ces normes en particulier, veuillez vous référer au document [4.30].

On dispose également de résultats de recherches menées à l'ETH de Zurich [4.27 et 4.31 à 4.33].

- Mortier de ciment
Pour la fabrication du mortier de ciment, on se référera avantagement aux indications concernant la fabrication du béton.
- Bétons et mortiers de ciment modifiés synthétiquement
La Suisse n'a pas encore réglementé la fabrication de ces matériaux. Le document [4.26] recommande de rechercher toutes les données utiles dans les fiches techniques publiées par les fabricants.
- Bétons et mortiers à base de résine réactive
Voir les remarques émises plus haut.
Les bétons et mortiers à base de résine réactive conviennent aux travaux de remise en état seulement quand:
 - il faut obtenir une capacité de résistance chimique très élevée, doublée d'une forte résistance à l'abrasion;
 - on désire un durcissement extrêmement rapide;
 - on se trouve dans l'impossibilité de procéder au post-traitement qu'exigent le béton et le mortier à base de ciment, que ces matériaux contiennent ou non des additifs synthétiques;
 - on ne parviendrait pas, en utilisant du béton ou du mortier à base de ciment pour des applications de grande surface (> 1m²), à atteindre les valeurs indicatives d'épaisseur de couche indiquées dans le tableau 4.8.
 Vous trouverez d'autres indications sur ce sujet dans les fiches techniques publiées par les fabricants et dans le document [4.11].
- Remarque
Il serait temps d'envisager l'introduction systématique, dans les nouvelles normes SIA, de notions telles que la garantie de qualité, le test préalable, la surveillance intégrée et la surveillance assurée par des instituts. Il faut, en outre, fixer les règles du jeu et formuler clairement les exigences. La directive DafStb [4.11] peut servir de document de référence en attendant l'introduction des normes CEN (voir paragraphe 4.4.1). Cette remarque vaut également pour les produits cités dans les paragraphes 4.4.7 et 4.4.8.

Genre de béton resp. de mortier		Diamètre maximum des grains mm	Epaisseur de la couche inf. sup. mm	
1		2	3	4
Béton		< 4	30	–
Mortier		≥ 4	20	40
Modifié synthétiquement	Béton Mortier	> 4 ≥ 4	30 10 ¹⁾	– 40
A base de résine réact.	Béton Mortier	> 4 ≥ 4	15 5	40 15

Tableau 4.8: Valeurs indicatives pour les épaisseurs de couches d'applications importantes, selon [4.11]

¹⁾ Pour le rétablissement de l'environnement alcalin favorable à la protection anticorrosion au moyen de béton ou de mortier modifié synthétiquement, l'épaisseur minimale de la couche dans les interventions d'entretien spécialisé «R1» (cf. paragraphe 4.4.3.2): $\bar{U}1 = 20 \text{ mm}$

4.4.7 Systèmes de protection des surfaces

On trouve aujourd'hui sur le marché une quantité incroyable de produits et de systèmes de protection des surfaces. Notre point de vue à cet égard est le même que celui que nous avons exprimé dans le paragraphe 4.4.6 à propos des bétons modifiés synthétiquement ou à base de résine réactive. Là aussi, tant pour la planification que pour l'exécution, on se référera aux indications du fabricant. On manque considérablement de données comparatives et d'indications physiques et chimiques qui permettraient de s'y retrouver exhaustivement.

En attendant l'introduction d'une norme européenne, il semble raisonnable de se référer à [4.11], d'autant plus que cet ouvrage cite un certain nombre de fabricants connus dont les produits ont satisfait aux tests préliminaires.

Le tableau 4.9 distingue 12 classes de systèmes de protection des surfaces selon leur domaine d'application. Il indique également, par système, l'épaisseur minimale de couche et les groupes de liants.

De plus, la directive contient, pour chacune des 12 classes, des références et des exigences détaillées sur:

- la texture;
- les caractéristiques des substances et du dispositif lui-même;
- les aptitudes de recouvrement des fissures;
- la couche de support en béton;
- l'exécution.

Pour d'autres informations, veuillez vous référer à [4.11]. Les données que fournit ce document permettront à l'ingénieur de projet de choisir le système de protection qui s'adapte le mieux aux travaux prévus, et de rédiger les appels d'offre en connaissance de cause. Les soumissionnaires devront apporter la preuve du test préliminaire. Par ailleurs, on peut se baser sur le document [4.34] pour déterminer le contrôle de qualité à effectuer au stade de l'exécution.

Le CEN envisage actuellement de simplifier la classification des systèmes de protection des surfaces.

Description sommaire	Valeurs indicatives pour les couches minimales spécifiques aux systèmes	Principaux groupes de liants
1	2	3
OS1 Imprégnation hydrophobe OS2 Scellement pour surfaces non carrossables OS3 Scellement pour surfaces carrossables OS4 Enduit pour surfaces non carrossables OS5 Enduit pour surface non carrossables, avec un recouvrement minimal des fissures OS6 Enduit chimiquement résistant pour surfaces subissant peu de contraintes mécaniques OS7 Enduit sous les couches d'étanchéité bitumineuses des ponts ou d'autres ouvrages OS8 Enduit chimiquement résistant pour surfaces carrossables subissant d'importantes contraintes OS9 Enduit pour surfaces non carrossables, avec un recouvrement important des fissures OS10 Enduit faisant office de couche d'étanchéité sous les couches bitumineuses ou autres couches de protection ou de revêtement, avec un recouvrement performant des fissures OS11 Enduit pour surfaces carrossables, avec un recouvrement important des fissures OS12 Enduit pour les surfaces carrossables subissant d'importantes contraintes mécaniques, avec béton ou mortier à base de résine à réaction	– 50 microns 50 microns 80 microns a) 300 microns b) 2000 microns 500 microns 1 mm 1 mm 1 mm 2 mm 3-5 mm 5 mm	Silan, Siloxan, résine de silicone AY EP, AY, PUR AY, PUR-AY Dispersion AY Dispersion de propionate-copolymère Dispersion de coulis de ciment EP, PUR EP EP PUR PUR EP-PUR EP

Tableau 4.9: Systèmes de protection des surfaces, selon [4.11]

OS: Système de protection des surfaces

AY: Ester acrylique

EP: Epoxy

PUR: Polyuréthane

4.4.8 Pontage des fissures

Le pontage des fissures fait aussi partie des mesures de protection propres au bâtiment. La problématique des fissures a fait l'objet de nombreuses publications ces dernières années. Nous renonçons à en rendre compte ici. Veuillez vous référer aux documents [3.2, 3.3, 4.2 et 4.5].

Avant de procéder à des injections dans les fissures, il faut déterminer les causes de leur apparition et évaluer leur influence sur la sécurité, la fiabilité et la longévité de l'ouvrage.

On procède à des injections pour parvenir à un ou plusieurs des objectifs suivants:

- Boucher:
Réduire ou empêcher l'infiltration de substances corrosives dans l'élément par le truchement des fissures.
- Etancher:
Supprimer les manques d'étanchéité dus aux fissures.
- Ponter en tenant compte de la dilatation:
Ponter entre elles les lèvres de la fissure par un jointoiement résistant à la dilatation.
- Ponter en tenant compte des efforts internes:
Ponter entre elles les lèvres de la fissure par un jointoiement résistant à la compression et à l'effort tranchant.

Pour la planification et l'exécution du pontage des fissures, veuillez vous référer à la littérature spécialisée, notamment à [4.7, 4.26, 4.35, 4.36]. Vous trouverez d'autres indications et des informations sur les matériaux dans les documents [4.11 et 4.34].

4.5 Dispositifs d'étanchéité

4.5.1 Généralités

Depuis que l'homme bâtit, il a essayé d'assurer la meilleure étanchéité possible à ses constructions. Dans l'Antiquité, on utilisait des isolants naturels comme l'asphalte, le goudron et la poix. De nos jours, il existe des quantités de produits et de procédés d'étanchéité.

Dans le sens où nous l'entendons dans le paragraphe 4.2 (classifications des systèmes de protection), les systèmes d'étanchéité sont des matériaux apposés sur la surface du béton et destinés à empêcher l'infiltration et la pénétration de substances étrangères, notamment de l'eau. Il existe différentes solutions pour les joints, les raccordements de bordures et les pénétrations.

Dans le chapitre 3, nous donnions des indications quant à la conception – si, pour tel ou tel type d'ouvrage, une construction monolithique en béton suffit ou si, au contraire, il faut prévoir un système de protection en sus –; ici, nous nous penchons exclusivement sur les systèmes d'étanchéité et les possibilités de les entretenir.

Dans les ouvrages de génie civil, on a utilisé, au cours des décennies, une foule de matériaux et de systèmes d'étanchéité différents dont on a parfois aujourd'hui oublié jusqu'à l'existence.

Si les paragraphes qui suivent se rapportent aux systèmes d'étanchéité des ouvrages en béton, on peut néanmoins en tirer des enseignements pour les autres modes de construction (p. ex. l'étanchéité des chaussées de roulement en bois sur les ponts).

Certains principes peuvent également être appliqués par analogie aux dalles des bâtiments. Mais ces analogies ne concernent que la fonction de l'étanchéité, alors que d'autres fonctions physiques, comme l'isothermie si importante pour le génie civil, ne revêt que peu d'importance à cet égard. Ainsi, pour l'étanchéité des toits plats, on se référera de préférence à la littérature ad hoc [4.7] à [4.40].

4.5.2 Les différents dispositifs d'étanchéité. Normes et directives

Il semble qu'il n'existe pas de classification valable. Les normes SIA et VSS utilisent néanmoins une classification qui se réfère aux matériaux utilisés. Ainsi, la recommandation SIA 272, édition 1980, contient des principes et des indications pour la planification, la mensuration, la construction et l'exécution des étanchéités des eaux souterraines avec des matériaux en forme de lés, ou des étanchéités avec du mortier de ciment résistant à l'eau [4.41]. Toutefois, ce n'est qu'une classification approximative en étanchéités flexibles et étanchéités rigides, comme le montre la figure 4.36.

Par matériaux en forme de lés, la recommandation entend:

- les lés d'étanchéité bitumineux;
- les lés d'étanchéité plastiques, appelés aujourd'hui lés d'étanchéité polymères-bitume;
- les lés d'étanchéité plastique.

La norme SIA 281, édition 1983, établit une classification à part pour les lés d'étanchéité bitumineux (voir tableau 4.10).

Le tableau 4.11 présente un classement des divers types d'étanchéité.

Vous trouverez d'autres indications sur les exigences et les tests dans les documents [4.42 à 4.45].

Pour l'étanchéité des dalles de roulement des ponts, on se référera non seulement à la norme SN 640 490, mais aussi à la directive de la VSS sur l'étanchéité et le revêtements des ponts, applicable pour les éléments des ponts dépendants de l'OFR [4.46], et aux instructions pour l'exécution des ponts ballastés des CFF [4.47]

Le document [4.46] précise expressément que les données qu'il fournit concernent tout particulièrement l'assainissement des étanchéités défectueuses des ponts et de leurs revêtements. Le tableau 4.12 donne une vue d'ensemble des types d'étanchéité.

En outre, les documents [4.46] et [4.47] contiennent des indications importantes sur les drainages, les joints, les bordures et les évidements.

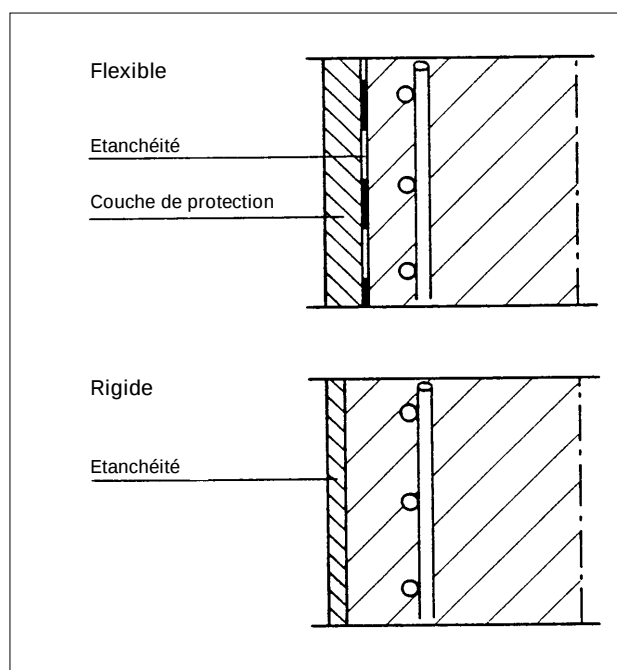


Figure 4.36: Présentation schématique des étanchéités flexible et rigide

Groupe A	lés de bitume polymère pour l'étanchéité de toits plats
A1	posés avec couche de protection ou de lestage, placés en pose libre ou collés ou soudés, en partie ou complètement, sur le support, les différentes couches collées ou soudées entre elles
A2	posés dans couche de protection ou de lestage, exposés aux intempéries, assurés contre l'arrachement par fixation mécanique, collage ou soudure, sur un support adéquat, éventuellement sur l'isolation thermique
Groupe B	lés de bitume polymère comme étanchéité souterraine contre l'eau sous pression ou sans pression, non soumis aux variations de température, collés ou soudés sur le support et servant d'étanchéité contre l'eau sous pression ou sans pression
Groupe C	lés de bitume polymère pour l'étanchéité d'ouvrages de génie civil, collés à pleine surface sur le support et recouverts d'un revêtement à chaud
Applications particulières:	
Toitures inversées	
– étanchéités collées ou soudées à pleine surface	groupe B
– étanchéités placées en pose libre	groupe A1
Relevés d'étanchéité exposés aux intempéries	groupe A2

Tableau 4.10: Classement des lés d'étanchéité de bitume polymère suivant leur domaine d'application

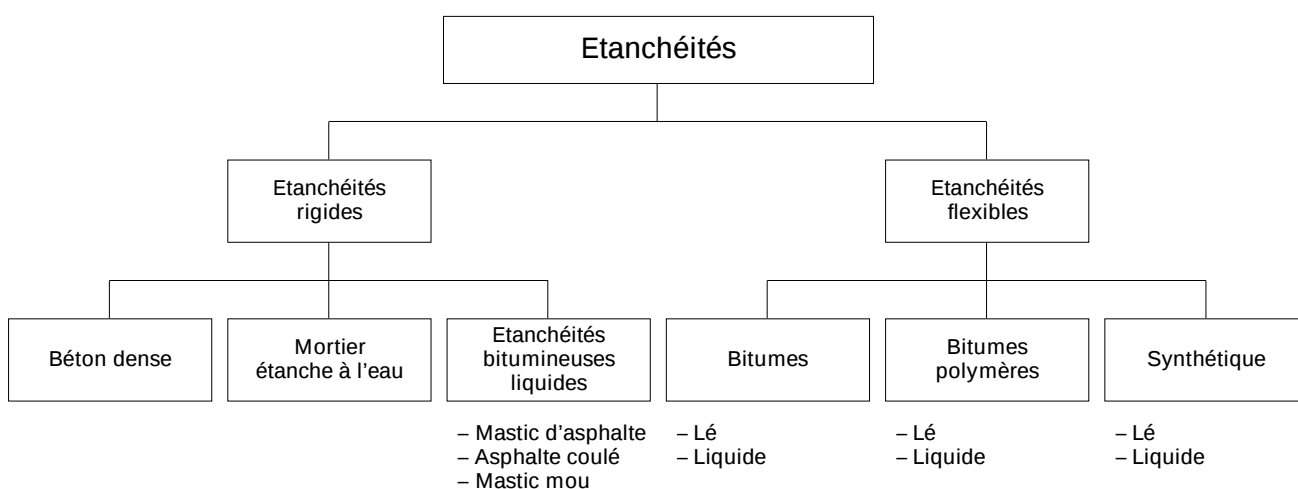


Figure 4.11: Classification des étanchéités

Etanchéité		Etanchéités flottantes				Etanchéités collées					
		Asphalte coulé		Mastic d'asphalte		Mastic mou	Lés en bitume		Lés en bitume polymère	Matière synthétique 1) 2)	
Revêtement		Béton bitumineux (AB; HMT)	Asphalte coulé	Béton bitumineux (AB; HMT)	Asphalte coulé	Béton bitumineux (AB; HMT)	Béton bitumineux (AB; HMT)	Asphalte coulé	Béton bitumineux (AB; HMT)	Asphalte coulé 3)	Asphalte coulé
Aspect											
En général	Double étanchéité	●	○	●	○	●	●	○	●	○	○
	Cheminement d'eau en sous-face	◐	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	○
	Cloquage	○	○	○	○	◐	◐	◐	◐	◐	◐
	Résistance au vieillissement	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐
	Epaisseur compacte	◐	○	◐	○	◐	◐	◐	◐	◐	○
Support et revêtement	Faibles exigences de qualité à la surface du béton	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	●
	Capacité de pontage des fissures	○	○	◐	◐	●	◐	◐	◐	◐	◐
	Résistance au cisaillement de la liaison béton-étanchéité					○	○	○	○	○	○
	Résistance au cisaillement de la liaison étanchéité-revêtement (couche de protection)	○	○	○	○	○	○	◐	◐	◐	◐
	Résistance du revêtement à l'usure	◐	○	◐	○	◐	◐	○	◐	○	○
Pose	Contraintes thermiques agissant sur le béton lors de la pose	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	○
	Risque de perforation par les granulats du revêtement	○	○	○	◐	◐	◐	○	◐	○	○
	Complexité des raccords	●	●	●	●	●	◐	◐	◐	◐	○
Coût	Coût de l'étanchéité et du revêtement	◐	◐	◐	◐	○	◐	◐	◐	◐	●

Légende: ○ très avantageux ◐ avantageux ◑ attention, peu avantageux ● pas du tout avantageux

1) A la base d'élastomères, état liquide, mise en place à froid

2) Appréciation sur la base d'un seul produit

3) Le lé de bitume polymère doit être compatible avec l'asphalte coulé

Tableau 4.12: Appréciation des principaux systèmes étanchéité-revêtement sur les ponts [4.46]

Remarque: l'appréciation donnée dans le tableau, selon laquelle la résistance au cisaillement des étanchéités bitumineuses est très avantageuse, est à relativiser (voir aussi la norme SIA 272). Ces étanchéités ne peuvent pas résister aux forces tangentielles sous charges de longues durées. Ce qui ne pose en général pas de problème dans le cas des ponts. par contre, dans le cas des galeries, par exemple, la pression des terres et les frottements peuvent entraîner de graves dommages, si aucune mesure constructive n'est prise.

Il n'existe actuellement aucune directive sur l'étanchéité des tunnels routiers. En revanche, les considérations de l'OFRT à cet égard sont résumées dans le document [4.48]. En le feuilletant, on remarque que l'OFRT préconise l'isolation flexible.

Il existe encore d'autres critères de différenciation:

- étanchéités libres, ou collées sur toute leur surface;
- dispositifs résistant ou non à la pression hydraulique;
- dispositifs d'étanchéité remplaçables ou non (éventuellement remplaçables mais à un coût excessif);
- genre d'application (voir tableau 4.23).

Les critères de différenciation revêtent une importance primordiale en matière d'entretien. Les dispositifs non remplaçables, ou remplaçables mais à un coût excessif, doivent être conçus de sorte à demeurer fonctionnels au minimum pendant le temps d'affectation prévu pour l'ouvrage.

Dans l'étanchéité rigide, on exploite la propriété d'étanchéité du béton. Ainsi, dans une cuvette étanche (ou cuvette blanche), un tunnel, une galerie ou un réservoir, la partie de l'ouvrage qui est en béton armé peut assurer non seulement la transition de charge, mais aussi servir d'étanchéité. Dans ce cas, cette partie de l'ouvrage, prise comme un tout, doit être conçue et réalisée de sorte être parfaitement étanche à l'eau. Contre les infiltrations et la perforation, il faut prévoir un béton dense qui ne puisse présenter que de très petites fissures. Vous trouverez d'autres indications à ce sujet dans [4.62 à 4.64] par exemple.

Dans le domaine des joints, des bordures et des évidements, il existe quantité de concepts et de dispositifs. Il nous est impossible de traiter ici ce vaste sujet; veuillez donc vous référer au document [4.49] qui est, en la matière, l'ouvrage de référence. Enfin, le tableau 4.14 vous donne un aperçu sur les bordures des lés plastiques.

	Asphalte coulé/Mastic	Lés d'étanchéité bitumineux	Lés d'étanchéité polymère/bitume	Lés d'étanchéité synthétiques	Lés d'étanchéité synthétiques liquide
Cuves étanches <i>Non adhérentes:</i> – Posées librement (soudées, avec bords renforcés) <i>Totalement adhérentes:</i> – Bitumage à chaud – Collage à chaud – Collage à froid (soudure) – Giclage – Application au rouleau, au pinceau		x x	x x	x x	x x
Tunnels – Posées librement (soudées, avec renforcement mécanique)				x	
Ponts <i>Non adhérentes:</i> – Flottantes (avec collage des bords) <i>Totalement adhérentes:</i> – Bitumage à chaud – Collage à chaud – Giclage – Application au rouleau, au pinceau	x	x x	x x		x x
Toits plats <i>Non adhérentes:</i> – Flottantes (avec collage des bords) – Posées librement (soudées, avec bords renforcés) <i>Totalement adhérentes:</i> – Bitumage à chaud – Collage à chaud – Collage à froid (soudure) – Giclage – Application au rouleau, au pinceau	x	x x	x x	x x	x x

Tableau 4.13: Modes d'application des étanchéités flexibles

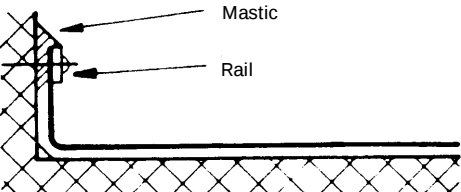
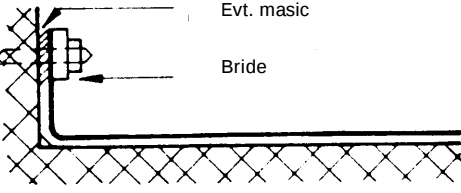
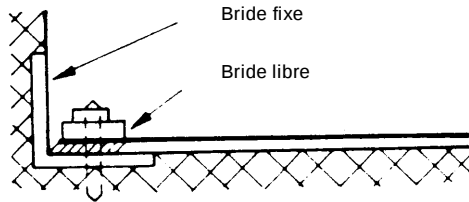
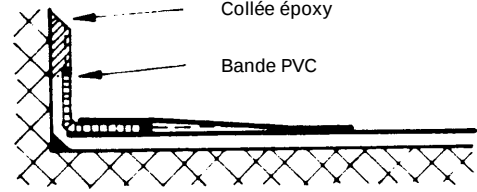
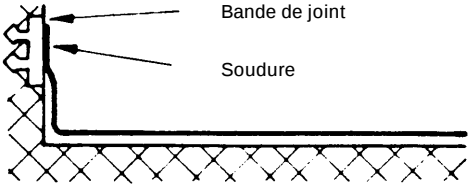
Type	Détail	Application		
		Cuves étanches	Tunnel	Galeries
A Rail mastic		○	●	●
B Rail de serrage		●	●	○
C Bride de serrage		●	○	○
D Bande de joint d'étanchéité PVC		●	●	●
E Bande de joint		○	●	○

Tableau 4.14: Bordures des étanchéités avec lés d'étanchéité synthétiques

○ Domaine d'application possible

● Domaine d'application traditionnel

4.5.3 Longévité

On ne dispose, malheureusement, que de peu de données avérées sur la longévité des systèmes d'étanchéité, et encore ne concernent-elles que certaines des techniques existantes.

Outre le vieillissement naturel des matériaux, voici les facteurs qui peuvent compromettre la durabilité des étanchéités:

- genre de système, valeur du système, genre de substructure et de couche de protection;
- constante qualitative des matériaux;
- qualité d'exécution;
- genre et intensité des sollicitations (usage et environnement);
- Entretien (possible dans de rares cas seulement).

Il s'agit donc de conditions complexes, comme le montre l'analyse des points faibles inventoriés dans l'étanchéités des toits plats (tableau 4.15).

En outre, on constate que les problèmes initiaux sont généralement liés aux joints, aux bordures et aux évidements.

Le document [4.50] expose ce qui suit au sujet de la longévité:

«On peut estimer à 30 ou 40 ans la durée de vie moyenne d'une étanchéité que l'on réaliserait, en l'état actuel des techniques, sur un toit plat recouvert de gravier et soumis à des conditions normales. Le fait que l'étanchéité soit bitumineuse ou plastique ne fait pas grande différence.»

Le document [4.57] se montre moins optimiste en affirmant qu'une longévité de 20 ans constitue déjà une belle exception. La plupart des isolations de toits plats doivent être remplacées ou renouvelées 7 à 17 ans après leur pose, ce qui est aussi décevant que coûteux.

En vue de mieux connaître le comportement des étanchéités des cuves étanches, des sous-sol des bâtiments et des ouvrages recouverts de terre, le groupe de travail «Technologie» de PI-BAT a contacté un certain nombre d'entreprises qui possèdent un important parc immobilier. Voici, en substance, les résultats de l'enquête:

- la perméabilité, due en particulier à une exécution peu professionnelle de l'étanchéité, apparaît rapidement. Réparation par des injections, et

dans certains cas par le frittage naturel des fissures; pose de joints appropriés;

- on ne sait rien de dégâts qui seraient apparus à long terme dans des étanchéités correctement conçues et posées. En revanche, les joints mobiles deviennent souvent perméables tôt ou tard, mais on ne possède pas de statistiques à ce sujet. On ne peut toutefois pas exclure une certaine analogie entre les résultats de cette enquête et ceux de l'enquête qui a porté sur les joints des galeries routières dans lesquelles on a constaté une augmentation des défauts des joints qui avaient de 10 à 15 ans d'âge (cf. fig. 3.16).

Dans la construction de ponts, l'étanchéité est remplaçable. Avec la densité toujours croissante de la circulation, ce remplacement coûte aussi cher à la société qu'il est techniquement compliqué. En Suisse, selon le document [4.53], l'étanchéité des ponts aurait une durée de vie moyenne de 25 ans. De nouvelles données laissent à penser qu'il s'agirait plutôt de 20 ans, contre 15 ans en Allemagne. Les problèmes proviennent généralement des bordures qui sont les premières à souffrir. Là où l'étanchéité est totalement ou partiellement collée à la dalle de roulement, les effets nuisibles restent limités, ce qui n'est bien sûr pas le cas avec des étanchéités flottantes ou libres.

Points potentiellement faibles	Où	Prévention et remède
Sollicitation excessive de l'étanchéité sur les joints des plaques de mousse dure	B	– Couche de séparation – Intervention sur l'isolation (choix des substances; collage de toute la surface, etc.)
Lésions mécaniques de l'étanchéité durant la phase d'utilisation ou d'exploitation	S + B + PB	– Choix d'une étanchéité à haute sécurité antiperforation – Couches de protection – Revêtements sur les couches de glissements, avec suffisamment de joints de bords – Contrôles – Attention aux installations ultérieures!
Surveillance de l'état des tôles – Corrosion – Joints de soudure – Mouvements thermiques – Joints mastic	B	– Bords en lés d'étanchéité polymères-bitume au lieu de tôles d'angle – Choix des matériaux, protection anticorrosion – Cartons d'appui – Technique de jointoyage (corrosion tranchante) – Contrôles – Nombre correct, placement adéquat et bonne conformation des dispositifs de dilatation – Choix des matériaux – Contrôles et renouvellement périodiques
Perforation par des racines	B	– Étanchéités résistant à la perforation végétale (polymère-bitume ou plastique) – Couche de protection sans sable – Déclivité régulière pour éviter la rétention d'eau – Entretien
Déformation de l'étanchéité (contraction)	S	– Choix d'une étanchéité qui corresponde aux normes «Déformation à la chaleur» et qui ne permette pas de retraits de séchage – Compatibilité avec les matériaux avoisinants – Pose sans précontrainte – Effectuer le bordage mécaniquement
Canalisations des toitures	B + PB + S	– Déclivité régulière – Au min. deux évacuations, c.à.d. évacuation et trop-plein – Diamètre des conduits d'évacuation min. 80 mm – Entrées des égouts anti-refoulement – Pas de points d'attaches de canalisations fixes – Couches d'usure indissolubles – Entretien (p. ex. évacuer les feuilles)

B = essentiellement dans les lés d'étanchéité bitumineux
 PB = essentiellement dans les lés d'étanchéité polymère-bitume
 PI = essentiellement dans les lés d'étanchéité plastiques

Tableau 4.15: Analyse des points potentiellement faibles des systèmes d'étanchéité de toits plats, selon [4.50].

La problématique de la perforation végétale apparaît avec les étanchéités polymère-bitume et les lés d'étanchéité plastiques. Ces matériaux, ne peuvent servir de couche d'étanchéité que s'ils sont résistants à la croissance des végétaux, selon les normes SIA 280 et 281.

Pour le contrôle des étanchéités, la norme SIA 281, actuellement en révision, prévoit d'adopter le procédé FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung, Landschaftsbau e.V., Bonn), voir le projet 5276-13 de la norme SIA 281.

En Allemagne, on a effectué une vaste enquête sur les étanchéités des chaussées situées sur les ponts en béton armé [4.42]. On a étudié 99 ponts pour connaître l'endurance de toutes les sortes d'étanchéités qui y sont utilisées. Le détail figure dans le tableau 4.16. Ces ouvrages étaient, pour la plupart, des ponts autoroutiers de 6 à 10 ans d'âge dont la première exécution du revêtement était exempte de défauts. Les dispositifs d'étanchéité consistaient en lés d'étanchéité bitumineux (une ou deux couches), en micro-béton bitumineux, et étanchéités de plastique liquide à base de polyuréthane, en diverses variantes d'asphalte naturel, et enfin en bandes métalliques striées posées sur des lés bitumineux de voile de verre perforé.

Si nous prenons cet exemple allemand, c'est que les données équivalentes manquent encore dans notre pays; voici donc quelques remarques préliminaires. A notre connaissance, on n'a encore jamais posé chez nous ce que les Allemands appellent des «lés d'étanchéité bitumineux en une ou deux couches», des «bandes métalliques striées posées sur des lés bitumineux de voile de verre perforé» et du «micro-béton bitumineux». Nous ne donnerons donc pas l'évaluation finale de ces sortes d'étanchéité.

En Suisse, jusqu'à l'apparition des lés d'étanchéité en polymère-bitume, l'étanchéité des ponts se faisait généralement en mastic mou, en enduits d'époxy goudronné ou en asphalte coulé flottant. Notre plastic mou correspond approximativement à ce que les Allemands appellent «mastic à taux de liant élevé», et notre asphalte coulé au «mastic à taux de liant normal».

Après l'apparition des lés d'étanchéité en polymère-bitume, nos ponts et autres ouvrages ont reçu, pour la plupart, cette sorte d'étanchéité. On trouve aussi, mais plus rarement, des étanchéités réalisées en plastique liquide, en lés d'étanchéité glacés sur métal ou en asphalte coulé flottant. Les étanchéités en polymères-bitume et les lés d'étanchéité glacés sur métal sont à peu près comparables à ce que les Allemands appellent «joint coulé bitumineux en une couche».

Le document [4.54] résume ainsi les résultats de cette enquête:

«Les lés d'étanchéité bitumineux (une ou deux couches) qui ont été collés à plat sur le béton, recensés sur 42 ponts, s'avèrent fiables. Là où, sur

Type d'étanchéité	Nombre de ponts étudiés
Lés soudés bitumineux, une couche – exécution normale et classique – sur des surfaces de béton traitées avec de la résine réactive	21 6
Lés d'étanchéité bitumineux, deux couches – exécution normale et classique – avec de la résine réactive appliquée sur des surfaces de béton traitées	13 2
Mastic avec une proportion normale de liants – sur couche de séparation (voile de verre), avec renforcement des bords – sur couche de séparation (voile de verre), sans renforcement des bords – sur tissus en fibre de verre et couche de fond bitumineuse, avec renforcement des bords – sur tissus en fibre de verre, sans couche de fond bitumineuse, avec renforcement des bords – sur des surfaces de béton traitées avec de la résine réactive, sans couche de séparation (voile de verre) – sur des surfaces de béton traitées avec de la résine réactive, avec couche de séparation (voile de verre)	4 7 0 6 1 9
Mastic avec une proportion élevée de liants – sur tissus en fibre de verre et couche de fond bitumineuse, avec renforcement des bords – sur tissus en fibre de verre et couche de fond bitumineuse, sans renforcement des bords	0 4
Bandes en métal striées sur des lés bitumineux de voile de verre perforé – acier inox – cuivre	5 8
Micro-béton bitumineux – exécution normale et classique – sur des surfaces de béton traitées avec de la résine réactive	7 0
Plastiques liquides – polyuréthane – autres	4 2
Total	99

Tableau 4.16: Dispositifs d'étanchéité de ponts étudiés, résumé du document 4.54.

le béton revêtu d'un pré-enduit bitumineux, on trouve des lés (couche simple) soudés sur aluminium et combinés avec une couche protectrice d'asphalte coulé, la plupart des échantillons prélevés présentent des bulles dans la masse collée. Il en résulte, en sous-couche, une diminution d'adhérence et un affaiblissement de la capacité d'étanchéité, phénomènes que l'on peut parfaitement compenser en effectuant, sur le béton, l'application d'une couche de fond, un scellement ou le rebouchage avec une résine à base époxy.

Les étanchéités en plastique liquide (polyuréthane) que nous avons analysées assurent une protection efficace contre l'humidité et les substances agressives; c'est un procédé qui a de l'avenir, à condition de limiter sévèrement la quantité de composants extractibles du polyuréthane, de sorte à éviter, à long terme, les effets contracteurs non négligeables de l'asphalte coulé. De plus, le vide résiduel de la couche d'étanchéité ne devrait pas dépasser 10% à 15%.

Notre étude a également confirmé la célèbre fragilité des dispositifs d'étanchéité qui comportent une couche de séparation destinée à laisser passer la vapeur sous pression. Les pires résultats ont été enregistrés sur les dispositifs en asphalte naturel posés sur une couche de séparation (couche consistant généralement en voile de verre). Sur 6 des 7 revêtements analysés, on a constaté des phénomènes de perméabilité, d'infiltrations, ainsi qu'une haute teneur en chlorures du béton. L'une des causes des infiltrations d'asphalte naturel sur la couche de séparation, c'est la rupture de la couche supérieure en asphalte. C'est la raison pour laquelle on a tenté d'intervenir sur la couche de séparation (en voile de verre ou en fibre de verre) en renforçant le scellement des bordures à l'aide d'une bande en cuivre striée; on voulait ainsi essayer de déterminer les résultats de cette modification. L'étanchéité s'est révélée meilleure que dans les dispositifs sans renforcement, mais le taux de chlorures était encore élevé. Ce renforcement réduit la fragilité des joints de bordures; en revanche, on n'a pu remédier à la formation de fissures dans le revêtement, d'où la permanence des infiltrations.

L'infiltration de l'asphalte naturel sur le voile de verre est apparue même dans des ouvrages très soignés où la surface bétonnée avait été scellée d'une couche de résine époxy. La présence fréquente de nombreux chlorures donnait à penser que si ce scellement contribue à protéger le béton, il ne compense pas pour autant les manquements fonda-

mentaux de la couche d'étanchéité. Il faut dorénavant renoncer à ce genre d'exécution et à toutes ses variantes.

On n'a pas constaté d'influence significative de la couche d'étanchéité sur le comportement du revêtement. L'asphalte coulé constitue presque toujours des joints étanches. Le béton asphaltique, quand on l'utilise comme couche de protection, présente souvent des défauts: porosité, dissolution des liants. La combinaison couche de protection en béton asphaltique/couche de surface en asphalte coulé a fréquemment été à l'origine de la formation de bulles à la surface du revêtement.

Les résultats de cette enquête nous permettent de recommander d'opter, selon les cas, parmi les systèmes d'étanchéité usuels, pour les lés soudés recouverts d'une couche protectrice d'asphalte coulé ou pour deux doubles lés d'étanchéité recouverts d'une couche protectrice de béton asphaltique. Dans les deux cas, selon les conditions d'utilisation et l'état de la surface de la chaussée en béton, on procédera à l'application d'une couche de fond, à un scellement ou à un spatulage à la résine époxy. Il est superflu de mesurer la résistance électrique du fond. Il existe encore une autre manière de procéder à l'étanchéité: on recouvre la couche étanche (en plastique liquide) d'une couche protectrice d'asphalte coulé. Cette méthode devrait avoir de beaux jours devant elle.

Les étanchéités en mastic à haute teneur en liants posées du des tissus en fibre de verre et collées sur le fond, doivent constituer une exception; cette méthode ne convient que s'il est possible de combiner la couche d'étanchéité avec un matériau comparable. Dans tous les cas, c'est de l'asphalte coulé qui devrait tenir lieu de couche de protection.

Il faut se méfier de tous les systèmes d'étanchéité qui comportent une couche de protection. Les étanchéités en mastic posées directement sur la couche de séparation n'offrent qu'une efficacité protectrice réduite et devraient être remplacées fréquemment pour préserver le bon état des ponts.

En Suisse, nous l'avons déjà dit, nous ne disposons pas de beaucoup de données dans le domaine de l'étanchéité des ponts. Néanmoins, les données recueillies par quelques personnes nous permettent d'établir quelques principes:

- Au fil des ans, on a utilisé indifféremment du «mastic mou», du «goudron-époxy» et de «l'asphalte coulé flottant». Ces matériaux se comportent irrégulièrement; en d'autres termes,

certaines ouvrages s'avéraient étanches, d'autres non.

- Les lés bitumineux glacés sur métal n'ont été utilisés que pendant quelques années, jusqu'à l'apparition des lés d'étanchéité en polymères-bitume (EPB) recouverts d'asphalte coulé. Les expériences donnent des résultats analogues à celles que mentionne le document [4.42].

Relevons que si la tendance allemande va vers l'utilisation d'EPB et que l'on recommande un rebouchage à l'époxy sur la couche bétonnée, quelle que soit la nature de la couche d'étanchéité.

- Les lés EPB ont donné, dans l'ensemble, de bons résultats, quoique les raccords des ponts ou des chaussées aient toujours constitué des points faibles. C'est également vrai, par analogie, pour les étanchéités en «asphalte coulé flottant». C'est la raison pour laquelle des privés, tout comme l'Etat, se sont mis à chercher d'autres modes de fixation (mécanique ou par collage) de l'étanchéité dans la zone des bordures. Bien que l'on applique certaines de ces méthodes depuis plusieurs années déjà, on manque encore de recul pour les évaluer.
- Voilà plus de 10 ans que l'on utilise, en Suisse, les plastiques liquides pour l'étanchéité des ponts. Il s'agit avant tout, à l'heure actuelle, de polyuréthanes (PUR). La valeur isolante et protectrice de ces matériaux est satisfaisante. Les plastiques liquides présentent néanmoins le défaut de laisser passer la vapeur d'eau, ce qui peut provoquer, à la longue, l'apparition de bulles dans l'asphalte coulé qui, lui, est étanche à la vapeur.

Depuis quelques années, notre pays a lancé un programme d'étude des raccordements de bordures qui concerne les étanchéités de ponts en EPB [4.55]. On procède à l'examen d'un certain nombre de raccords de bordures ou de chaussées, ou à proximité de puits ou de bouches d'égouts. Cette étude devrait fournir des données concrètes qui permettront de définir le bien-fondé de certains travaux de finition déjà réalisés ou encore à envisager.

Les étanchéités des tunnels sont, en principe, non remplaçables. Néanmoins, il vaut la peine, lors du projet et de l'exécution, de prévoir un investissement suffisant. Le document [4.56] constate, à cet égard, que même une étanchéité coûteuse n'influe que peu sur le coût global: sa part ne s'élève qu'à

2%–4%. En revanche, le coût de l'assainissement d'un ouvrage existant peut atteindre jusqu'à 50% de sa valeur!

Le tableau 4.17 présente, en prenant comme exemple l'étanchéité de tunnels effectuée avec des lés d'étanchéité plastiques, les relations entre les carences, leur réparation et leur qualité.

Le document [4.48] traite de la problématique de la dégradation des tunnels du réseau national. On regrettera que les défaillances des étanchéités des tunnels suisses n'aient jamais été répertoriées. En effet, une telle étude contribuerait à remédier à ce mal endémique.

Dans les tunnels à ciel ouvert équipés d'étanchéité intégrales et flexibles, le tassement des matériaux de remplissage a parfois causé la déchirure des films et des lés sur les parois latérales. On peut y remédier, comme en Allemagne, par la pose de briques.

Défaut possible	Réparation	Compétence
Fabrication Vice de fabrication (ondulations, délittages, délaminages) Perforation due aux rugosités du substratum Effort de traction dû à de fortes irrégularités du substratum Erreur de soudure	Contrôle de fabrication Contrôle en laboratoire Elimination de la couche de support Pose des LEP dans les dépressions, évt. égalisation des cavités à l'aide de béton projeté Introduire l'expertise des soudures dans le protocole du chantier	Fabricant Organe de contrôle Entreprise d'étanchéité Entreprise d'étanchéité Entrepreneur Entreprise d'étanchéité Direction des travaux
Données variables selon les chantiers Endommagement lors du décoffrage de l'anneau intérieur Endommagement lors de la pose des armatures Endommagement lors de la mise en place du béton Rupture des lés d'étanchéité plastiques (LEP) due à la formation de poches d'eau Endommagement postérieur au bétonnage en cas de formation de cavités importantes (rupture des LEP par des poches d'eau) Perforation par des forces compressives et des efforts tranchants dus à la pression de la roche, de l'eau ou du béton	Bandes protectrices en LEP Pose de couches de protection et d'alarme Pas de sous-profil, surtout dans les zones des appuis, des revêtements intermédiaires et des bouches d'aération Découper et ressouder immédiatement avant le rebétonnage Injecter totalement les cavités immédiatement après le bétonnage de l'anneau intérieur Couche de compensation et lé d'étanchéité de dimensions suffisantes	Entrepreneur Entreprise d'étanchéité Entrepreneur Entreprise d'étanchéité Entrepreneur Direction des travaux Planificateur
Sollicitations à long terme Comportement des LEP à long terme Frittage et bouchage des drainages superficiels situés derrière les LEP Frittage et bouchage des conduites de drainage	Contrôles en laboratoire correspondant aux normes SIA et DIN Couche de compensation de dimension suffisante garantissant un effet de drainage maximal à long terme Poser une conduite de drainage de dimension suffisante avec bouche d'entrée, regards de contrôle et de nettoyage à distance rapprochée Rincer régulièrement les conduites de drainage	Organe de contrôle Planificateur Planificateur Service d'entretien

Tableau 4.17: Défauts, réparations et compétences; l'exemple de l'étanchéité des tunnels réalisée avec des lés d'étanchéité plastiques (LEP), selon [4.56]

4.5.4 Surveillance et entretien

On constate que les autres domaines du bâtiment n'ont encore que peu fait place aux considérations et aux stratégies qui sont appliquées couramment depuis plusieurs années à la surveillance et à l'entretien des étanchéités. Voilà qui va changer dans les années à venir, notamment dans le secteur de la construction routière.

Voici maintenant un cas de garantie insatisfaisante.

La question de la garantie, selon [4.56]:
«Bien souvent, dans le dialogue de vente, on aborde la notion de garantie. Il faut que le maître de l'ouvrage soit bien conscient qu'il est rarissime que l'étanchéité des ouvrages de génie civil puisse bénéficier d'une garantie au sens où l'entendent les normes SIA. En effet, le travail réalisé par l'entreprise d'étanchéité n'est, dans la majorité des cas, plus accessible; un éventuel vice ne peut donc être repéré que s'il engendre des traces d'infiltration. Un tel vice est pratiquement irréparable; la garantie, censée couvrir la remise en état, ne pourrait guère être respectée puisqu'une réparation entraînerait d'importants travaux de démolition, voire la démolition totale de l'ouvrage. Il faut donc se montrer très circonspect quant à la garantie si l'on veut éviter d'innombrables complications d'ordre technique et juridique».

On peut néanmoins se demander si l'on ne verra pas apparaître des dispositifs qui, d'une part, bénéficieront d'une garantie de qualité totale, en ce sens qu'ils seront exempts de tout vice, mais qui encore, d'autre part, seront prévus pour subir des contrôles d'efficacité réguliers pendant leur pose, à leur mise en service et pendant toute la durée d'affectation; il faudrait en outre qu'ils soient englobés dans une stratégie qui envisage la possibilité de perméabilités ultérieures et de leur réparation. Voilà qui serait fort utile, notamment dans les cas où l'eau se met à commettre des ravages.

On a déjà fait un pas dans cette direction avec l'apparition d'un procédé de contrôle et d'injection qui fonctionne sur le principe d'un contrôle au vacuum des LEP en deux couches et qui compresse leurs cavités à l'aide d'une masse anti-fuite [4.56].

Les documents [4.58 et 4.59] contiennent encore d'autres précisions sur la surveillance et l'entretien des étanchéités. Outre le contrôle visuel, on

utilise surtout la thermographie aux infrarouges et les procédés géoradar.

Le document [4.60] présente une nouvelle méthode destinée à repérer les pertes dans l'étanchéité des ponts. Pour localiser les endroits délicats, on utilise le gaz traçant SF₆ qui présente la propriété d'être détectable même en traces infimes. Cette méthode a été développée sur des dalles-tests et sur un pont (fig. 4.37 et 4.38); on injecte le gaz traçant dans les fissures situées dans la partie inférieure du pont et desquelles suinte l'eau; il s'insinue dans le réseau de pertes qui émaillent l'étanchéité et, de là, par diffusion, remonte jusqu'au niveau de la chaussée.



Figure 4.37: Localisation des fuites à l'aide de gaz traçant [4.60]

On mesure alors la concentration de gaz en surface; cette concentration est maximale aux endroits délicats si le matériau environnant est bien homogène.

La localisation des fuites à l'aide du gaz traçant SF₆ permet de situer précisément les zones faibles d'un pont et de réparer les dégâts par injection de résine synthétique sans que l'on soit obligé pour autant de démolir la dalle. On évite ainsi d'entreprendre des travaux d'assainissement onéreux et d'entraver inutilement la circulation.

Il existe d'autres moyens de contrôler l'efficacité de l'étanchéité et des raccords étanches: on ménage des regards de contrôle, soit en insérant un tuyau

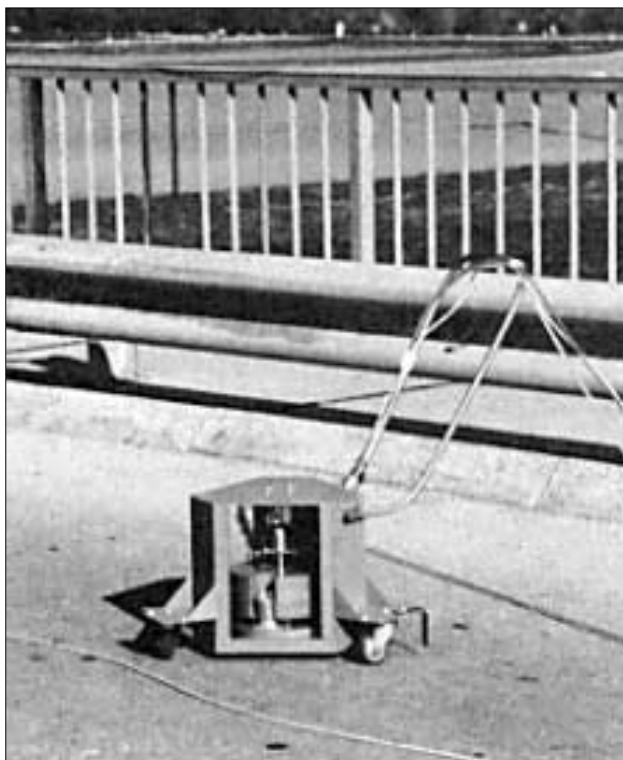


Figure 4.38: Préleveur d'échantillons mobile [4.60]

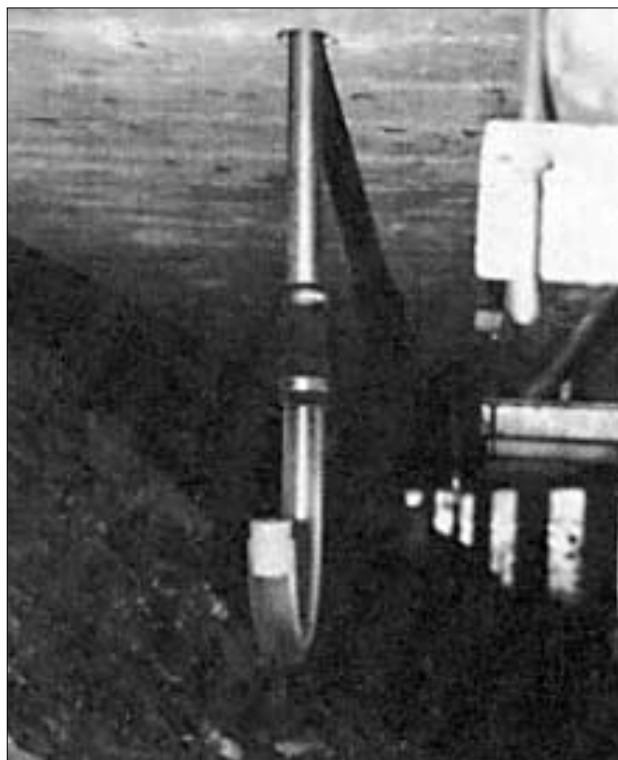


Figure 4.39: Tuyaux de plexiglas posés en vue du contrôle visuel des suintements d'eau, pour détecter l'étanchéité défectueuse des ponts [4.55]

plastique dans le coffrage, soit en procédant à un carottage; cette ouverture servira d'évacuation à l'eau qui s'était infiltrée. Le contrôle visuel s'effectue d'autant plus aisément si l'on fixe un coude en plexiglas à l'extrémité du tuyau (fig. 4.39). Les solutions de continuité du coffrage peuvent aussi servir au contrôle de l'étanchéité. En effet, des suintements aux solutions de continuité du coffrage trahissent un défaut de l'étanchéité ou des raccords; s'il s'agit d'une étanchéité collée, ces suintements indiquent que les joints bitumineux ou en polymère-bitume sont abîmés.

Dans le domaine de l'entretien spécialisé, les possibilités de surveillance et d'entretien sont limitées dans les cas où les systèmes d'étanchéité ne sont plus accessibles.

S'il existe un drainage, il faut en nettoyer régulièrement les canalisations et les regards. Cela vaut aussi pour ceux des systèmes d'étanchéité qui sont parfaitement accessibles.

Si des systèmes d'étanchéité non accessibles (c'est-à-dire non remplaçables) viennent à se dégrader, il ne vaut généralement pas la peine de les réparer, même à grands frais, puisque le problème réside généralement dans la présence d'une pression hydraulique.

Si l'on ne parvient pas à empêcher l'eau d'accéder à l'ouvrage, il ne reste qu'à poser un système d'étanchéité sur sa face interne.

Pour combler les fissures de largeur régulière dans le béton ou d'autres zones poreuses, on procède par injection ou rebouchage.

Les joints de reprise perméables, avec ou sans bande, se combler par injection comme les fissures (cf. paragraphe 4.4.8).

On ne peut généralement pas combler les fissures dont la largeur variable est due à des charges externes ou à des variations de température. La figure 4.40 présente trois solutions possibles. Mais ce genre de remise en état coûte très cher.

L'étanchéité ultérieure des joints de tassement peut s'avérer nécessaire dans les situations suivantes [4.49]:

1. Béton peu étanche et poreux dans la zone des bandes de joints.
2. Bandes de joints insuffisamment bétonnées par suite d'une mauvaise fixation dans le coffrage (ailes des bandes retroussées) ou formation de nervures, p. ex à cause de bandes détachées ou autres.
3. Bandes de joints endommagées, p. ex par les travaux ou par des sollicitation excessive (tassement important, pression hydraulique).
4. Joints faits d'un matériau inapproprié.

Dans le premier cas, on tentera de procéder à l'étanchéification, par injection, du béton perméable dans les zones proches des bandes de joints. On peut procéder conformément à la figure 4.41. Pour ce faire, il faut déposer la surface extérieure du corps de joint et boucher le joint, sur toute sa longueur, avec une conduite en plastique au travers de laquelle on passera ensuite des tuyaux d'injection et d'expansion; on scelle le tout avec du ciment prompt ou du mortier à base de résine époxy, de sorte à obtenir la pression d'injection voulue. On injecte enfin la résine (polyuréthane ou acrylique). Ce procédé ne pose pratiquement aucun problème pour les joints de tassement annulaires (fig. 4.41a). Sinon, on introduit la conduite le plus près possible de la bande de joint, et l'on procède à une étanchéité provisoire de sorte à former une

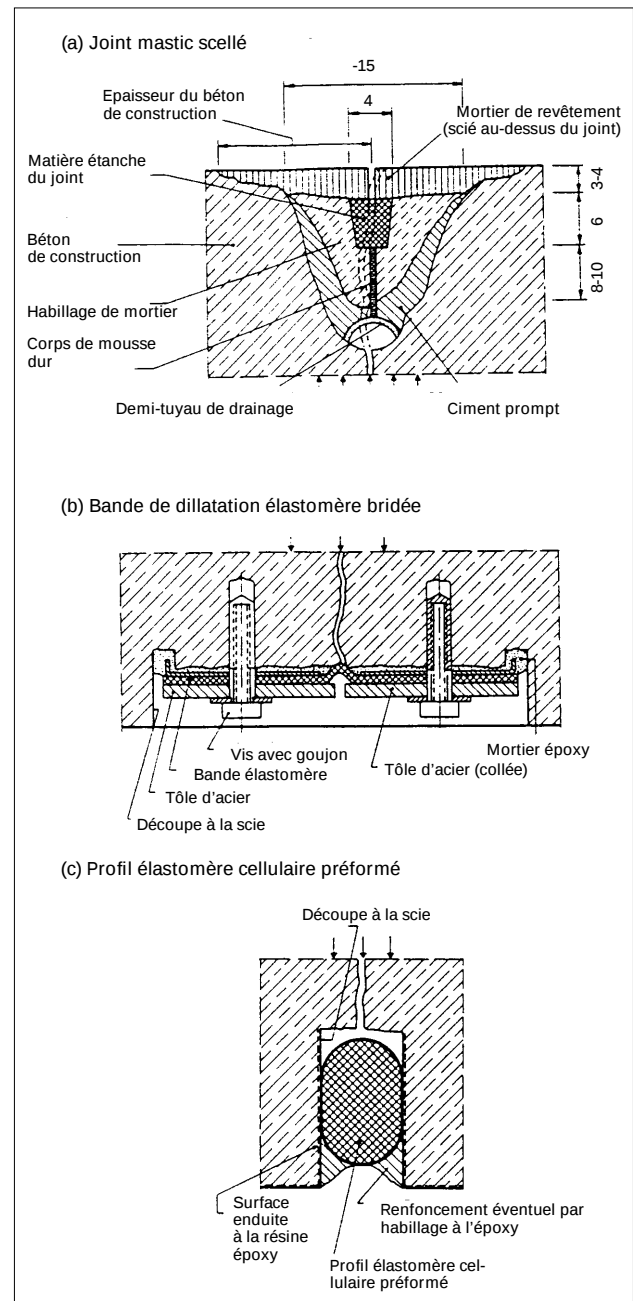


Figure 4.40: Trois possibilités pour assurer l'étanchéité d'une fissure de largeur variable apparue après coup, selon [4.49]

chambre qui permette de créer la pression d'injection (fig. 4.41b). Pour ce genre d'étanchéité, il est important d'utiliser une résine déformable, afin que le joint ait une mobilité suffisante.

Dans le deuxième cas, le procédé décrit ci-dessus peut assurer une étanchéité satisfaisante des joints. Si la bande de joint est retroussée, et donc qu'elle n'est plus accrochée dans le béton, ou encore qu'elle est abîmée (cas 3), il faut soit la réparer, soit procéder à une deuxième étanchéité depuis l'intérieur du joint.

La réparation d'une bande de joint n'est possible qu'en réduisant la pression hydraulique pour dégager la bande. On peut réparer la bande par soudage (thermoplastique) ou par collage (élastomère). On rapportera le béton environnant avec un mortier à base de ciment ou de résine époxy.

S'il est impossible de dégager la zone proche de la bande de joint, ou que la bande de joint est détruite par suite de sollicitations excessives, il est alors plus simple de doubler l'installation comme démontré en [4.42], en tenant compte de la sollicitation hydraulique ou du tassement.

Lors de la réparation des bandes de joint, ou de la pose d'une deuxième étanchéité, il faut dériver provisoirement les eaux d'écoulement ce qui peut demander, selon les circonstances, des interventions aux alentours de l'ouvrage.

Dans des cas isolés, on peut faire usage de coulis d'étanchéité appliqués à plat; ils peuvent être à base de ciment ou, comme on le fait de plus en plus, additionnés de produits qui se cristallisent dans les pores. Ces procédés d'étanchéité possèdent des particularités et des limites d'application dont il faut tenir compte.

Ces exemples d'entretien spécialisé mettent l'accent sur quelques-uns des problèmes que pose l'étanchéité ultérieure. C'est pourquoi il est bon de penser, déjà au moment du projet de l'ouvrage, aux nécessités qu'entraîneront des assainissements ultérieurs, de sorte à définir un concept global.

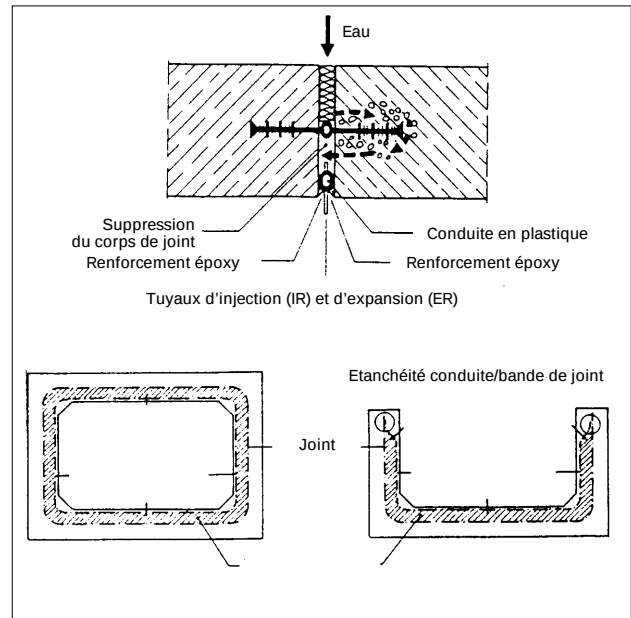


Figure 4.41: Etanchéité ultérieure, par injection, d'un joint de tassement avec bande de joint intérieure, selon [4.49]

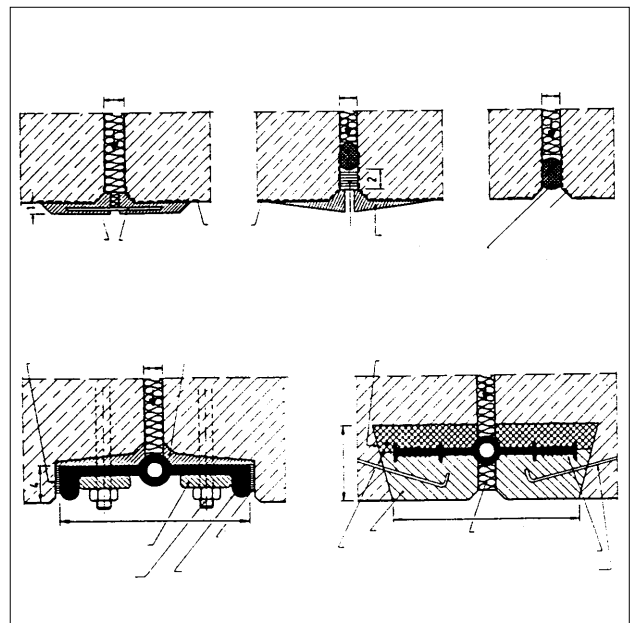


Figure 4.42: Possibilités d'étanchéité ultérieure de joints de tassement quand la bande de joint prise dans le béton est endommagée, selon [4.49]

- (1) Bande de joint collée
- (2) Etanchéité avec masse élastique renforcée
- (3) Profil élastomère cellulaire mortaisé
- (4) Bande de joint élastomère pincée
- (5) Bande de joint posée dans du béton plombé

Outre les procédés déjà cités visant à l'étanchéité ultérieure des lés d'étanchéité, nous allons envisager les différentes possibilités qu'offre l'injection dans ces points faibles que sont les joints de reprise et de tassement. Ces interventions ne concernent, en principe, que les nouvelles constructions.

1. Canaux d'injection en profils de caoutchouc mousse [4.49]

On pose, dans les points faibles de la construction en béton, des profils de caoutchouc-mousse de section rectangulaire (p. ex 20/10 mm) en matériau à pores fermés et des tuyaux d'injection, à des intervalles de 3 à 5 m. Après la prise du béton, on injecte le matériau dans les tuyaux. La pression provoque une contraction du profil en caoutchouc mousse. Il en résulte la formation d'un canal par lequel le matériau injecté peut parvenir jusqu'aux fissures, aux nids de gravier et aux diverses cavités. On peut appliquer ce système à l'étanchéité d'une bande de joint, comme le montre la figure 4.43.

2. Conduites d'injection [4.49]

Les conduites d'injection (fig. 4.44a) consistent en:

- une spirale qui supporte la pression hydrostatique du béton frais et empêche donc l'écrasement de la conduite;
- une enveloppe tissulaire en fils synthétiques fuselés qui portent la membrane qui l'entoure;
- une membrane en voile de verre, imprégnée de résine synthétique qui empêche le béton frais de pénétrer dans la conduite et se déchire lors de l'injection;
- une enveloppe externe en fils synthétiques destinée à protéger la membrane interne. Cette enveloppe externe est structurée de manière telle que ses micro-cavités permettent au matériau d'injection d'accéder à la masse bétonnée.

On trouve maintenant d'innombrables systèmes de conduites d'injection. Lors du choix, on veillera à ce que le matériau d'injection puisse sortir par toute la surface des conduites, et non seulement à certains endroits. De plus, les conduites doivent être parfaitement imperméables au béton et bien résister à sa pression.

Les conduites d'injection se font en longueurs de 1 à 7 m selon les besoins du chantier. A leurs deux extrémités, on fixe un raccord pour haute pression

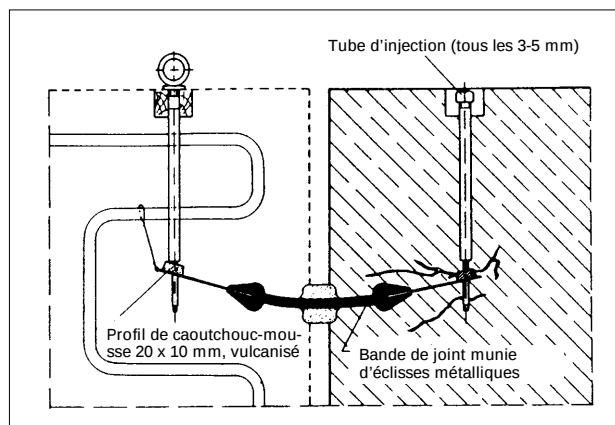


Figure 4.43: Exemple de bande de joint munie d'éclisses métalliques et de canaux d'injection en caoutchouc-mousse, selon [4.49]

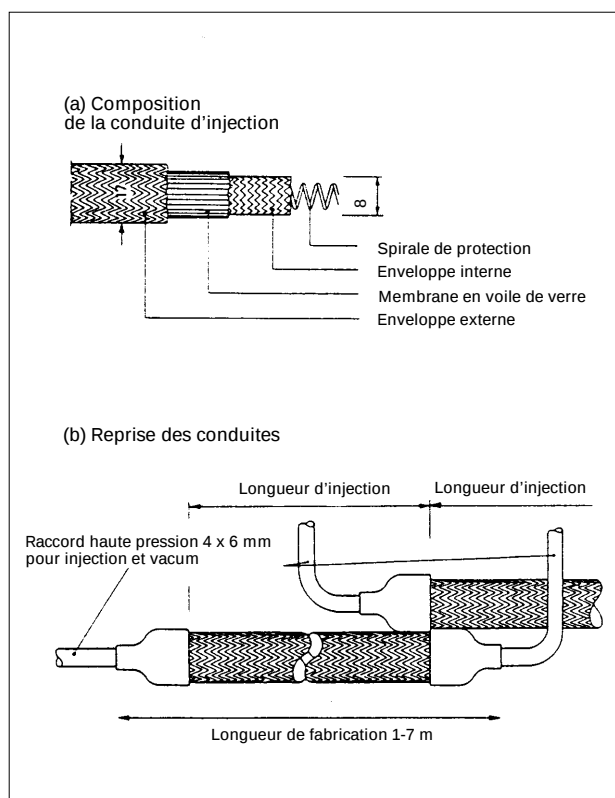


Figure 4.44: Conduite d'injection, selon [4.49]

destiné tant au remplissage qu'au vacuum; ces raccords dépasseront du béton aux endroits adéquats. On procède par couplage direct (fig. 4.44b) ou par accolement des conduites (de 5 à 10 cm).

3. Tuyaux à manchon [4.49, 4.64]

Le tuyau à manchon illustré en [4.45] constitue un dispositif d'injection conçu spécialement pour les joints de parois continues en béton moulées dans le sol; cette technique peut aussi trouver bien d'autres applications. Il s'agit ici de tuyaux en plastique rigides à la flexion (diamètre extérieur 33 mm, diamètre intérieur 25 mm) munis de soupapes d'injection placées tous les 30 cm et qui permettent l'échappement du coulis. Au contraire des tuyaux à manchettes classiques utilisés pour les injections en sous-sol, ces tuyaux comportent des soupapes d'injection capables de parfaitement fonctionner dans un milieu bétonné, et cela grâce à la manchette extérieure en matériau élastique mou.

L'injection se fait par l'intermédiaire d'une conduite sous pression introduite dans le tuyau à manchette, qui permet de procéder à l'injection dans une soupape après l'autre. Le tuyau n'est donc qu'un conduit qui reste vierge de tout matériau d'injection. Cette méthode permet des injections locales en tout temps. Elle présente les avantages suivants:

- Il est possible de combler peu à peu les pertes et les défauts locaux par des injections répétées.
- La pression d'injection ne s'exerce que par une soupape à la fois sur la surface des joints et des fissures dont l'agrandissement est, de la sorte, quasiment inimaginable même sous haute pression.

4. Profil de bande de joint élastomère hydrophile [4.49]

Au Japon, on assure l'étanchéité des joints à l'aide de profils élastomères (fig. 4.46). Le matériau utilisé est un caoutchouc synthétique en chloroprène combiné avec une résine hydrophile. En cas d'infiltration, le profil s'imbibe jusqu'à atteindre 10 fois son volume initial, protégeant ainsi le joint par pression sur ses flancs. Des études ont permis de constater que cette sorte de bande ne garantit parfaitement l'étanchéité que si elle se trouve constamment imbibée. Le changement de volume est forcément limité par la forme du joint; le phénomène de capillarité, testé en laboratoire, permet une étanchéité qui va jusqu'à 10 bar.

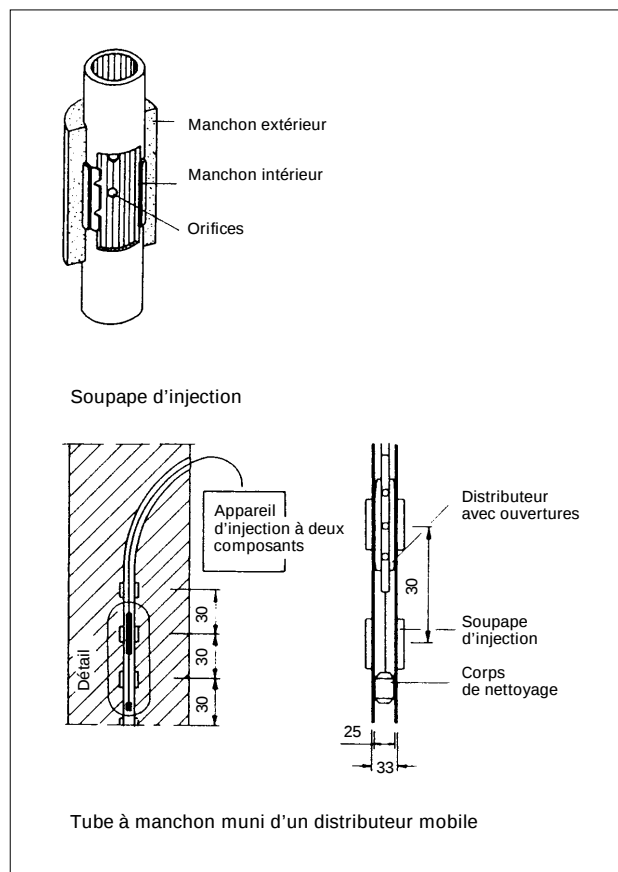


Figure 4.45: Tube à manchette, selon [4.49]

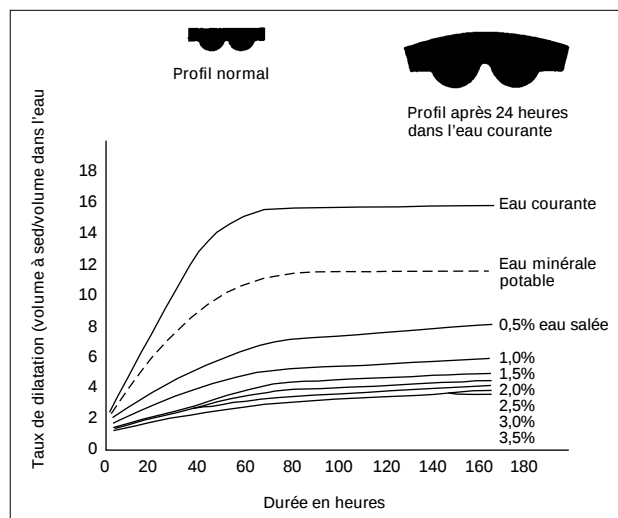


Figure 4.46: Taux de dilatation des bandes de joints hydrophiles dans des solutions aqueuses, selon [4.49]

4.5.5 Remplacement

Le remplacement des étanchéités est possible et usité sur des ouvrages tels que les dalles de roulement de ponts et autres constructions analogues, comme les niveaux de parking. L'évaluation de l'état permet de définir si l'on ne remplace l'étanchéité que partiellement (p. ex. remplacement des bordures] ou totalement.

Il faut savoir que l'étanchéité souffre fréquemment du remplacement du revêtement, ce qui nécessite son renouvellement.

Un remplacement partiel ne réussit vraiment que si l'étanchéité existante est collée, de préférence entièrement. L'assainissement partiel des étanchéités flottantes est généralement décevant; en effet, l'eau a eu l'occasion de se répandre largement, permettant au sel de déverglaçage qu'elle transportait de causer des dommages au béton de la structure porteuse.

La conception du remplacement d'une étanchéité constitue un travail délicat, puisque ce genre d'opération se déroule normalement sans que l'on interrompe le trafic. On tiendra donc compte des indications fournies par le document [1.1].

Technologiquement parlant, il faut prêter garde à un certain nombre de points relatifs aux normes et à d'autres détails [4.46, 4.53].

Depuis quelque temps, on tend de plus en plus à assurer l'étanchéité des dalles de roulement et des parkings, endroits où les armatures se corrodent rapidement. C'est particulièrement vrai pour les lieux où les véhicules se succèdent sans cesse, apportant autant de chlorures. Vous trouverez dans le document [4.61] toutes les indications utiles à la conception et à l'exécution de ces étanchéités.

Le remplacement des systèmes de protection de structures porteuses enterrées comme les toits de garages souterrains, les galeries et les tunnels à ciel ouvert, est une opération possible mais qui réclame des moyens considérables. Si l'on ne parvient pas à juguler les infiltrations d'eau, le renouvellement reste la seule mesure possible.



Figure 4.47: Exécution d'une nouvelle bordure lors de l'assainissement d'un pont (étanchéité polymère-bitume)



Figure 4.48: Exécution d'une nouvelle étanchéité de pont (polymère-bitume)



Figure 4.48: Exécution d'une nouvelle étanchéité de pont à l'aide de plastique liquide

5. Construction métallique

5.1	Généralités	103
5.2	Mécanismes de vieillissement et de dégradation	106
5.3	Types de protection anticorrosion	110
5.4	Surveillance et entretien	116
5.5	Renouvellement	116

5. Construction métallique

5.1 Généralités

En génie civil et en travaux publics, il y a déjà longtemps que l'on bâtit des ouvrages métalliques. C'est de 1777 à 1779 que l'on construisit le plus ancien pont arc en fonte sur la Severn (fig. 5.1) près de Coalbrookdale, en Angleterre. Cet ouvrage est toujours en service à l'heure actuelle.

Par la suite, notre pays construisit lui aussi des ponts (fig. 5.2), des réservoirs, des grandes halles, ouvrages pour lesquels on utilisait les sortes les plus diverses de fer et d'acier:

- fonte;
- acier puddlé (n'est pas soudable!);
- «vieil» acier moulé, acier de Thomas;
- aciers électriques (Siemens, Martin, etc.), «nouveau» acier moulé, acier calmé
- acier coulé;
- aciers à grain fin tels qu'on les trouve aujourd'hui (idéals pour la soudure)
- aciers spéciaux:
 - aciers résistants à la corrosion atmosphérique de types «Corten», «Patinax» et autres
 - aciers inoxydables [5.2].

Depuis que l'on utilise du fer et de l'acier, on a constaté que ces matériaux rouillent en cas d'absence de précautions particulières [5.3]. Les métaux riches en carbone, tels l'acier puddlé et la fonte grise, sont moins sujets à la corrosion.

C'est à l'époque de la construction des réseaux ferroviaires qu'apparut la nécessité d'envisager des traitements anticorrosifs. Il fallait penser à protéger de la rouille les ponts bâtis en fonte et en acier puddlé. La première usine de laquage apparut en Angleterre en 1790 déjà. Le traitement qui semblait alors le plus prometteur consistait en une ou deux couches de fond d'huile de lin / minium de plomb, suivies d'au moins deux couches de finition d'huile de lin / graphite. L'étape suivante, dans l'histoire de la protection anticorrosion, a été franchie en 1940 par les Anglais qui ont imaginé les premiers revêtements avec du zinc organique. Comme cette nouvelle méthode ne pouvait être appliquée correctement qu'à des surfaces métalliques préalablement dégraissées et nettoyées mécaniquement au jet de sable, la Royal Navy décida de généraliser le décapage par projection qui devint ainsi le système universel de préparation des surfaces [5.4].



Figure 5.1: Pont arc en fonte sur la Severn près de Coalbrookdale – portée de 30 m, voir [5.1]

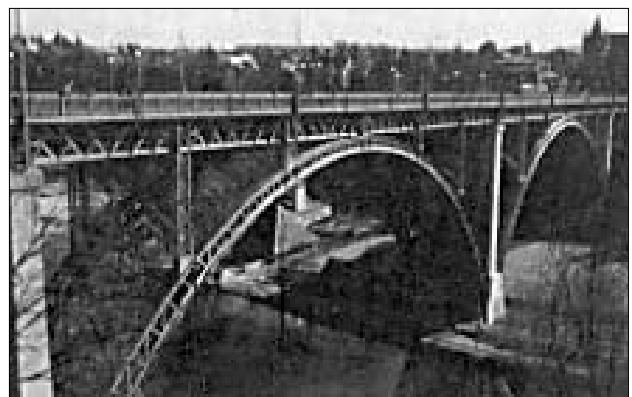


Figure 5.2: Le pont du Kirchenfeld à Berne, récemment rénové et partiellement restauré

En Suisse aussi, on a longtemps utilisé l'huile de lin comme liant, additionnée de pigments de minium pour les couches de fond, et de fer micacé pour les couches de finition. Il s'agissait là d'une solution simple que chaque peintre pouvait appliquer. Avec l'apparition de nouvelles substances, la protection des surfaces métalliques est devenue peu à peu plus compliquée, notamment en ce qui concerne le traitement préparatoire et les conditions de durcissement lors de l'application de poudre de zinc.

Depuis que l'on construit des ouvrages métalliques, on a compris qu'ils réclamaient des travaux d'entretien pour prévenir la corrosion. L'entretien est important pour tous les ouvrages métalliques exposés aux intempéries et aux autres atteintes de toutes sortes. Certaines constructions, comme la tour Eiffel à Paris ou le Golden Gate Bridge à San Francisco, ont leur équipe permanente d'entretien. Ainsi, le Golden Gate bénéficie d'un entretien anticorrosion qui n'a pas cessé depuis les années quarante (fig.5.3). En 1968, on a décidé de remplacer la couche de minium originale par une couche de poudre de zinc inorganique: un travail de quelque 25 ans pour les 39 hommes de l'équipe permanente!

Alors qu'on n'a compris que récemment la nécessité d'entretenir les ouvrages en béton armé, l'entretien des ouvrages métalliques a déjà une longue tradition derrière lui. Toutefois, dans ce domaine aussi, il se produit des mutations technologiques suscitées par l'utilisation de matériaux compatibles avec l'environnement.

La première recommandation du Centre suisse de la construction métallique (SZS) en matière de protection des surfaces date de 1969 et ne comportait que 4 feuillets. Un document élargi, appelé B3 et comprenant 31 pages, a été édité en 1982. Huit ans plus tard, le nouveau B3, complété d'une annexe et d'un index, est devenu la norme SN n° 555 001 [5.4, 5.6].



Figure 5.3: Golden Gate Bridge – Dans sa nacelle, un ouvrier travaille au traitement anticorrosion d'un câble de suspension, voir [5.5]

Cette norme fait le point de la technique en l'état actuel. Elle décrit l'évolution des techniques anticorrosion au cours des années écoulées et présente la palette toujours plus vaste des produits que l'on trouve sur le marché (p. ex. les polyuréthanes à un seul composant durcissant à l'humidité qui conviennent aussi aux ouvrages exposés aux intempéries). Ce document traite également des nouvelles exigences qu'impliquent la protection de l'environnement et la médecine du travail.

Cette norme contient des éléments qui concernent directement les travaux de conception et d'exécution:

«La présente norme doit être considérée comme une introduction au thème général de la protection de surface des constructions métalliques et comme marche à suivre pour le choix d'une solution convenable. Sur la base de cette norme, la protection contre la corrosion la plus appropriée peut être choisie par les différents intervenants, les exigences relatives à la durée de protection et – le cas échéant – de fonction esthétique selon le plan d'utilisation prévu par la norme SIA 160 étant respectées. Elle sert également de base aux auteurs de projets et aux entrepreneurs pour l'établissement des contrats.

Cette norme sert à assurer la qualité de la protection de surface requise par la fonction de l'ouvrage. Les mesures assurant la qualité du revêtement appliqué sont contenues dans les différents chapitres.

Le champ d'application comprend les constructions métalliques au sens de la norme SIA 161, soit les éléments de construction de plus de 3 mm d'épaisseur de paroi. Elle a été établie essentiellement pour les charpentes métalliques de bâtiments et de ponts.

Les traitements de protection de surface utilisés moins fréquemment dans la construction métallique ne sont pas abordés ici ou seulement de façon succincte, par exemple les procédés pour la création de revêtements métalliques en continu, les procédés électrolytiques, les revêtements à base de poudre, les traitements au four, les procédés de giclage à température élevée et les systèmes à couches épaisses.»

Comme la B3 traite également de la protection des surfaces lors des renouvellements, notre documentation peut se borner à donner quelques informations complémentaires. Si nous reprenons certaines données tirées de la norme, ce n'est que pour faciliter la lecture des lignes qui suivent.

Précisons ici que la B3 utilise des termes génériques qui s'écartent parfois de ceux de la recommandation SIA 169 (1987). Les correspondances figurent dans la figure 5.5.

		Schweizer Norm Norme suisse Norma svizzera Construction 555 001	
EINGETRAGENE NORM DER SCHWEIZERISCHEN NORMEN-VEREINIGUNG SNV		NORME ENREGISTRÉE DE L'ASSOCIATION SUISSE DE NORMALISATION	
B3	Protection de surface des constructions métalliques		
Protection contre la corrosion par revêtement			
Table des matières			
1	Introduction	Page	
1.1	Champ d'application	5	
1.2	Terminologie	5	
2	Elaboration du projet	Page	
2.1	Influences de l'environnement et actions corrosives	11	
2.2	Dispositions pratiques et détails de construction	12	
2.3	Programme des travaux	13	
2.4	Revêtements usuels	14	
2.5	Compatibilité	16	
2.6	Propriétés physico-chimiques des revêtements	18	
2.7	Fonction et aspect de la surface	20	
2.8	Coût et entretien de la protection contre la corrosion	21	
3	Exécution et contrôle	Page	
3.1	Préparation des surfaces métalliques	23	
3.2	Qualités des matières de revêtement	25	
3.3	Application des revêtements	25	
3.4	Épaisseur de couche, adhérence et porosité	26	
3.5	Retouches	31	
4	Prestations et fourniture	Page	
4.1	Recommandations pour les conditions contractuelles et de fourniture	33	
4.2	Réception et détails de dénonciation des défauts	35	
5	Renouvellement	Page	
5.1	Évaluation de l'état de la protection	39	
5.2	Critères de décision	39	
5.3	Exécution des travaux	40	
5.4	Problèmes spéciaux	40	
5.5	Renouvellement de revêtements métalliques et de systèmes duplex	41	
6	Introduction	Page	
6.1	Normes et directives	43	
6.2	Index	48	
1990 Centre suisse de la construction métallique Seefeldstrasse 25, 8034 Zurich, téléphone 01/261 89 80, téléfax 01/262 09 62			

Figure 5.4: Page titre de la nouvelle norme SN 555 001.B3

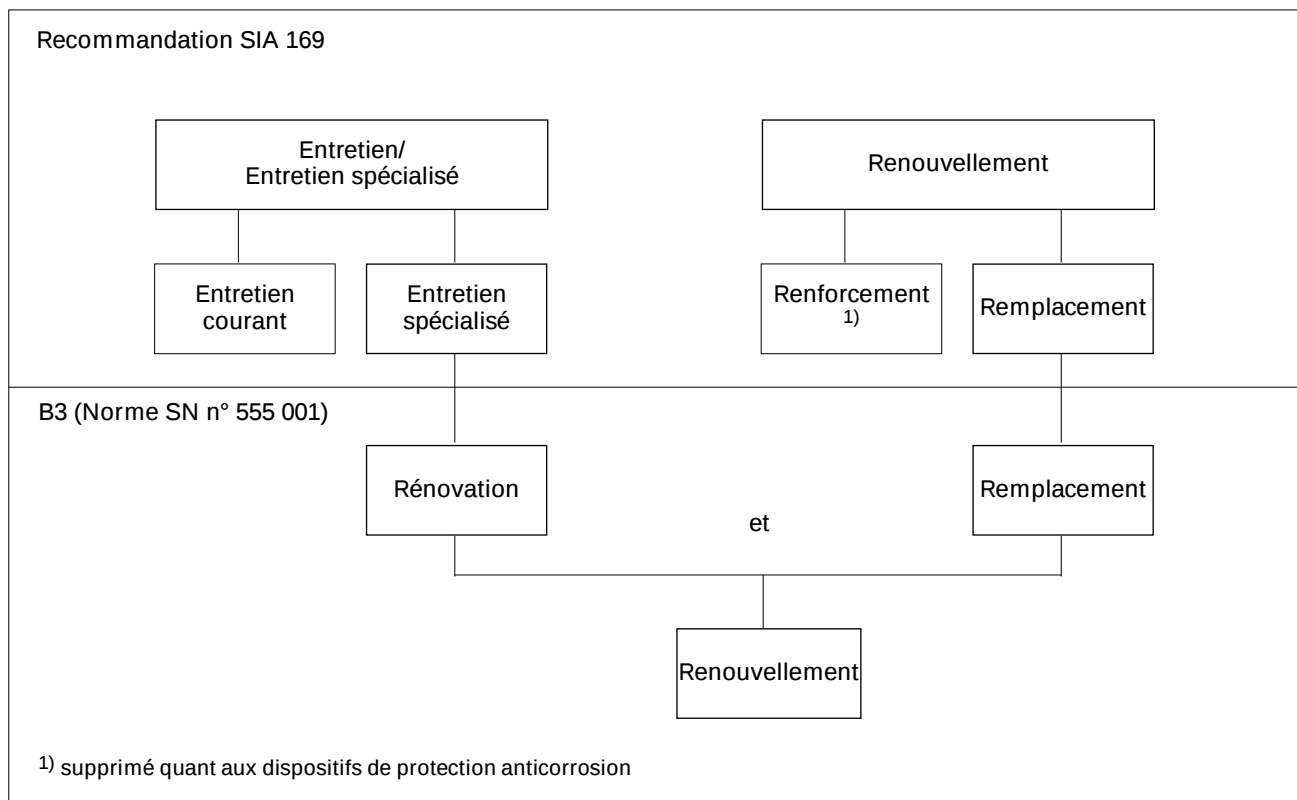


Figure 5.5: Différences entre les termes utilisés par la recommandation SIA 169 (1987) et le document B3 (1990) pour la protection anticorrosion

5.2 Mécanismes de vieillissement et de dégradation

Les principales données relatives aux mécanismes de vieillissement et de dégradation de tous les matériaux, figurent dans le chapitre 2 § 2.3.

«Le processus de corrosion de l'acier nécessite la présence d'eau et d'un agent d'oxydation.

Dans des substances corrosives neutres et basiques, l'oxygène agit comme agent d'oxydation (fig. 5.6). En l'absence d'oxygène ou d'eau, il n'y a pas de corrosion. Par contre, l'acier peut être soumis à la corrosion en l'absence d'oxygène, sous l'influence des substances corrosives acides.

La corrosion de l'acier commence à partir d'une humidité relative de l'air située aux environs de 60% (fig. 5.7). En présence de chlorures, cette valeur est encore plus basse.

En général, un mince film humide sur la surface métallique suffit à induire le processus de corrosion. Les sels hygroscopiques ou les polluants atmosphériques condensés favorisent la formation d'un tel film. Les ponts thermiques sont également à l'origine de la formation de films d'eau condensée.

Dans le cas de métaux actifs tels que l'acier zingué, la corrosion agit sur toute la surface métallique exposée et provoque une réduction d'épaisseur plus ou moins régulière.

Les métaux passifs tels que l'acier au chrome-nickel et l'aluminium sont en général protégés contre la corrosion par passivation. La corrosion ne commence

qu'après la destruction locale de cette protection, par exemple par des chlorures. En général, l'attaque corrosive n'intervient qu'à quelques endroits de la surface métallique et peut conduire à la ruine d'un élément de construction sans avoir été détectée. Pour l'emploi d'aciers inoxydables et d'autres métaux dans la construction, on consultera la documentation SIA [5.2].»

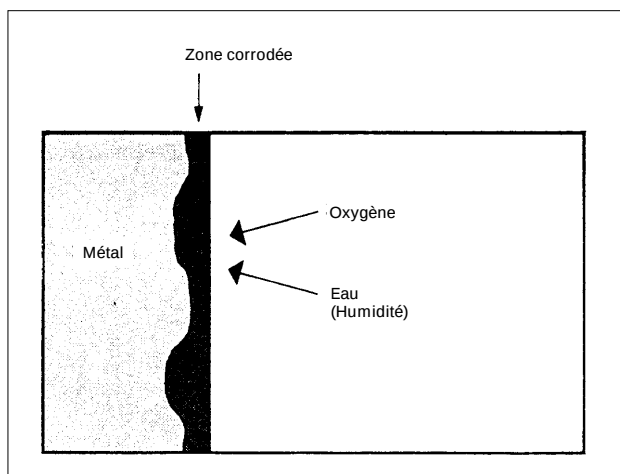


Figure 5.6: Corrosion par l'eau et l'oxygène, selon [5.6]

Les divers comportements sont illustrés à la figure 5.8.

«Les actions mécaniques et thermiques exigent une protection de surface appropriée.

Cette règle doit être observée, par exemple, pour les caillebotis, les mains courantes et les revêtements de cheminée.

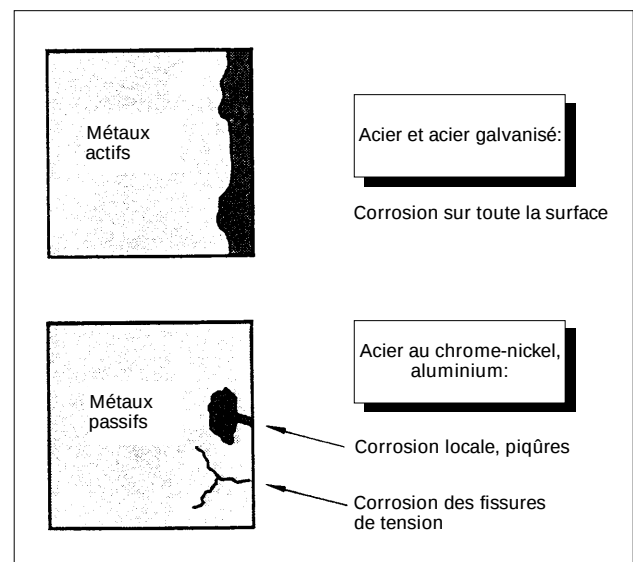


Figure 5.8: Le processus de corrosion diffère selon que le métal est actif ou passif, selon [5.6]

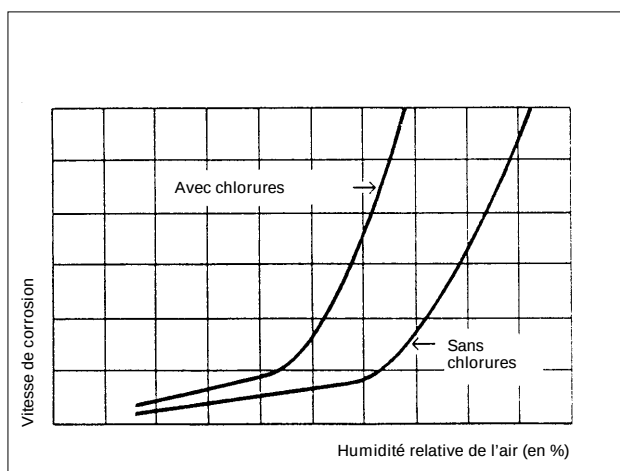


Figure 5.7: Vitesse de corrosion de l'acier en fonction de l'humidité relative de l'air et de la présence de chlorures, selon [5.6]

Pour la définition de l'influence de l'environnement, on fait une distinction entre climat régional et microclimat.

On entend par climat régional (macroclimat), l'atmosphère aux alentours de l'ouvrage. On différencie alors deux types principaux d'atmosphère: atmosphère normale et atmosphère agressive.

La classe d'agressivité d'un climat régional est définie par le coefficient d'altération annuel mesuré selon la norme DIN 50917 sur des spirales métalliques exposées librement aux intempéries. Les valeurs indiquées au tableau 5.1. sont valables pour le fer et le zinc.

En Suisse, les mesures sur sept sites ruraux et urbains (de Sion à Bâle) ont donné des coefficients d'altération annuels situés entre 18 et 37 microns pour le fer et de 1,15 à 2,65 microns pour le zinc (situation 1989).

Classe d'agressivité		1	2	3	4	5
Coefficient d'altération	fer	≤ 20	≤ 40	≤ 60	≤ 80	> 80
en μm / an	zinc	$\leq 1,25$	$\leq 2,25$	$\leq 3,25$	$\leq 4,25$	$> 4,25$

Tableau 5.1: Définition des classes d'agressivité du climat régional (macroclimat)

Le tableau 5.2 donne les types d'atmosphère rencontrés en climat régional

Type d'atmosphère	Classes d'agressivité	Définition du climat régional	Ancienne désignation du type d'atmosphère
Atmosphère normale	1 et 2	Action corrosive faible, atmosphère sans teneur notable en oxyde de soufre et autres substances polluantes, p. ex. zones rurales et petites villes	rural
	2 et 3	Action corrosive moyenne, atmosphère avec teneur modérée en oxyde de soufre et autres substances polluantes, p. ex. zones à forte densité de population, sans forte densité d'industrie	urbain
Atmosphère agressive	3 à 5	Action corrosive forte, atmosphère avec teneur élevée en oxyde de soufre et autres substances polluantes, p. ex. zones à forte densité d'industrie et régions proches, situées dans la zone d'influence des vents dominants	industriel
	4 et 5	Action corrosive très forte, atmosphère polluée par des substances favorisant particulièrement la corrosion (p. ex. chlore) ou avec humidité de l'air élevée en permanence, p. ex. au-dessus de la mer ou dans les régions côtières	maritime

Tableau 5.2: Climat régional et type d'atmosphère

Ainsi, les coefficients relevés à Bâle, Lugano et Zurich s'avèrent plus élevés que ceux de Payerne et Tânikon. Les coefficients les plus bas ont été enregistrés à Sion qui bénéficie de l'air sec de la vallée du Rhône.

Ces chiffres correspondent aux classes d'agressivité DIN 1 et 2-3; en d'autres termes, il s'agit d'une action corrosive moyenne.

Grâce à ces chiffres, les ingénieurs concepteurs disposent, pour la première fois, de données régionales de référence qui permettent d'envisager la calcul de la durée d'utilisation et de vie d'un ouvrage. On peut ainsi calculer la longévité d'une couche de protection en zinc qui aurait une épaisseur de 100 microns (en admettant que les conditions demeurent toujours les mêmes):

à Sion $100 \mu\text{m} : 1,15 \mu\text{m} = 70 \text{ ans}$

à Bâle $100 \mu\text{m} : 2,65 \mu\text{m} = 39 \text{ ans}$

Les valeurs obtenues ne sont pas directement applicables à la longévité de la couche de protection puisque le processus de corrosion exige que l'on renouvelle la couche lorsqu'elle est corrodée aux deux tiers. De plus, le chiffre de 39 ans obtenu pour les zones citadines semble quelque peu optimiste. En effet, les expériences faites à Zurich indiqueraient plutôt une durée de 20 à 30 ans.

«On entend par microclimat l'ensemble des influences agissant à proximité immédiate d'une construction métallique ou directement sur un élément de construction.»

Le microclimat est défini par les facteurs suivants:

- humidité relative de l'air, température de l'air et de la surface;
- exposition aux intempéries (exposé ou à l'abri des intempéries);
- action corrosive localement accrue.

Une action corrosive localement accrue peut notamment se présenter dans les cas suivants:

- face inférieure d'un pont au-dessus d'un cours d'eau;
- zone de condensation due à un pont thermique;
- exposition aux éclaboussures d'eau;

- eaux pluviales préalablement en contact avec du béton;
- ouvrages exposés aux brouillards salins;
- zones exposées aux sels de déverglaçage;
- proximité d'une usine de décapage;
- zones de dépôt de substances nocives (pollution de l'air, substances chimiques, excréments, etc.);
- endroits soumis aux phénomènes électrochimiques (différences de potentiel, courants vagabonds)».

La conception d'un ouvrage doit tenir compte des particularités climatiques locales qui ont une influence sur les détails constructifs.

Pour conclure, mentionnons que les spécialistes considèrent que la corrosion des métaux dans l'industrie et la construction coûte chaque année cinq milliards de francs à notre pays. La part des ouvrages métalliques dans ce calcul, est relativement modeste.

5.3 Types de protection anticorrosion

Comme le montre la figure 5.9, il existe un certain nombre de méthodes destinées à protéger l'acier contre la corrosion:

- Alliage de l'acier
- Protection des surfaces
- Modification des influences de l'environnement.

Alliage de l'acier

L'alliage de l'acier permet une meilleure autoprotection du matériau. On dispose des possibilités suivantes:

- aciers inoxydables (chrome, nickel)
- et
- aciers résistants à la corrosion atmosphérique (de type «Corten», «Patinax», etc.).

Les aciers inoxydables coûtent cher et ne servent, en principe, qu'aux moyens d'assemblage.

Les aciers résistants à la corrosion atmosphérique sont surtout utilisés dans la construction de ponts. Pour en savoir plus sur les expériences faites avec ces matériaux, veuillez vous référer à la littérature spécialisée, p. ex. à [5.12].

Protection des surfaces

C'est la norme B3 qui constitue le document de base pour la protection des surfaces des constructions métalliques.

Si l'on veut assurer la longévité d'un ouvrage, il ne faut pas se contenter de protéger les surfaces, encore faut-il prendre des mesures constructives. Le document B3 donne également des indications à ce sujet, notamment en ce qui concerne la protection anticorrosion des moyens d'assemblage, protection qui doit être aussi bonne que celle appliquée à l'ouvrage dans son ensemble. Les organes de liaison zingués électrolytiquement devraient aussi recevoir un revêtement complémentaire, ce dont les moyens d'assemblage zingués à chaud peuvent éventuellement se passer. On peut également utiliser des aciers inoxydables.

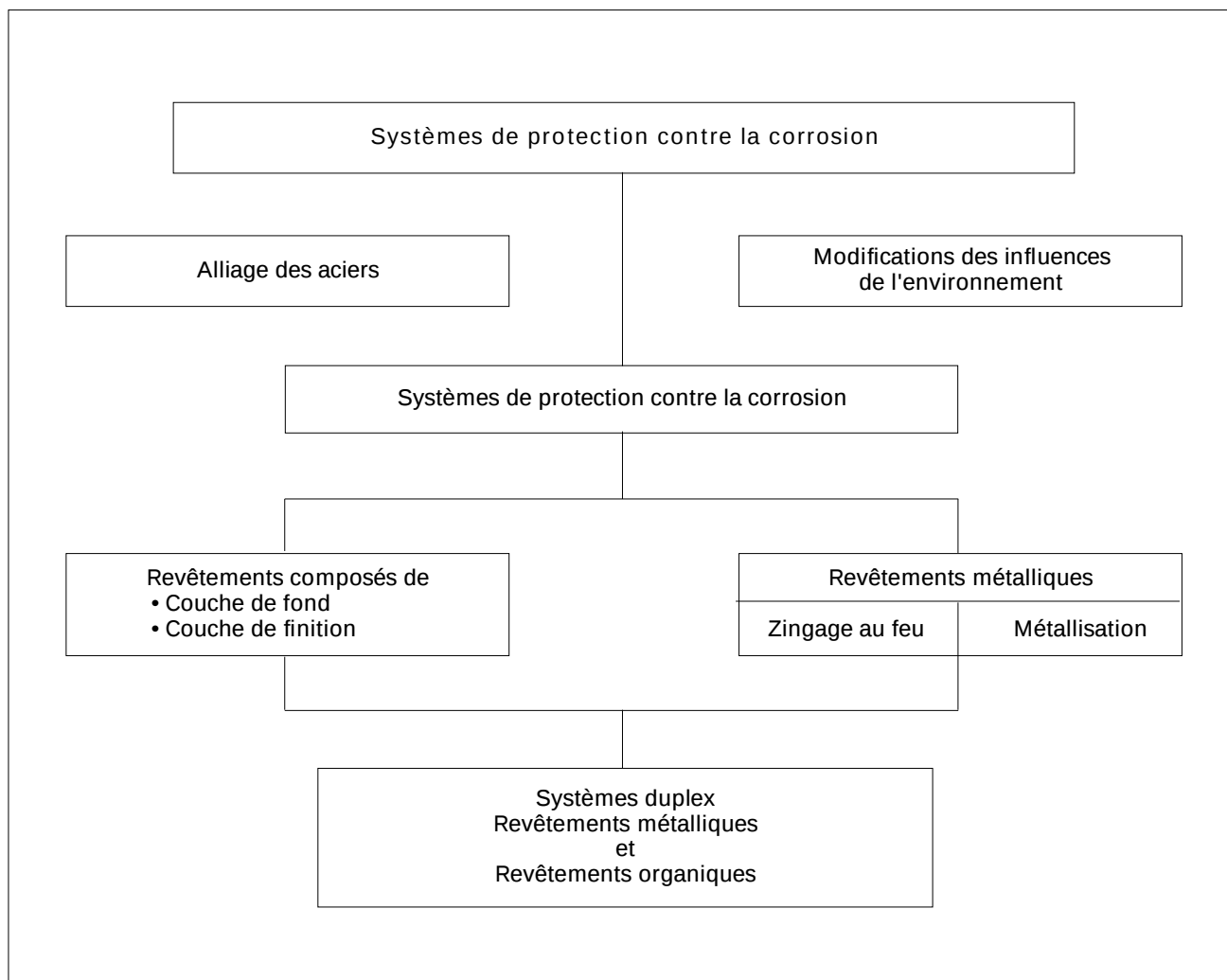


Figure 5.9: Classification des systèmes de protection contre la corrosion de l'acier

Les abréviations du tableau 5.3 selon le catalogue des articles normalisés CAN 2000 sont donnés ci-dessous:

Couches de fond et revêtements métalliques:

- P1 Couche de fond 1K à base de phosphate ou chromate de zinc
- P2 Couche de fond 2K à base de phosphate ou chromate de zinc
- M1 Couche de fond 1K à base de minium ou de silicochromate de plomb
- M2 Couche de fond 2K à base de minium (oxyde de plomb)
- Z1 Couche de fond 1K à base de poudre de zinc
- Z2 Couche de fond 2K à base de poudre de zinc
- ZS Couche de fond à base de poudre de zinc et de silicate
- F Zingage à chaud
- S Métallisation

Liants:

- 1K Liant à un composant
- 2K Liant à deux composants
- FH Durcissant en présence d'humidité (humidité de l'air comme deuxième composant)

Notes concernant le tableau 5.3:

- (2) *Pour des raisons de protection de l'environnement, les produits pour couches de fond contenant du plomb doivent être limités aux cas où la préparation de surface, la compatibilité et les possibilités d'application ne permettent pas l'utilisation de produits de rechange. L'application par giclage des couches de fond contenant du minium de plomb doit être évitée.*
- (3) *Une couche de finition est nécessaire dans les zones où la condensation peut apparaître.*
- (4) *Exige un degré de préparation de surface Sa 2 1/2.*
- (5) *La rugosité et la texture exigées de la surface métallique ne peuvent être atteintes qu'avec des matériaux de projection minéraux. La rugosité de la surface décapée sera déterminée selon la norme ISO 8503-2. Il est recommandé une rugosité plus grande que le cadran 1, mais plus petite que le cadran 4, correspondant à la classification «moyen» à «gros-sier».*
- (6) *Pour les couches de type ZS, l'épaisseur minimale de 60 µm est suffisante. Afin d'éviter la fissuration, l'épaisseur maximale ne devrait pas être supérieure à 150 µm,*
- (7) *Epaisseur de couche minimale selon la norme SN 237 240.*
- (8) *Des couches de finition sont nécessaires en fonction de la durée de protection envisagée et en tenant compte du coût de renouvellement et du coefficient d'altération prévu. Pour des constructions exposées aux intempéries, le coefficient d'altération annuelle atteint 1 à 5 µm pour les classes d'agressivité 1 à 3.*
- (9) *Nettoyage avec matériaux de projection minéraux uniquement.*
- (10) *Fermeture des pores immédiate et couche supplémentaire sont obligatoires.*
- (11) *Dans ce cas, des revêtements à couches épaisses sont généralement utilisés. Certains systèmes à couches épaisses peuvent aussi être appliqués directement sur la surface d'acier nettoyée sans couche de fond.*

Composition de la couche de fond			Conditions d'utilisation			
Code (voir chiffre 176)	Epaisseur de couche minimale	Degré de préparation de surface (1)	A Intérieur sec, humidité relative < 70 %, sans condensation	B Intérieur humide, avec condensation occasionnelle, ou extérieur, non exposé aux intempéries	C Extérieur, exposé aux intempéries	D Intérieur et extérieur, exposé à l'eau en permanence
P1 et P2 (2)	30 µm	Sa 2				
P1 et P2 (2)	60 µm	Sa 2	3			
M1 (2)	60 µm	Sa 2				
M2 (2)	60 µm	Sa 2 ou St 3				4
Z1	30 µm	Sa 2 ou St 3	3			
Z1	60 µm	Sa 2 1/2				
Z2	30 µm	Sa 2 1/2	3			
Z2	60 µm	Sa 2 1/2		6	6	
ZS	80 µm	Sa 2 1/2				
F	(7)	décapage	3	8	8	
S	50 µm	Sa 3 (9)		10	10	10
Epaisseur totale minimale du revêtement			30 µm ou 60 µm	90 µm	120 µm	300 µm (11)
 Couche de finition nécessaire  Couche de finition non nécessaire  Non usuel ou insuffisant						

Tableau 5.3: Revêtements usuels pour les classes d'agressivité 1 ... 3 (atmosphère normale sans action corrosive localement accrue)

Modification des influences de l'environnement

Il est rare qu'on parvienne à modifier les influences de l'environnement. Néanmoins, on arrive parfois à introduire des petites modifications climatiques. Comme on l'a vu dans le paragraphe 5.2, la corrosion n'apparaît pas si la surface du métal reste constamment sèche. Ce principe tout simple est pratiquement inapplicable sous nos latitudes où l'humidité relative de l'air est assez élevée; rares sont d'ailleurs les ouvrages auxquels on pourrait appliquer ce principe. Cela existe malgré tout, et nous allons le voir dans l'exemple qui suit. Il s'agit d'une superstructure métallique qui s'étend sur près de 3 km pour constituer les ponts de Farö (Danemark) (fig. 5.10). Le coût de la protection anticorrosion d'un pont métallique constitue une part significative de son coût global: on compte environ 10% du coût de la superstructure. En outre, la moitié des coûts d'entretien de la superstructure est consacrée à la protection anticorrosion.



Figure 5.10: Le pont de Farö vu d'avion (tiré de ([5.11]))

Comme le montre la figure 5.11, la poutre-caisson coûte bien moins cher si ses surfaces internes et ses tôles de renfort ne sont pas peintes et si la protection anticorrosion est assurée par une dessiccation continue de l'air.

Ce concept révolutionnaire a été appliqué pour la première fois en 1970 sur le détroit du Petit Belt, au Danemark. L'expérience s'avère très positive.

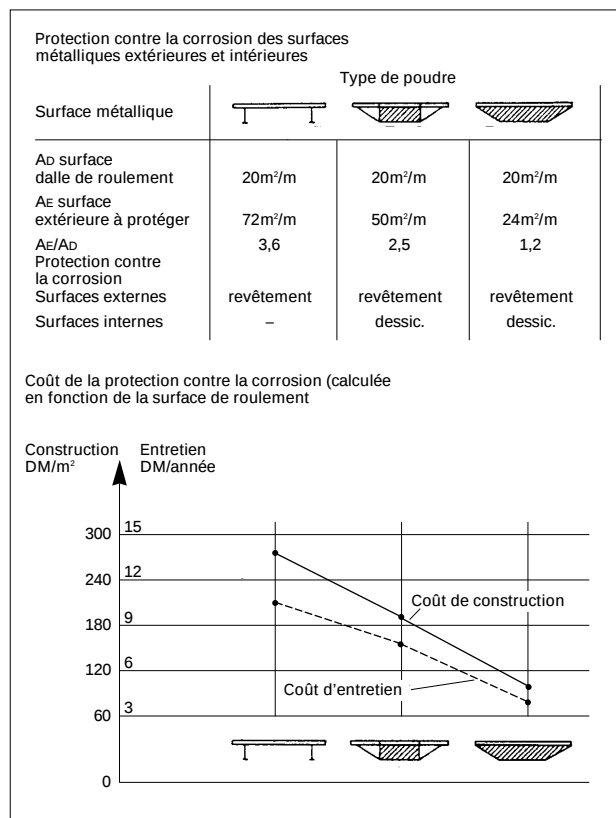


Figure 5.11: Protection contre la corrosion des surfaces métalliques extérieures et intérieures, selon les différents types de sections, coûts de construction et d'entretien. C'est la section de droite qui a été choisie pour le pont de Farö. Sur les 4000000 m² de surfaces métalliques, 320000 m² se trouvent à l'intérieur des poutres et leur protection contre la corrosion est assurée par dessiccation de l'air. Seuls les 80000 m² extérieur ont reçu un revêtement. Le diagramme montre les coûts de la protection contre la corrosion lors de la construction et en exploitation, sur une période de 50 à 100 ans. Ces données sont tirées de [5.10]

Remarque: les résultats ne sont pas forcément applicables à d'autres cas. En particulier, ils ne remettent pas en question nos méthodes de construction mixte

Cette solution a été choisie pour le pont de Farö. Alors que les surfaces externes ont été protégées traditionnellement (couche de fond de silicate de zinc recouverte de 3 à 4 couches de caoutchouc chloré), c'est de l'air desséché qui circule dans la poutre-caisson (fig. 5.12). La dessiccation de l'air se fait au moyen de filtres hygroscopiques. L'air extérieur n'est admis qu'au moment où il faut équilibrer la pression atmosphérique interne et externe, ou lorsque l'on procède à une inspection à l'intérieur de la poutre-caisson.

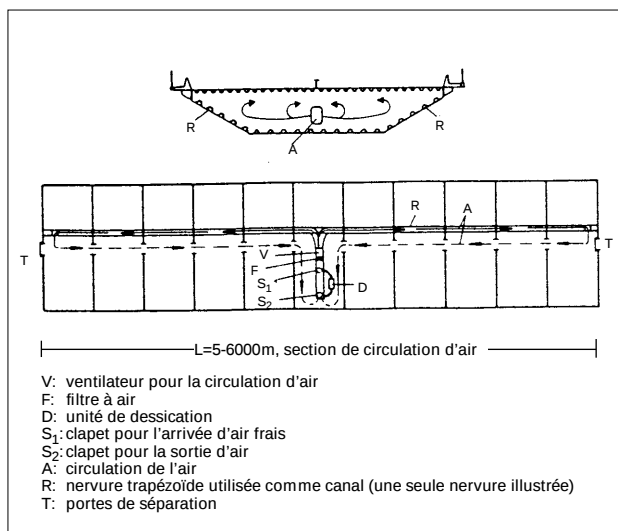


Figure 5.12: Système de dessiccation et de circulation de l'air à l'intérieur des poutres selon [5.10]

Les six installations de dessiccation sont réparties au long de la structure porteuse. Les caissons métalliques des têtes de haubans situés au sommet des pylones, sont eux aussi équipés d'un dispositif anticorrosion par dessiccation de l'air.

Il arrive qu'on utilise ce nouveau procédé dans des cas où l'on désire protéger temporairement ou définitivement des haubans ou des câbles.

On l'utilise aussi maintenant dans l'entretien spécialisé des nombreuses alvéoles intérieures que possède le pont de Lorraine à Berne. C'est la mesure anticorrosion qui a été choisie pour protéger l'armature de ce pont en béton armé.

Protection anticorrosion cathodique

Dans notre pays, on utilise ce procédé pour les tuyauteries et les cuves de transport et de stockage de substances polluantes ou nocives. Nous ne traiterons pas plus avant de ce type spécialisé de protection, et vous prions de vous référer à la littérature spécialisée et aux normes en vigueur [5.7 à 5.9].

Pour terminer ce chapitre, donnons quelques indications sur une méthode que l'on voit de plus en plus depuis quelques années: la coloration des traitements de surfaces métalliques. Comme le montre la figure 5.13, la protection anticorrosion possède une fonction double: elle doit, bien sûr, empêcher la corrosion, mais aussi répondre à des critères esthétiques. C'est pourquoi l'on parle de la durée de fonction esthétique, mais aussi de la durée de protection.

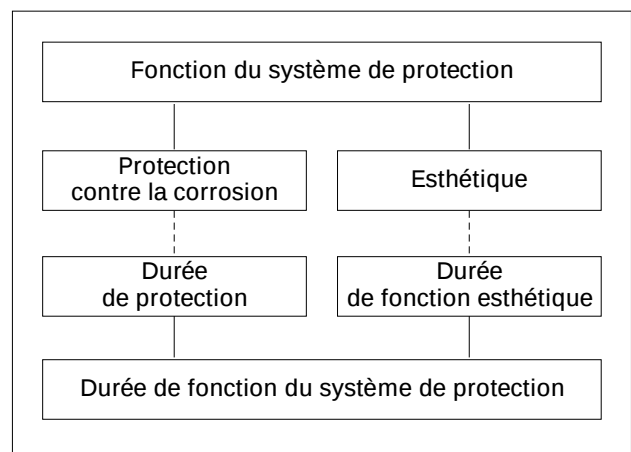


Figure 5.13: Fonction du système de protection

«La durée de fonction esthétique est déterminante quand un ouvrage ou un élément d'ouvrage joue un rôle essentiellement ou exclusivement esthétique (par exemple des pièces métalliques visibles sur un bâtiment commercial). En général, cette durée prend fin quand les premières dégradations de la surface traitée sont perceptibles à l'œil nu, à partir d'un point d'observation caractéristique.

La durée de fonction esthétique du système de protection est, dans la plupart des cas, sensiblement plus courte que sa durée de protection voir [5.6].»

L'aspect des ouvrages métalliques a suscité des exigences toujours croissantes qui ont conduit à

développer le système duplex, dans lequel on combine le zingage à chaud et un revêtement organique de la couleur désirée. Ce revêtement possède en outre l'avantage de retarder la destruction de la couche. Les couleurs claires durent moins longtemps que les foncées; autrement dit, il faut que la couche soit d'autant plus épaisse que la couleur est claire (p. ex. passer de 80 à 150 microns).

5.4 Surveillance et entretien

«La protection de surface, notamment celle de constructions soumises aux intempéries ou à des actions corrosives élevées, doit être surveillée et entretenue périodiquement.

En cas d'actions corrosives normales, la surveillance périodique doit être effectuée environ tous les 5 ans. Il est judicieux d'adapter l'intervalle des inspections à l'âge de la protection de surface, à l'action corrosive et au risque encouru en cas de défaillance de la fonction de protection.

L'entretien systématique basé sur les résultats de la surveillance prolonge la durée de protection. Il faut particulièrement surveiller les points faibles résultant de la conception, de l'exécution ou d'une action corrosive localement accrue.»

Les documents [1.2] et B3 donnent toutes les indications utiles sur les techniques d'investigation et le contrôle de l'état des charpentes.

5.5 Renouvellement

L'expérience nous donne les cycles suivants en matière de renouvellement des systèmes de protection des surfaces:

- Construction à l'air libre (p. ex. ponts): de 20 à 25 ans
- Constructions couvertes (p. ex. halles ouvertes): de 30 à 40 ans
- Constructions intérieures: jusqu'à 50 ans et plus.

Comme le montre la figure 5.5, dans la construction métallique, lorsqu'on parle de renouvellement, on distingue entre rénovation et remplacement qui,

dans les deux cas, peuvent être entrepris pour tout ou partie des surfaces concernées.

Le document B3 définit ces deux notions comme suit:

- «–*Rénovation: complément de revêtement appliqué sur les couches existantes.*
- *Remplacement: enlèvement des couches existantes jusqu'à la surface de l'acier, préparation, nouvelle application.*

La décision quant à une rénovation ou un remplacement, et quant à un traitement local ou sur toute la surface, exige une évaluation soigneuse des critères suivants:

- *conception de l'entretien, selon le paragraphe 2.8 du document B3;*
- *résultats du contrôle de l'état existant;*
- *mesures indispensables, par exemple enlèvement de dépôts, enlèvement de couches détachées, compensation de la perte de l'épaisseur de couche, remplacement local ou sur toute la surface;*
- *principes de conception selon le chapitre 2 du document B3, pour autant qu'ils soient applicables, par exemple en ce qui concerne les actions corrosives, les dispositions pratiques de construction, le programme des travaux, la compatibilité, les propriétés physico-chimiques, l'esthétique et le coût;*
- *atteinte à l'environnement provoquée par les produits et procédés d'application prévus.*

Le choix d'un revêtement approprié à la rénovation d'anciens revêtements ou au remplacement local d'un système de protection est restreint.

La compatibilité entre nouvelles matières de revêtement et revêtements existants doit être examinée de manière particulièrement soignée. Pour ceci, outre les essais en laboratoire, la méthode consistant à contrôler l'état des champs de référence pendant une période d'une année a fait ses preuves.

Un danger de fissuration existe pour des couches dont l'épaisseur totale est devenue trop importante à la suite de rénovations répétées.

Si une rénovation de l'acier patinable s'avère nécessaire, les mêmes méthodes que pour la protection contre la corrosion de l'acier ordinaire sont applicables.

Là où le revêtement métallique (par exemple zingage à chaud) n'existe plus, on choisira un autre système de protection de surface avec le procédé de décapage correspondant, à moins qu'il soit possible d'effectuer le remplacement du revêtement en zinguerie» – ce qui signifie qu'un zinguage à chaud, par exemple, ne peut être effectué qu'en zinguerie.

«Lors du renouvellement du système de protection contre la corrosion, on tiendra compte des mesures relatives à la protection de l'environnement autant pour les travaux effectués en plein air que pour ceux effectués à l'intérieur.

Les mesures relatives à la protection de l'environnement consistent notamment en l'application des règles suivantes:

- éviter les émanations de poussière à la suite du décapage par projection, par exemple par «emballage» des constructions à décaper avec une feuille de matière synthétique;*
- collecte du matériau de décapage pollué. Il existe en effet un risque d'empoisonnement pour les animaux en cas de dépôt de ce matériau ou de particules de matières de revêtement sur les champs d'herbe ou dans les cours d'eau (notamment les matières contenant des pigments toxiques à base de métaux lourds);*
- les liquides pollués et les résidus issus du décapage chimique ne doivent pas aboutir dans les cours d'eau, les canalisations ou dans le sol; ceci est également valable pour les eaux usées issues du nettoyage par jet d'eau à haute pression;*
- élimination appropriée des déchets et des eaux résiduaires.*

Il est recommandé de prendre contact avec les autorités responsables dès l'établissement du projet en vue de l'établissement d'une soumission conforme.»

Quand nous parlons de pigments toxiques des métaux lourds, nous pensons surtout au plomb qui se trouve dans le minium de plomb. Malgré les prescriptions, on ne peut éviter, pour certaines protections anticorrosion, l'utilisation de minium de plomb ou d'autres dérivés du plomb. Les ouvrages bâtis entre 1955 et 1960 ont pour la plupart reçu une couche de base de minium de plomb. Il est impossible de décapier par projection les structures métalliques, traitées au minium, de bâtiments largement

fréquentés par le public comme c'est le cas pour les gares de Lausanne, d'Olten ou de Zurich: même les meilleures mesures de protection ne garantiraient pas la diffusion de poussières. En l'état actuel des techniques de protection anticorrosion, on ne peut envisager, dans ces cas-là, que la réfection sur une base de minium de plomb ou de silicochromate de plomb.

Là où il est possible de décapier par projection les revêtements qui contiennent des métaux lourds, la zone de travail doit être enveloppée de manière à ne laisser passer qu'un minimum de poussières. On veillera à ce que les échafaudages soient étanches et entourés de feuilles plastifiées. On cessera les travaux en cas de vents violents. Les ouvriers doivent disposer d'appareils de protection qui assurent également une arrivée d'air frais. Les poussières doivent être récoltées et traitées comme il se doit.

Pour d'autres indications sur le renouvellement des protections des surfaces, veuillez vous référer au document [5.6].

6. Construction en bois

6.1	Généralités	121
-----	-------------	-----

6.2	Mécanismes de vieillissement et de dégradation	122
6.2.1	Généralités	122
6.2.2	Effets dus à l'eau	122
6.2.3	Attaques par les champignons destructeurs du bois	124

6.3	Eléments constructifs	125
-----	-----------------------	-----

6.4	Les mesures de protection et leurs effets	129
6.4.1	Conception de la construction	129
6.4.2	Réalisation des détails de constructifs	129
6.4.3	Façonnage	131
6.4.4	Protection des surfaces	131
6.4.5	Protection chimique	132

6.5	Surveillance, entretien et rénovation	134
-----	---------------------------------------	-----

6. Construction en bois

6.1 Généralités

Il y a fort longtemps que l'on utilise le bois comme matériau de construction. Le bois se distingue par sa rapidité à se dégrader s'il est utilisé mal à propos. Cela explique qu'on le considère parfois comme un matériau peu durable; or de nombreux ouvrages séculaires démontrent qu'il n'en est rien (fig. 6.1). La bois, autant (voire plus) que n'importe quel matériau, exige que les structures porteuses soient pensées et élaborées avec grand soin.

Le fait que le bois «réagisse» rapidement par un «feedback» très net en cas de mauvaise utilisation, a incité les bâtisseurs, il y a déjà des siècles, à développer des techniques de préservation très performantes dont la tradition s'était partiellement perdue. Aujourd'hui, les différentes possibilités de préservation du bois sont mises en place avec succès. En outre, nous avons sur nos prédécesseurs l'avantage de disposer de nouveaux matériaux de première qualité tels que profils d'étanchéité, matériaux d'étanchéité, enduits, produits d'imprégnation, films de protection, bois exotiques particulièrement résistants, aciers inoxydables ou traités.

Les mesures et systèmes de protection que l'on utilise actuellement dans la construction en bois permettent de parler d'une «préservation intégrale du bois» puisqu'ils permettent d'optimiser la longévité des éléments constructifs. La longévité se définit comme suit: c'est l'assurance d'une aptitude fonctionnelle durable sous condition d'un entretien raisonnable. Ce qui sous-entend que l'entretien fait partie intégrante de la construction. Quoique la surveillance et l'entretien ne constituent pas, à proprement parler, des mesures de préservation, elles n'en sont pas éloignées.

La longévité d'un ouvrage implique, nous l'avons vu, les mesures de préservation, la surveillance, l'entretien et même la rénovation; toutes ces activités exigent d'être programmées. C'est ainsi, par exemple, qu'il s'agit de s'assurer de l'accessibilité de tous les éléments constructifs si l'on veut être en mesure de les surveiller, les entretenir ou les rénover.



Figure 6.1: Le pont de la Chapelle à Lucerne, édifié en 1333 [7.2]



Figure 6.2: Ouvrage de génie civil récent. La protection du bois a été soigneusement pensée. Pont de Wimmis, Berne

6.2 Mécanismes de vieillissement et de dégradation

6.2.1 Généralités

On trouve dans le paragraphe 2.3 les données de base concernant les mécanismes de vieillissement et de dégradation et leurs effets sur tous les matériaux.

Les influences mécaniques, climatiques et chimiques sont, en principe, de moindre importance. Néanmoins, mieux un ouvrage est conçu, mieux il résistera aux influences climatiques.

Le bois résiste assez bien aux agressions chimiques, c'est pourquoi on l'apprécie beaucoup pour des ouvrages dans lesquels l'atmosphère est corrosive et peut poser des problèmes à d'autres matériaux. En revanche, dans ces conditions, les pièces d'assemblage métalliques peuvent être victimes de la corrosion. Précisons ici que l'imprégnation du bois peut accélérer la vitesse de corrosion de l'acier. En outre:

- l'humidité exerce un rôle prépondérant dans le processus de corrosion;
- la présence de divers métaux dans le bois augmente le potentiel de risque;
- les sels utilisés comme composants de protection antifeu, les fongicides, le sel marin, etc., sont des agents corrosifs;
- une atmosphère qui contient des chlorures contribue à la corrosion transcrystalline des fissures de contrainte des aciers «inoxydables».

D'autres indications détaillées figurent dans les documents [6.1 à 6.3].

En ce qui concerne les influences biologiques, les insectes ne constituent, dans notre pays, qu'un risque modéré pour le bois.

En revanche, les champignons destructeurs du bois représentent un risque bien plus important, même s'ils n'apparaissent que dans des conditions bien déterminées comme on le verra dans les paragraphes 6.2.2 et 6.2.3.

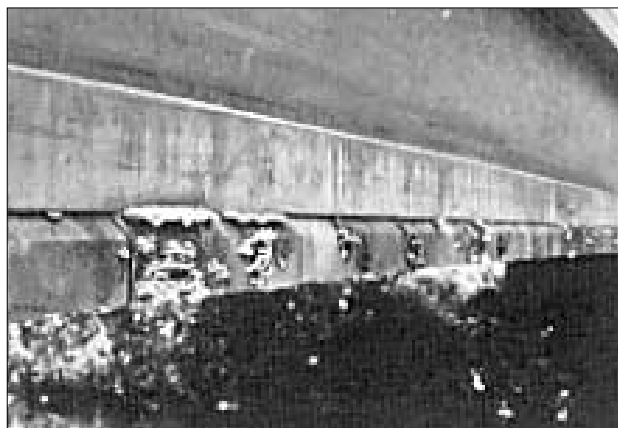


Figure 6.3: Invasion de champignons sur les structures d'un pont dans la conception duquel on a négligé le concept de protection

6.2.2 Effets dus à l'eau

Contrairement à l'idée reçue largement propagée, l'eau n'exerce aucun effet dégradant direct sur le bois. Par contre, il n'y a aucune propriété du bois qui ne soit influencée par l'eau et donc par l'humidité. Cette influence est nettement marquée dans le domaine de l'humidité hygroscopique, c.à.d. entre le bois absolument sec qui présente une humidité de 0% (rapport entre la masse d'eau dans le bois et la masse du bois absolument privé d'eau) et la saturation des fibres qui présente une humidité qui, selon les essences, varie entre 27% et 35% (fig. 6.4). Le domaine hygroscopique modifie considérablement toutes les propriétés mécaniques et physiques du bois. Au-dessus du seuil de saturation des fibres, c.à.d. dans la zone où l'humidité excédentaire est stockée sous forme d'eau dans les cavités cellulaires, les propriétés du bois ne se modifient que modérément. La principale caractéristique de cette zone, c'est que le bois peut se voir détruit par des champignons, ce qui est impossible au-dessous du seuil de saturation des fibres. C'est pourquoi de nombreuses mesures constructives visent à empêcher que le bois reste trop longtemps humide ou mouillé. Là, tout dépend de l'emplacement de l'ouvrage (cf. tableau 6.1).

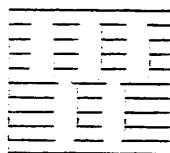
Les éléments constructifs en bois procèdent à d'importants échanges dynamiques avec l'environnement, tout particulièrement à des échanges d'humidité au niveau hygroscopique. L'humidité et

Il existe, en gros, cinq zones d'humidité que l'on peut décrire schématiquement comme suit:

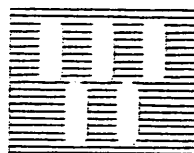
Etat sec. Pas d'eau, ni dans les parois ni dans les cavités cellulaires. Le taux d'humidité est de 0%. (Cet état n'existe pratiquement jamais dans le bois présent dans une construction, mais c'est une importante donnée technique).



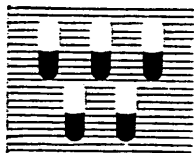
Présence d'eau sur les parois des cellules, mais les fibres ne sont pas saturées. Pas d'eau dans les pores. Il se produit une dilatation. Le taux d'humidité se situe entre 0% et 30%. (Cet état est le plus important en matière de construction)!



Les fibres sont saturées. Pas d'eau dans les pores. Au-dessus de ce seuil, le bois ne travaille pratiquement plus. Selon les essences, le taux d'humidité varie entre 24 et 36%.



Les fibres sont saturées. Les pores se remplissent temporairement d'eau. Le taux d'humidité est supérieur à 30%. C'est l'état du bois fraîchement coupé.



Saturation par l'eau. Les fibres sont saturées. Les pores sont entièrement remplis. L'eau est apparue après la construction; le taux peut atteindre jusqu'à 700%. (Cet état apparaît après une très longue immersion du bois).

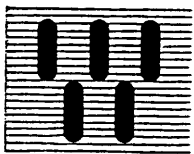


Figure 6.4: Zones d'humidité

la température de l'air ambiant se modifie constamment; le bois suit ces variations en ce sens qu'il règle son humidité sur les conditions extérieures (équilibre de l'humidité du bois, fig. 6.5). L'équilibre parfait ne peut s'obtenir qu'en laboratoire où l'on maintient des conditions artificielles. Dans les conditions réelles, l'humidité de l'environnement change sans cesse, et l'humidité du bois varie très fortement en fonction de l'emplacement et des conditions locales (même à l'intérieur d'un bâtiment). L'environnement de la construction revêt donc une importance cruciale pour les variations d'humidité du bois (voir tableau 6.1).

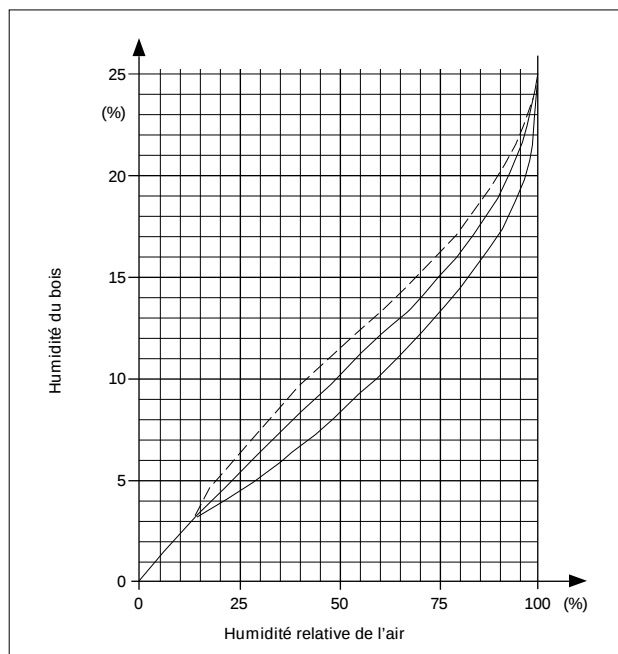


Figure 6.5: Equilibre hygroscopique du bois pour des températures allant de 0 °C à 20 °C

Le bilan d'humidité dont il est ici question ne comprend pas uniquement la zone hygroscopique, mais aussi les taux d'humidité qui dépassent celui de la saturation des fibres.

Dans la construction telle que nous la pratiquons, rares sont les éléments qui se trouvent directement exposés aux influences des eaux de pluie ou de ruissellement; il n'existe donc pratiquement aucun risque de taux d'humidité supérieur à celui de la saturation des fibres. L'eau parvient aux parties exposées sous forme de gouttelettes lors des précipitations, par condensation (refroidissement de l'environnement) ou par amenée d'eau d'éléments de construction voisins (p. ex. bois en contact avec les murs suintants ou avec le sol).

Le taux d'humidité du bois ne dépend pas seulement de l'humidité extérieure, mais aussi du séchage du bois. La rapidité de séchage constitue un élément majeur en matière de protection du bois.

Si le bois reste humide trop longtemps, il y a risque d'invasion de champignons. Ce danger se repère aux symptômes suivants:

- assombrissement des surfaces (invasion de moisissures gris foncé sur de vastes surfaces);
- coloration corrodée des éléments de liaison;
- croissance de mousses, de lichens, d'algues (fig. 6.6);
- croissance d'herbes et autres végétaux (généralement favorisée par l'accumulation de saletés);
- dilatation du bois;
- surfaces molles;
- suintements lors d'éraflures effectuées avec des objets tranchants.

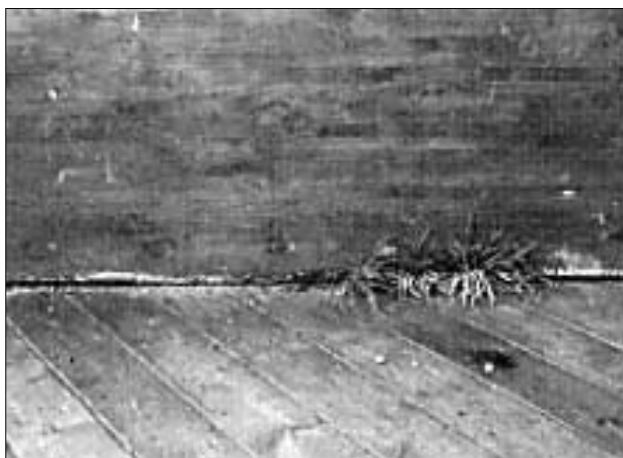


Figure 6.6: La croissance de végétaux constitue généralement un indice d'accumulation de saleté et d'humidité. Les champignons ne sont pas loin

6.2.3 Attaques par les champignons destructeurs du bois

L'un des objectifs les plus importants des mesures de protection du bois, c'est de le protéger contre les champignons.

Quand les champignons détruisent le bois, ils lui font perdre sa masse et sa résistance. Plusieurs formes de champignons sont en mesure de détruire le bois: ce sont la pourriture brune, la pourriture blanche et la pourriture molle. Il ne faut pas les

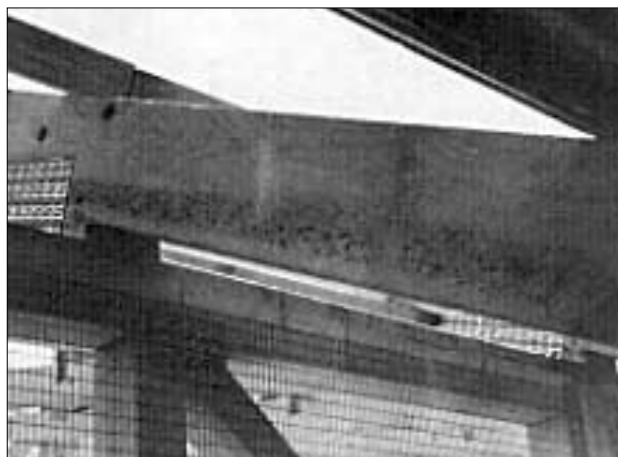


Figure 6.7: Des moisissures de surface ou dans le bois (bleuissement n'indiquent pas forcément que le bois va se détériorer)

confondre avec les champignons qui colorent le bois, p. ex. les moisissures qui ne font que le bleuir, n'entraînant qu'une fâcheuse modification esthétique (fig. 6.7).

Comme nous l'avons vu, les champignons ne peuvent croître que s'ils sont favorisés par un taux d'humidité qui dépasse celui de la saturation des fibres. Une invasion ne peut donc apparaître qu'à la suite d'une très longue phase humide qui se compte en semaines. Si le bois est saturé d'eau (il faut pour cela que les éléments constructifs soient en contact constant avec l'eau), les champignons ne peuvent se développer; c'est la raison pour laquelle les piliers immergés sont d'une longévité remarquable. Les températures élevées accélèrent la croissance des champignons: les conditions idéales se situent entre 15°C et 35°C. Les températures inférieures à 0° ne détruisent pas les champignons, mais ne font qu'interrompre leur croissance.

La surveillance (comprise ici comme une mesure de protection complémentaire) consiste d'une part à repérer les endroits où le taux d'humidité est élevé – et où il existe donc un risque de voir apparaître des champignons –, et d'autre part à repérer les zones où des champignons auraient déjà crû. On peut mesurer localement l'humidité du bois à l'aide d'un appareil de mesure de la résistance électrique (humidimètre). L'application est très simple (fig. 6.8).



Figure 6.8: Hygromètre, humidimètre

Un taux d'humidité de 22% constitue déjà un risque très élevé de voir apparaître des champignons; en effet, il est rare que l'on tombe pile sur l'endroit le plus humide. Comme les zones à taux d'humidité élevé ne sont généralement que peu étendues, il est important de les localiser précisément. On utilisera de préférence des appareils à longs électrodes, de sorte à mesurer l'humidité en profondeur.

Lorsqu'il y a invasion de champignons, on peut souvent repérer des fructifications à la surface du bois. Les débuts d'une invasion mycosique sont très difficiles à repérer; c'est avec de l'expérience que l'on y parvient. La croissance débute presque toujours à l'intérieur des éléments tandis que la surface est encore parfaitement intacte. Outre les indices mentionnés dans la section 6.2.2, et qui concernent l'humidité du bois, il existe encore d'autres symptômes qui trahissent une invasion de champignons:

- léger retrait de la surface (réduction de volume);
- odeur caractéristique;
- son sourd et creux lorsqu'on frappe avec un marteau.

On teste l'état du bois de la manière suivante:

- donner un coup de hache et examiner la fente ainsi créée;
- piquer à l'aide d'une aiguille (le bois pourri n'exerce qu'une faible résistance);

- forer un trou, tester la résistance au forage, examiner la matière extraite;
- carotter, tester la résistance au carottage, examiner la matière extraite.

Il existe d'autres méthodes qui requièrent un appareillage sophistiqué et des connaissances techniques particulières.

En effectuant ces contrôles, on prendra garde à ne pas offrir à l'eau de nouvelles occasions de s'infiltrer dans le bois (les forages doivent se faire depuis dessous). On colmatara les trous, de préférence avec un goujon imprégné. Les sections enterrées des poteaux doivent, elles aussi, être examinées avec soin; pour ce faire, un dégagera le sol sur une profondeur de 20 – 40 cm.

6.3 Éléments constructifs

Les conditions d'humidité favorables à la croissance des champignons dépendent essentiellement de l'essence de l'élément constructif, de ses dimensions, de son emplacement et de son exposition (fig. 6.9). Les normes et les directives donnent quantité d'indications sur les incidences auxquelles sont soumis toutes sortes d'éléments [6.2 et 6.3]. Dans les travaux publics et en génie civil, il s'agit avant tout des classes 2-5:

- 2: Éléments extérieurs situés sous la toiture, resp. protégés des précipitations
- 3: Éléments extérieurs exposés aux précipitations
- 4: Éléments situés au sol ou à proximité du sol
- 5: Éléments immergés.

Le tableau 6.1 donne des indications plus détaillées à ce sujet.

Dans les considérations qui nous intéressent, on peut envisager les éléments sous deux points de vue différents. Le premier concerne les influences climatiques auxquelles les différents éléments sont soumis: les éléments situés sous la toiture ne sont que peu soumis aux conditions atmosphériques extérieures et se dégraderont donc beaucoup moins rapidement que ceux qui sont directement exposés aux intempéries et subissent les effets complexes de toutes sortes de sollicitations [6.6 et 6.7].

L'autre point de vue, c'est l'altérabilité des divers éléments en fonction des conditions climatiques. L'altérabilité varie considérablement d'un élément à un autre, que l'on emploie des essences durables ou du bois imprégné, et cela indépendamment des mesures de protection. Les éléments de faible volume et disposés verticalement s'altèrent moins rapidement s'ils sont montés de sorte à faciliter leurs mouvements successifs de retrait et de dilatation (fig. 6.10). Ces éléments ont peu tendance à se fissurer, ne créent aucune contrainte hyperstatique et sèchent rapidement puisque l'eau peut s'écouler et s'évaporer facilement. En revanche, les éléments massifs disposés à l'horizontale présentent rapidement, sur leur face supérieure, des fissures qui recueillent les eaux de pluie, d'où stagnation et finalement pénétration de l'humidité.

Lors du préséchage et de l'homogénéisation, le bois découpé en lames est moins prédisposé à la formation de fissures que ne l'est le bois massif. Toutefois, les gros éléments en lamellé-collé sont sujets à la fissuration et présentent des taux d'humidité déséquilibrés, sans compter qu'il existe toujours un risque de délamination par décollage des joints, surtout quand le collage n'a pas été soigné (fig. 6.11). La pré-imprégnation protectrice des lames exige un collage de haute qualité [6.6].

Dans une construction en bois, les éléments les plus sensibles à l'humidité sont les liaisons, et cela non seulement à cause de la corrosion, mais aussi et surtout à cause des «situations géométriques» (trous, surfaces coupées non protégées, etc.) dans lesquelles l'eau peut pénétrer et stagner (fig. 6.12 et 6.13).

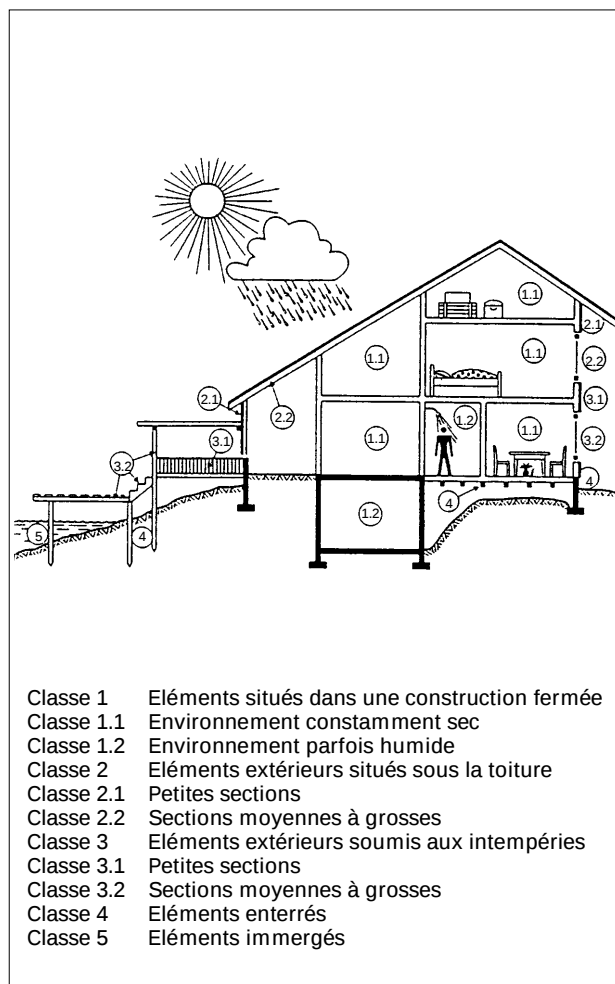


Figure 6.9: Classes de sollicitation des éléments en bois

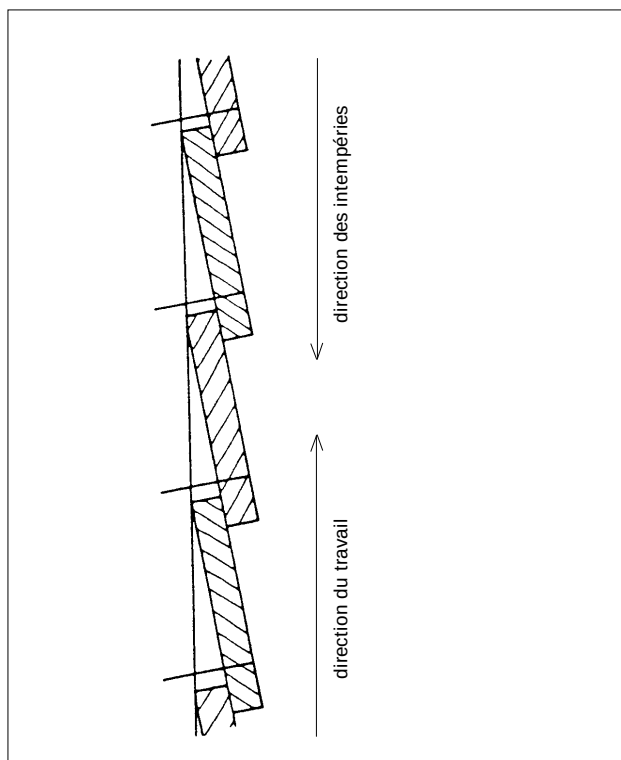


Figure 6.10: Disposition extérieure permettant le libre mouvement de retrait et de dilatation, ainsi que le bon écoulement des eaux



Figure 6.11: Le lamellé-collé se délamine s'il est soumis à de fortes intempéries et que son collage n'a pas été soigné

Classe	Sollicitation	Humidité moyenne du bois (%) *	Utilisation classique en génie civil	Risques	Mesures de protection possibles
2	Eléments protégés des effets directs des précipitations		Eléments de ponts couvert ou bien protégés	Fissures de retrait, délamination du lamé-collé, pas de risque de pourriture	Eventuel. protection des surfaces
a)	Section jusqu'à 1 cm	15 ± 5			
b)	Section moyennes à grosses	14 ± 2			
3	Eléments soumis directement aux précipitations		Eléments de ponts non protégés		
a)	Localement possible	jusqu'à 25			
b)	Petites sections	16 ± 7	Couvertures de toits	Décomposition, dégradation, fissuration. Léger risque de pourriture en cas d'infiltration d'eau	Concept de protection global (cf. 6.4)
c)	Sections moyennes à grosses		Eléments porteurs	Décomposition, fissuration, risque de pourriture	Concept de protection global (cf. 6.4)
	Zone superficielle	16 ± 7			
	Intérieur	17 ± 3			
4	Eléments enterrés ou à proximité du sol	> 25	Aménagement du paysage Traverses Pieds de poteaux Appuis de ponts	Pourriture	Choix du bois, imprégnation sous pression
5	Eléments immergés		Installations portuaires Aménagement du paysage Pieux	Pourriture si immersion partielle	Eventuel. choix du bois, imprégnation sous pression

Tableau 6.1: Classification des éléments, sollicitations et mesures de protection

*(valeur moyenne, tolérance)

6.4 Les mesures de protection et leurs effets

La construction en bois dispose maintenant de toutes sortes de mesures de protection, tant traditionnelles que nouvelles, qui permettent d'assurer une excellente longévité aux ouvrages. Ce sont, en gros:

- la conception;
- la réalisation des détails constructifs;
- le façonnage;
- la protection des surfaces;
- la protection chimique, la protection en profondeur, l'imprégnation sous pression.

On appelle protection intégrale du bois l'utilisation combinée de toutes ces mesures.



Figure 6.12: La conception globale constitue le premier pas vers une optimisation du concept de protection. Les constructions ouvertes et non couvertes impliquent une foule de détails «déliés» – en particulier les points d'articulation – dont la protection s'avère difficile à assurer

6.4.1 Conception de la construction

Une conception appropriée de la construction permet de limiter, voire d'éviter totalement des sollicitations excessives comme les précipitations, le rayonnement solaire ou l'humidité du sol. Cette démarche exige que l'on tienne compte de toutes les influences environnantes, y compris des conditions climatiques locales, au moment du projet déjà. Ces mesures conceptuelles visent à soustraire le bois aux effets de l'humidité et des intempéries; on peut, à cet effet, opter pour un site optimal, pour la pose de piliers en béton, ou encore pour une couverture partielle ou totale de l'ouvrage.

6.4.2 Réalisation des détails constructifs

On sait par expérience qu'une conception intelligente est un gage de longévité tant de l'ouvrage que des éléments qui le composent. Si l'on protège le bois, c'est:

- pour tenir l'eau à bonne distance du bois et éviter qu'elle pénètre dans la construction;
- pour évacuer le plus rapidement possible l'eau qui aurait pu s'introduire; les points critiques sont le niveau du sol, les zones d'aspersion, les fissures de joints – notamment sur les surfaces horizontales –, les bois de bout et les surfaces de contact (phénomène de capillarité) (fig. 6.13).

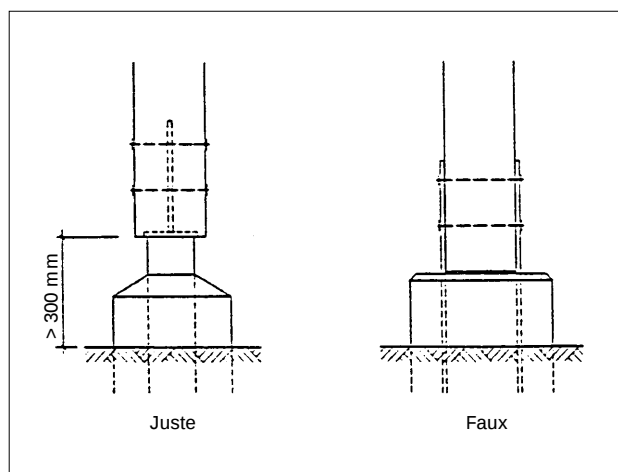


Figure 6.13: Une bonne conception des supports de colonnes peut éviter aux poteaux d'être excessivement soumis aux effets des eaux de pluie

Les mesures de détail comprennent, entre autres:

- toutes les mesures de drainage (fig. 6.14 et 6.15);
- la couverture des surfaces exposées;
- la pose de «barrières anti-humidité» (p. ex. films) destinées à empêcher le transport d'humidité;
- la suppression des détails «scabreux» (p. ex. points d'articulation) non protégés (fig. 6.16);
- les mesures qui empêchent les saletés de s'amasser et de créer des nids d'humidité;
- une conception de l'ouvrage qui permette de contrôler et d'entretenir aisément tous les éléments;
- une conception de l'ouvrage qui assure sa longévité et permette le remplacement des éléments défectueux.

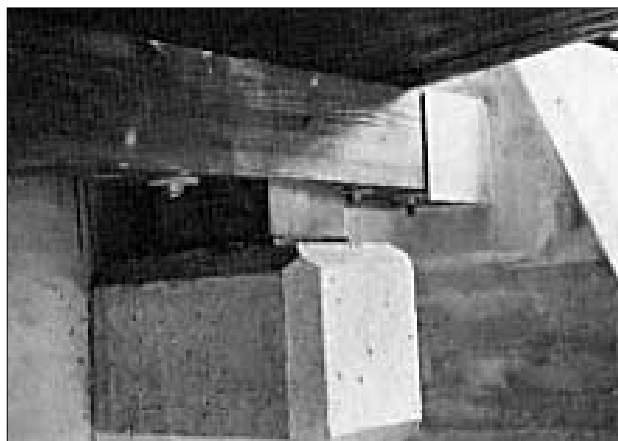


Figure 6.15: Voir légende de la figure 6.15

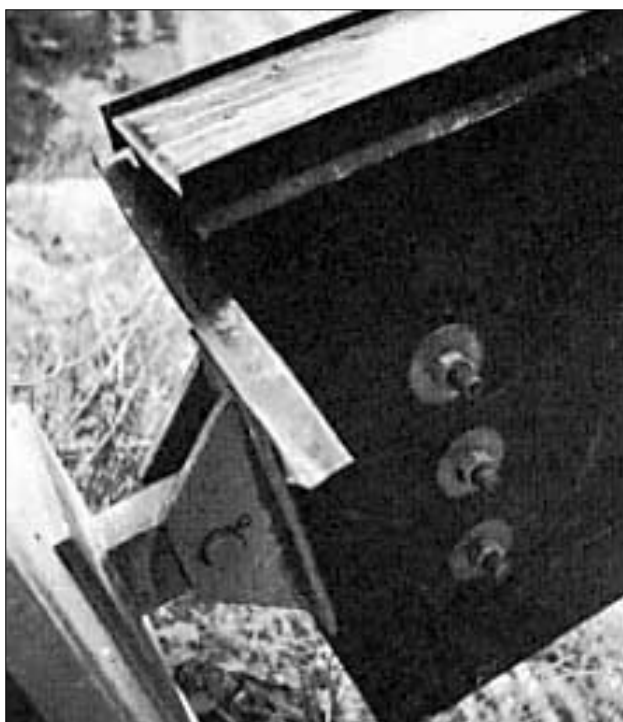


Figure 6.14: Une bonne conception des supports permet de tenir au sec les éléments délicats, de sorte que la menace de champignons ne soit pas plus élevée que pour les autres éléments

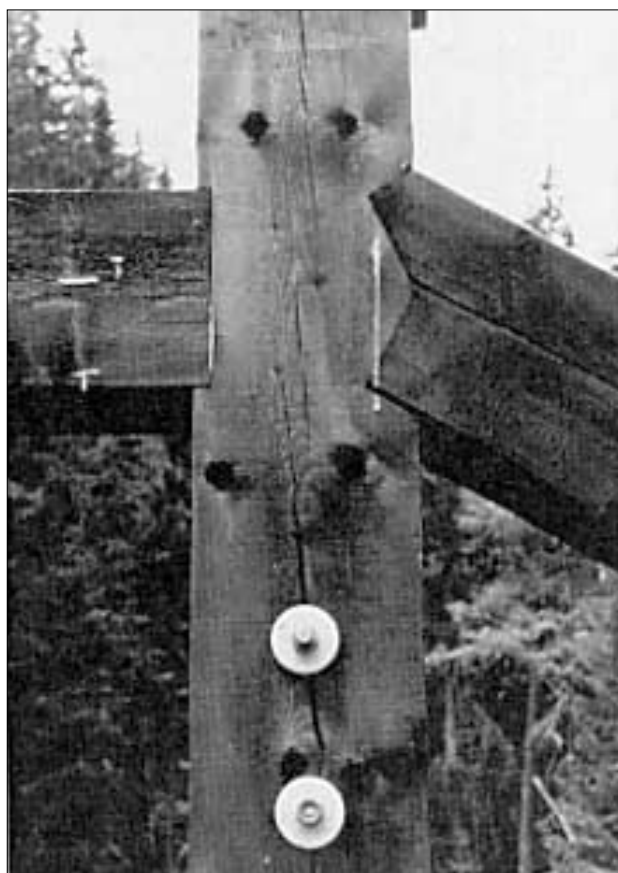


Figure 6.16: Élément de construction exagérément exposé aux intempéries. Les eaux de pluie profitent de la capillarité pour pénétrer et stagner

6.4.3 Façonnage

Parmi les principes de façonnage, relevons:

- l'utilisation d'essences résistantes destinées aux éléments particulièrement exposés; on utilise là du bois de cœur de chêne, du châtaignier, du mélèze, du robinier (faux acacia);
- l'utilisation de bois sain (sans trace de champignons, d'insectes, etc.);
- l'utilisation de bois peu porté à se fissurer, de bois sans veines ou aux veines peu marquées (fig. 6.17), à sections fines, bois pré-séché, lames, etc.;
- l'utilisation de bois imprégné (cf. paragraphe 6.4.5).

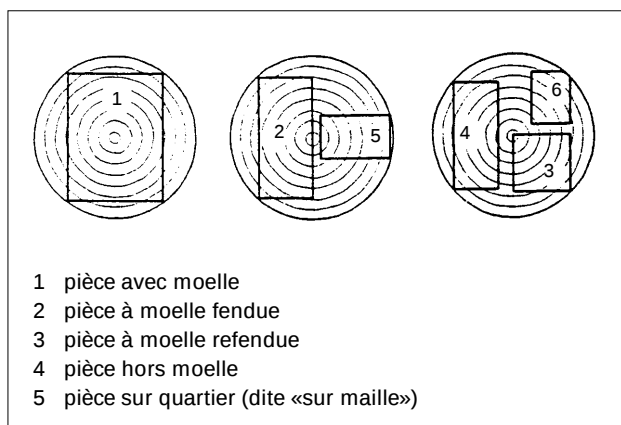


Figure 6.17: Modes de débit pour les bois équarris et les lattes

6.4.4 Protection des surfaces

Les traitements de surface ont trois buts:

- coloration;
- protection des surfaces contre les intempéries;
- réduction de l'absorption et de la diffusion d'humidité.

Ce dernier but ne devrait pas être subordonné à l'effet esthétique (coloration). Car plus un élément est exposé à l'altération, plus il doit être stable (p. ex. près des liaisons). Les traitements de surface jouent un rôle extrêmement important de régulation de l'humidité même dans les zones qui ne sont pas exposées aux intempéries, p. ex. pour les poutres transversales qui courent sous le tablier d'un pont.

Plus un traitement de surface est épais, plus ses capacités protectrices seront élevées – en particulier l'effet de blocage de la diffusion –, mais plus aussi il réclamera de moyens lors du renouvellement. Si l'on veut obtenir une réduction correcte de l'effet vapeur, la couche protectrice doit avoir une épaisseur minimale de 0,05 mm. En Suisse, on utilise volontiers un dispositif de glacis; il s'agit d'une couche épaisse de résine glycérophthalique qui laisse transparaître la structure du bois:

- application éventuelle d'une couche de fond antifongique et hydrofuge;

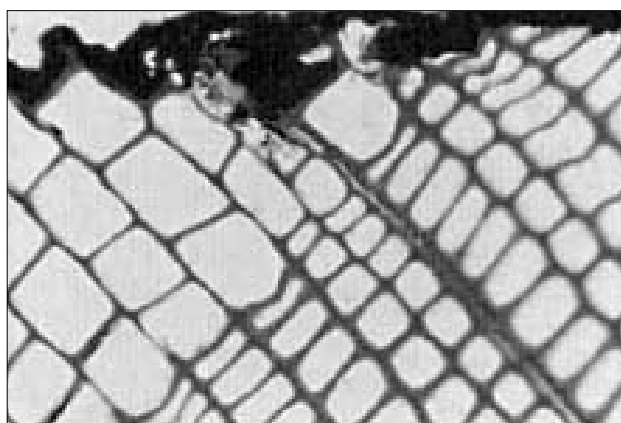


Figure 6.18: Vue microscopique: coupe d'une surface de bois imprégné. La couche d'imprégnation est aisément renouvelable mais elle n'exerce qu'un faible effet protecteur et sa longévité est limitée

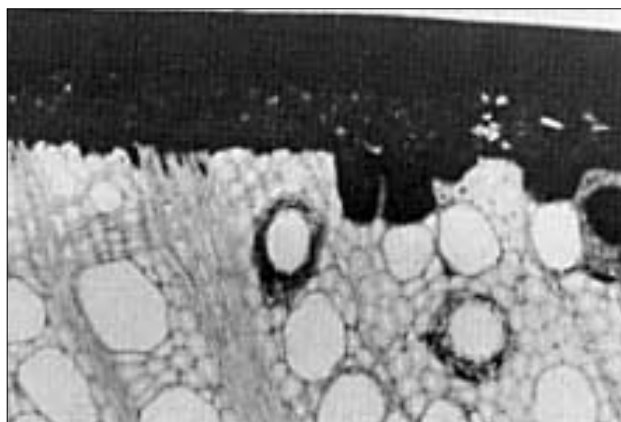


Figure 6.19: Vue microscopique: coupe d'une surface de bois bien protégée par une peinture couvrante pigmentée. Cette sorte de couche offre une longévité durable; toutefois, le renouvellement exige d'importants moyens

- couche intermédiaire très pigmentée (protection UV);
- épaisse couche de surface qui, alliée aux précédentes, forme une pellicule nette.

Le lamellé-collé, qui présente, pour des raisons techniques de façonnage, une humidité assez réduite, doit recevoir une couche protectrice en atelier déjà; on évite de la sorte qu'il n'absorbe trop d'humidité pendant le transport, le stockage intermédiaire et le montage (fig. 6.20).

La longévité des traitements de protection de surface dépend surtout de l'épaisseur de la couche et de l'intensité de la sollicitation. Alors qu'une peinture couvrante pigmentée peut résister pendant plusieurs décennies (fig. 6.19), une couche d'imprégnation (fig. 6.18) soumise aux mêmes sollicitations ne durera que de 2 à 10 ans selon son exposition.

Vous trouverez des indications détaillées sur les produits et leur utilisation dans le document [6.5]. Plus que tous les autres systèmes de protection, le traitement préservatif du bois exige un entretien spécialisé et un renouvellement réguliers.

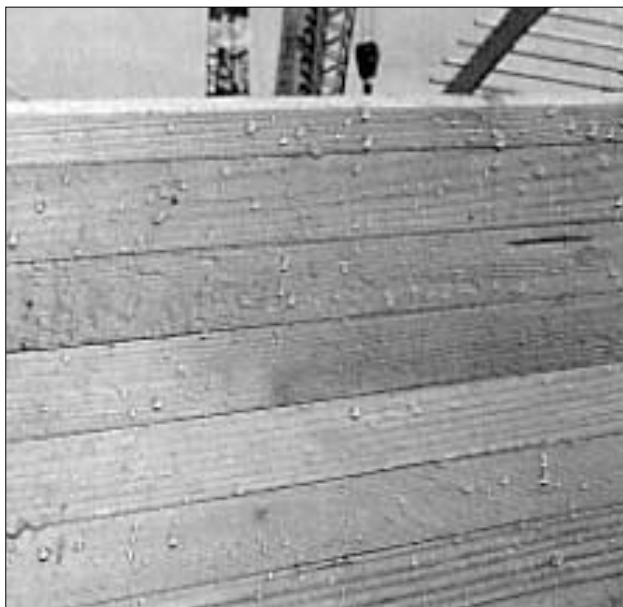


Figure 6.20: Poutres en lamellé-collé protégée contre l'absorption d'humidité par une couche d'imprégnation hydrofuge

6.4.5 Protection chimique

Même si l'on exploite parfaitement toutes les possibilités de façonner et de protéger le bois, les ouvrages de génie civil en bois n'ont qu'une durée de vie limitée. De plus, l'utilisation de bois résistants (chêne, châtaignier, noyer, bois tropicaux, etc.) pose des problèmes de coût ou de disponibilité. Dans ces conditions, on opte volontiers pour des essences courantes auxquelles on offre une protection chimique. La protection chimique du bois constitue un complément aux autres mesures de protection, et en aucun cas une alternative.

Si l'on veut que l'efficacité des traitements de protection chimique soit satisfaisante, il faut faire appel à des procédés industriels d'imprégnation sous pression (voir fig. 6.21). On utilisera de préférence des produits qui portent le label Lignum (fig. 6.22 et 6.23), [6.9].



Figure 6.21: Installation industrielle d'imprégnation du bois sous pression

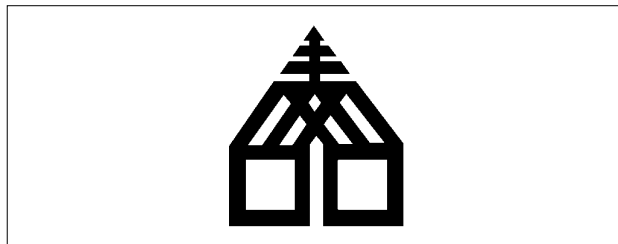


Figure 6.22: Label Lignum pour les produits de protection du bois

En Suisse, on utilise trois sortes de produits de protection pour l'imprégnation du bois:

- solutions salines aqueuses à base de liaisons CFK (chrome, fluor, cuivre) et CKB (chrome, cuivre, bore). Ces sels confèrent au bois une teinte verdâtre à moins que l'on ajoute encore des pigments qui donnent une teinte noirâtre. Voilà maintenant des décennies que ces sels servent à protéger efficacement les poteaux des PTT et des SI;
- l'huile de goudron de houille s'avère également très efficace; on s'en sert surtout pour protéger les traverses de chemin de fer. Si l'on renonce à l'employer plus largement, c'est pour des raisons d'hygiène et à cause de la forte odeur qu'elle dégage;
- on n'utilise les imprégnations oléagineuses que dans des cas bien particuliers où l'on mélange les substances actives à des liants.

Le choix de l'essence et de la coupe, le façonnage, le déroulement optimal de la fabrication, sont autant de données importantes pour la longévité des éléments imprégnés sous pression.

L'absorption du produit de protection varie selon les essences; dans tous les cas, l'aubier s'imprègne en principe plus facilement que le cœur. Les bois de cœur, en particulier, sont difficiles, ainsi que l'épicéa. Le sapin blanc, de porosité moyenne, se laisse assez bien imprégner. Les plus faciles à imprégner sont les bois de hêtre et l'aubier des bois de cœur. L'imprégnation est facilitée si l'élément comporte surtout de l'aubier, notamment de l'aubier de bois rond. Toutefois, le bois rond se fend facilement au séchage, et les fissures sont souvent plus profondes que l'imprégnation. On peut réduire les risques de fissure et améliorer l'imprégnation en pratiquant une rainure longitudinale jusqu'à proximité de la moelle.

Le traitement optimal consiste à n'imprégner les éléments qu'après qu'ils aient été totalement façonnés, coupes et trous compris. S'il y a façonnage ultérieur, les nouvelles coupes doivent être traitées, mais cela réduit la qualité de la protection.

La durée de l'efficacité des imprégnations dépend de leur qualité et des quantités d'eau que le bois devra affronter. Les imprégnations salines et goudronneuses peuvent résister jusqu'à plusieurs décennies.

Pour une manipulation sûre des produits d'imprégnation, il faut respecter le temps de fixation des sels dans le bois, temps pendant lequel il perdent une bonne part de leur toxicité. Les températures élevées accélèrent la fixation qui prend, selon les conditions de stockage, de 3 à 8 semaines. Après leur fixation, les sels ne peuvent quasiment plus partir par lavage.

Pour davantage d'indications sur l'imprégnation, veuillez vous référer au document [6.5].

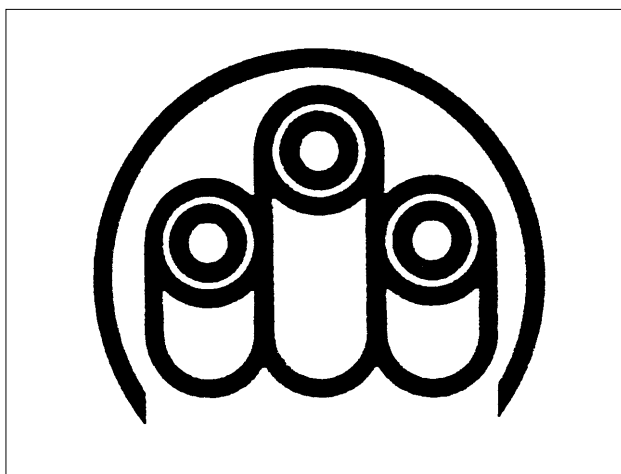


Figure 6.23: Label Lignum pour le bois imprégné sous pression

6.5 Surveillance, entretien et rénovation

La sécurité et une exploitation durable exigent une surveillance régulière et un entretien raisonnable. On concevra les ouvrages de sorte qu'ils exigent un entretien minimal et simple, autrement dit les mesures que réclame l'ouvrage pour atteindre une longévité satisfaisante. En outre, les pièces d'usure devraient être conçues pour pouvoir être remplacées sans grande complication.

Les principaux objets des travaux d'entretien et de renouvellement des ouvrages en bois sont:

- la pourriture;
- la corrosion d'éléments métalliques;
- la dégradation mécanique due à des influences naturelles (éboulements, érosion, pression de la terre, de la neige, gel, chute d'arbres, de pierres, etc.);
- l'influence humaine (utilisation, vandalisme);
- praticabilité réduite à cause de surfaces glissantes;
- dégradation de l'esthétique (p. ex. couches colorées écaillées).

Les travaux de surveillance et d'entretien doivent être soigneusement préparés et effectués. Si l'on veut assurer la continuité de l'entretien, il est important de disposer de toutes la documentation utile relative à l'ouvrage.

Le plan de surveillance doit mentionner ce qui doit être contrôlé, quand, où et comment. La fréquence des contrôles dépend des conditions locales: selon l'état et l'altérabilité de l'ouvrage, et selon l'intensité des sollicitations, les travaux de surveillance doivent avoir lieu tous les 2 à 5 ans.

Le plan de surveillance peut comporter les points suivants:

- endroits humides ou mouillés, comportant donc un risque d'apparition de champignons;
- présence de champignons;
- présence d'insecte;
- solidité des balustrades;
- dégradations externes (aussi dues à des sollicitations mécaniques);
- tendance aux vibrations;

- déformations / déplacements de toute la structure porteuse ou de certains de ses éléments;
- emplacements des organes de liaison;
- corrosion des pièces d'assemblage métalliques;
- pollutions, amas de déchets, de terre, de feuilles, etc.;
- adhésivité des surfaces praticables;
- traitements de surface des éléments en bois;
- modifications de l'affectation.

Il est important de repérer le plus tôt possible les endroits humides, mouillés, où des champignons peuvent apparaître ou sont déjà apparus, de sorte à éviter l'extension des dégâts.

Les paragraphes 6.2.2 et 6.2.3 expliquent comment repérer ces endroits.

Afin d'éviter que l'on omette quoi que ce soit, on se servira de check-lists, de tableaux, de procès-verbaux, de fiches, etc., tous moyens qui permettent un contrôle systématique de l'efficacité des mesures d'entretien.

Les petits travaux d'entretien relatifs à la protection du bois et à la longévité d'un ouvrage sont les suivants:

- nettoyage des amas de terre, de feuillages, etc. qui peuvent avoir des effets nuisibles (p. ex. passages glissants, augmentation de l'humidité à proximité des éléments en bois et des pièces d'assemblage métalliques);
- examen et éventuellement réfection des mesures d'étanchéité et de couverture;
- resserrage des éléments de liaison desserrés;
- amélioration des surfaces praticables, nivellement, renouvellement de la protection antiglis;
- renouvellement des mesures de protection anti-corrosion;
- remplacement de petits éléments défectueux;
- renouvellement des traitements de surface du bois;
- rectification des éléments déformés ou déplacés;
- nettoyage et réfection des canalisations.

En cas de menace ou d'apparition de champignons, on peut prendre les mesures suivantes:

- aux emplacements où le taux d'humidité est constamment élevé mais où l'on trouve peu de champignons:
 - empêcher l'eau de parvenir sur le site;

- créer des conditions favorables à un séchage rapide;
 - poser des cartouches de bore (protection chimique du bois).
- si l'on trouve beaucoup de champignons:
- remplacement des parties pourries, de préférence par du bois imprégné résistant aux champignons;
 - amélioration constructive du site.

Il peut arriver que l'on doive interdire l'accès à tout ou partie de l'ouvrage si des champignons apparaissent à un emplacement critique de la structure porteuse.

Toutes ces considérations donnent bien à comprendre que, dans le domaine des ouvrages en bois, la prévention joue un rôle majeur. Malgré tout, il peut arriver que l'on doive renouveler certaines parties du dispositif de protection.

La protection des surfaces est en principe renouvelable. Vous trouvez quelques indications à ce sujet dans le paragraphe 6.4.4. Il faut s'assurer que les nouveaux produits de protection sont compatibles avec les anciens. On ne peut pas renouveler la protection chimique par imprégnation par pression sur le site.

Enfin, on peut aussi tout simplement renforcer ou remplacer les éléments défectueux. Les dispositifs de protection constructifs comme les couvertures (toitures), les joints et les canalisations, sont remplaçables eux aussi.

7. Construction en pierre naturelle

7.1	Généralités	139
-----	-------------	-----

7.2	La construction et la maçonnerie en pierre naturelle	140
-----	--	-----

7.3	Mécanismes de vieillissement et de dégradation	146
-----	--	-----

7.4	Surveillance	149
-----	--------------	-----

7.5	Entretien et rénovation	150
-----	-------------------------	-----

7. Construction en pierre naturelle

7.1 Généralités

Parmi les anciens ouvrages en pierre naturelle qui ont subsisté jusqu' à aujourd'hui, certains sont plusieurs fois millénaires. Le pont de Zhaozhou, en Chine (fig. 7.1), a été bâti voilà près de 2600 ans, et il est encore praticable.

Le pont du Gard (fig. 7.2), près de Nîmes, dans le Midi de la France, a été construit entre 63 et 13 avant J.-C. Cet audacieux aqueduc romain d'une longueur de 275 m a donc plus de 2000 ans. Il a été en exploitation pendant plusieurs centaines d'années. Au siècle dernier, on a sérieusement envisagé de le remettre en état pour le réutiliser. L'aménagement du pont inférieur pour la circulation date du 18^e siècle.

La Suisse possède aussi des ponts remarquables et toutes sortes d'ouvrage de génie civil réalisés en pierre naturelle (fig. 7.3 et 7.4).

Leonhardt dit des anciens ponts en pierre: *«Leur valeur esthétique et culturelle est immense; ils méritent d'être respectés et entretenus. Les voûtes et les piliers ont traversé les millénaires pour autant que les constructeurs aient utilisé de la bonne pierre et*

de bonnes fondations. Les ponts en pierre naturelle sont beaux et durent longtemps. Malheureusement, leur coût est très élevé. Mais à long terme, ils pourraient bien être les moins chers s'ils sont bien conçus et parfaitement réalisés, puisqu'ils ne réclament pratiquement aucun entretien au cours des siècles, pour autant que l'air ne soit pas pollué» [7.3].

Avec l'apparition de la construction en béton, les structures porteuses en pierre naturelle se sont raréfiées. La pierre ne sert plus guère qu'à bâtir les murs d'habillage. Si cette tradition tend, elle aussi, à disparaître (dans le 3^e arrondissement des CFF, le dernier habillage en pierre a été réalisé en 1967/68), c'est que l'on calcule uniquement le prix de la construction sans tenir compte des frais ultérieurs d'entretien.

L'un des autres problèmes de la construction en pierre naturelle, c'est que les ouvriers spécialisés et expérimentés se font rares. Depuis quelques années cependant, les cantons alpins font bâtir des murs de soutènement en pierres brutes scellées par des joints de mortier de largeurs irrégulières. C'est peut-être un signe de reprise pour la pierre, puisque cette méthode permet d'en abaisser les coûts.



Figure 7.1: Le pont de Zhaozhou près de Zhaoxian dans la province de Hebei, Chine. Portée: 37,02 m. [7.1]



Figure 7.2: Le pont du Gard près de Nîmes. Aqueduc et pont routier [7.3]



Figure 7.3: Le pont piétonnier sur la Verzasca près de Lavertezzo, Tessin [7.3]



Figure 7.4: Le mur de soutènement de la place du Münster à Berne

7.2 La construction et la maçonnerie en pierre naturelle

La longévité des ouvrages en pierre naturelle dépend avant tout des propriétés de la pierre utilisée. Si l'on veut assurer une bonne durabilité des ouvrages, il faut donc bien connaître la pierre dont ils sont faits.

Les normes suisses ne donnent que peu d'indications sur les différentes sortes de pierres naturelles utilisées dans notre pays. Ainsi, la norme SIA 178, édition de 1980, ne contient-elle rien d'essentiel sur les minéraux eux-mêmes ni sur leur rôle dans la construction.

Certes, cette norme se préoccupe surtout de la conception et de la réalisation des nouveaux ouvrages, bien que l'on en construise de moins en moins. En revanche, elle ne traite pas de ce vaste sujet qu'est l'entretien des innombrables édifices en pierre naturelle existants. Cette lacune mériterait être comblée dans un proche avenir.

Quand on parle de longévité, on précise toujours qu'il faut utiliser des pierres résistant aux intempéries et un mortier résistant au gel et si possible étanche; cette dernière recommandation n'est pas toujours judicieuse.

Il faut parfois se référer à des ouvrages fort anciens, par exemple ceux de De Quervain [7.5 et 7.6].

Le document [7.7] donne de précieuses indications sur les agrégats à utiliser pour les joints au mortier et d'excellentes généralités sur la construction des ouvrages en pierre naturelle; ces recommandations sont encore valables de nos jours. Ces directives des CFF datent de 1924 et se basent sur les directives qui ont prévalu pour la construction de la ligne du Saint-Gothard. Ce fut, dans notre pays, l'âge d'or de la pierre naturelle.

Le tableau 7.1, tiré de [7.7], qui indique des données relatives aux agrégats à utiliser pour les joints au mortier, étaient certainement exhaustif pour ses auteurs. Pour nous, aujourd'hui, il y manque la chaux blanche et la chaux pouzzolane (mélange chaux-trass) qu'il est possible d'intégrer dans la construction en pierre naturelle. On trouve des données relatives à cet agrégat dans les documents [7.8 et 7.9].

Liants	Chaux hydrauliques		Ciments prompts (genre Grenoble)	Ciments Portland		Ciment de laitier		Ciments mixtes	
	Produits obtenus par cuisson en dessous de la limite de clinkérisation de marnes calcaires ou de calcaires siliceux, hydratation et mouture en poudre.			Produits obtenus par cuisson jusqu'à la limite de clinkérisation de mélanges artificiels dans des proportions données d'argile silicique et de matériaux calcaires, et mouture en poudre.		Produits obtenus industriellement à partir de chaux hydratée en poudre additionnée de laitier de haut-fourneau séché et réduit en fine poudre.		Produits obtenus par le mélange mécanique de différents liants ou d'un liant avec des substances utilement choisies. Ils ne font pas partie des liants définis et reconnus et ne peuvent être utilisés qu'en accord avec la direction des travaux, et lorsqu'un but particulier doit être atteint.	
Lors du durcissement, ils doivent être stables en volume et résistants au gel, à l'air libre comme dans l'eau	Utilisable en général		Produits obtenus par cuisson en dessous de la limite de clinkérisation de marnes calcaires ou de calcaires artificiels d'argiles et de matériaux calcaires appropriés, et mouture en poudre. Utilisables uniquement en accord avec la direction des travaux pour des opérations tels que étanchements, assèchement, modelages rapides, etc. <td colspan="2">Utilisable en général</td> <td colspan="2">Utilisables uniquement en accord avec la direction des travaux pour des interventions à progression lente dans l'eau ou en milieu humide.</td> <td colspan="2"></td>	Utilisable en général		Utilisables uniquement en accord avec la direction des travaux pour des interventions à progression lente dans l'eau ou en milieu humide.			
	Chaux hydr. légère	Chaux hydr. lourde							
Résistance d'un mortier normal de consistance terre humide à sa mise en place (1 part en poids de liant et 3 parts en poids de sable normal) et conservé dans l'eau jusqu'à l'essai à 28 jours, valeur minimum:	Trac-tion	Com - pression	Trac-tion	Com - pression	Trac-tion	Com - pression	Trac-tion	Com - pression	
	kg/cm ² 6	kg/cm ² 40	kg/cm ² 12	kg/cm ² 120	kg/cm ² 28	kg/cm ² 325	kg/cm ² 15	kg/cm ² 120	
Finesse de mouture Sur un tamis de 900 mailles au cm ² et un fil de 0,1 mm, le résidu ne doit pas être supérieur à:	15%		5%		2%		1%		
	kg/lit. —		kg/lit. —		kg/lit. 1.15		kg/lit. —		
Poids volumique à considérer, dans une condition de remplissage libre:	kg/lit. —		kg/lit. —		kg/lit. 1.15		kg/lit. —		

Tableau 7.1: Présentation synoptique des liants utilisés dans le passé [7.7]. Dans ce tableau ne figurent pas les chaux hydratée et pouzzolaniques, se référer pour cela à [7.8, 7.9] notamment. L'ancien système de mesure est encore utilisé (1 kg/cm² = 0,1 N/mm²)

Quelques années plus tard paraissaient les directives édictées par l'association suisse des maîtres-maçons en collaboration avec les CFF [7.9], qui donnent des indications relatives aux diverses sortes de maçonneries. Les illustrations 7.5 à 7.7 reproduisent certaines pages de cet ouvrage, qui peuvent être d'une précieuse aide pour l'évaluation d'ouvrages existants.

L'évaluation de ces ouvrages peut également être grandement facilitée par les indications du document [7.10]:

«L'utilisation et le façonnage de pierres naturelles en maçonnerie est déterminé par les diverses propriétés des matériaux, ainsi que par leur extraction et leur transport.

Les propriétés les plus importantes auxquelles il faut prêter la plus grande attention sont:

- La solidité (la résistance à la compression est généralement donnée en kg/cm²).
- La résistance aux intempéries, qui est essentielle pour la longévité d'un mur. Les éléments qui ne se trouvent pas sous toit et sont par conséquent exposés à l'humidité et au gel, ne doivent être réalisés qu'en pierre résistant aux intempéries. C'est la capacité d'absorption d'eau de la pierre qui constitue le point de repère le plus important en matière de résistance aux intempéries. Les pierres spongieuses souffrent du gel: l'eau qu'elles contiennent se dilate en gelant et les font éclater.
- La densité est le poids d'un volume d'un minéral en soi.
- Le poids spécifique, en revanche, est le poids du matériau parfaitement compact, sans pores ni cavités. Si la densité est très inférieure au poids spécifique, c'est un signe que la roche comporte beaucoup de cavités. On dit alors que la roche présente une faible compacité. Elle risque d'absorber beaucoup d'eau et n'est donc pas résistante aux intempéries (cf. tableau 7.2).

Pour pouvoir être façonnée correctement la pierre doit receler les qualités suivantes:

- On dit d'une roche qu'elle est litée lorsqu'elle se laisse mieux fendre dans un sens que dans un autre. Les roches pour lesquelles le sens de fente est indifférent, sont massives. En général, les pierres présentent une meilleure résistance à la compression sur la face qui est transversale à l'assise, et non sur la face parallèle.

On peut aisément former la pierre litée en la fendant; quant à la pierre massive, on la modèle au marteau; d'autres, plus difficiles, doivent être taillées. On peut égriser au rabot les pierres molles comme le grès. Selon leur destination, on peut également scier les pierres».

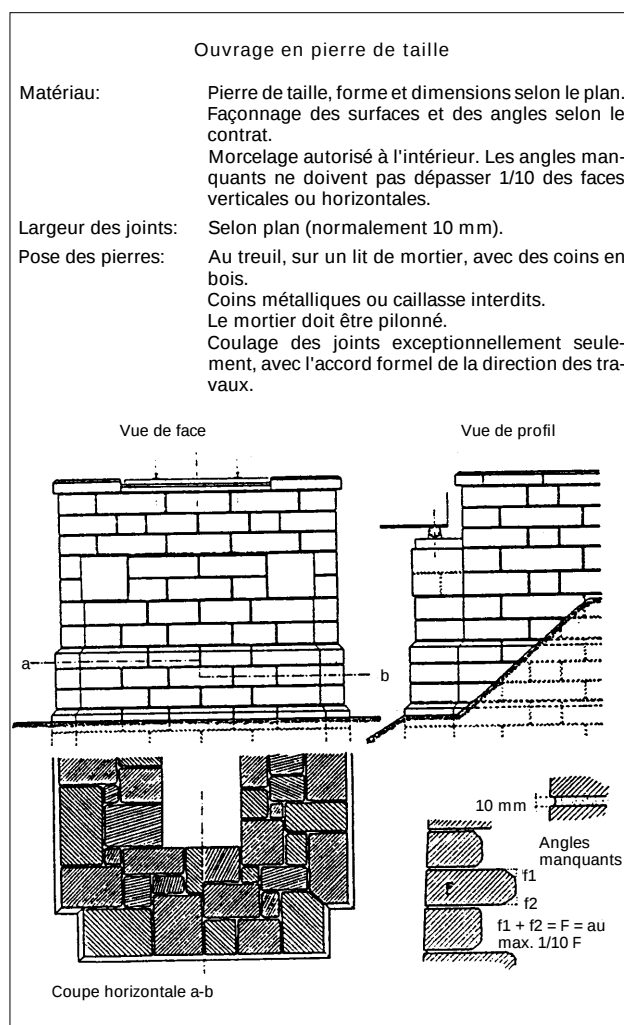


Figure 7.5: ouvrage en pierre de taille, selon [7.10]

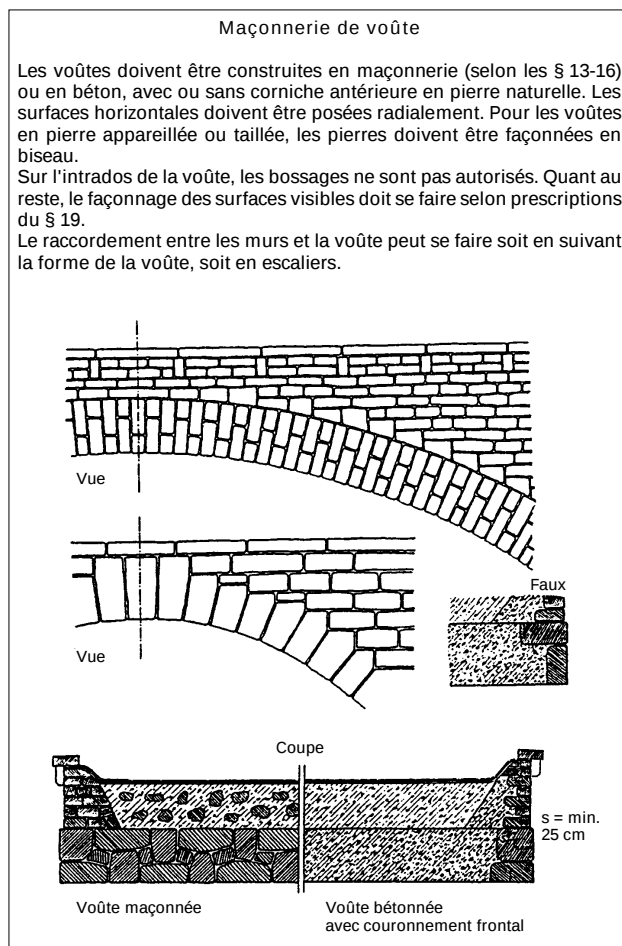


Figure 7.6: Maçonnerie de voûte, selon [7.10]

De nos jours, il est indispensable de compléter cette citation comme suit:

- On pensait qu'il ne fallait utiliser pratiquement que des pierres résistant aux intempéries; c'est inexact. Il n'y a danger de gel que pour les roches presque saturées d'eau, ce qui n'est le cas que pour les pierres qui se trouvent à la base de l'ouvrage.
- La notion de «densité» a été remplacée par celle de «densité apparente» (Norme SIA 381/1, 1980).
- Il est imprécis d'affirmer qu'une roche n'est pas résistante aux intempéries parce qu'elle est particulièrement spongieuse; il faut relativiser. Ainsi, par exemple, le tuf calcaire, malgré sa capacité d'absorption (volume des pores de 20% à 40%), constitue une excellente pierre pour certaines utilisations.

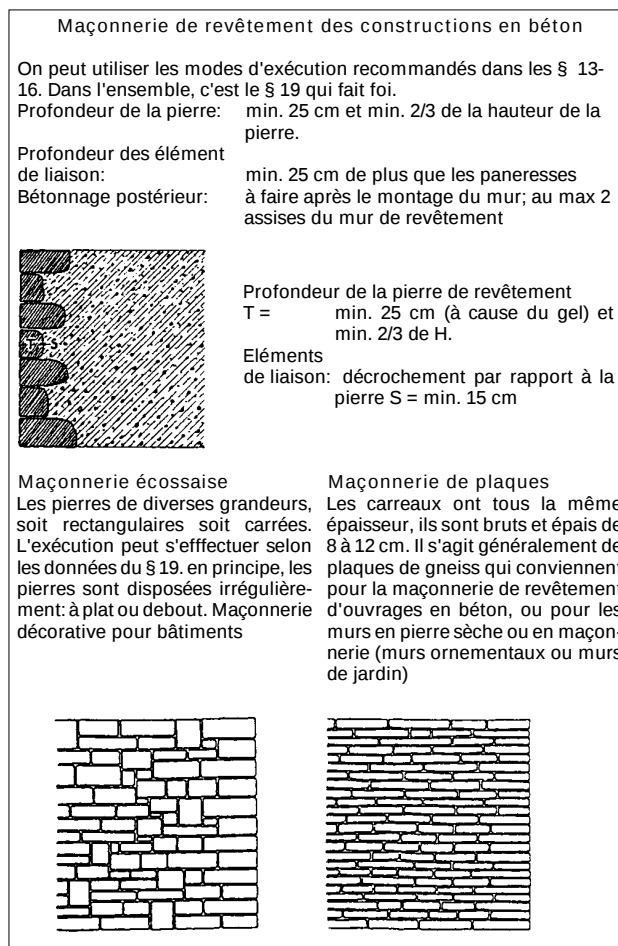


Figure 7.7: Maçonnerie de revêtement des constructions en béton, selon [7.10]

Le tableau 7.2 donne une idée des pierres naturelles qui étaient, à l'époque, les plus courantes en Suisse. Les données qui figurent dans ce tableau peuvent être d'une certaine utilité lors de l'évaluation d'anciens ouvrages. Naturellement, il ne s'agit pas de reprendre à la lettre les informations de cet ancien tableau.

Quand il s'agit aujourd'hui de procéder au remplacement de certaines pierres naturelles, il est normal de tenir compte de l'offre qui a cours actuellement. Malheureusement, on ne dispose d'aucun état exhaustif. On peut toutefois se référer à une thèse de doctorat [7.11], publiée en 1983, qui donne la liste des carrières suisses et des informations sur leur exploitation.

Tableau synoptique des principales pierres naturelles de Suisse										
Genre	Appellation dans le commerce	Principaux sites d'extraction	Tex- ture	Struc- ture	Couleur	Résistance à la pression quand sèche en kg/cm ²	Densité apparente en kg/dm ³	Poids spécifique en kg/dm ³	Absorp- tion d'eau en % du poids	Ouvrabilité
Granit	Granit du Gothard Granit d'Uri Granit d'Andeer	Uri: Gurtellen, Wassen, Göschenen Grisons: Andeer Valais: Monthey, Martigny	mas- sive	grenue	blanc gris-vert tacheté noir dâtre	1600-2400	2,4-2,7	2,56-2,7	0,2-0,55	se fend aisément dans divers sens
Gneiss	Granit du Tessin Granit de Verzasca Bevola	Tessin: Rodi, Faïdo, Chiggiogna, Lavorgna, Bodio, Personico, Pollegio, Biasca, Iragna, Osogna, Lodrino, Cresciano, Claro Brione-Verzasca Val Maggia: Ponte-Brolla, Cevio, Someo	stra- tifiée ou en pla-ques	grenue à len- ticu- laire	blanc gris-vert- ligné noir dâtre	1300-2100	2,55-2,64	2,62-2,71	0,21-0,72	se fend aisément dans le sens du lit. Peut être fendu en minces plaques
Calcaire Calcaire siliceux	Calcaire des Alpes Calcaire bleu	Saint-Gall: Oberriet-Rheintal, Quinten, Weesen Glaris: Nâfels, Moilis Lac des Quatre-Cantons: Brunnen, Seewen, Matt, Kehrsiten, Hergiswil, Rotzloch Lac de Thoune: Balmholz Lac de Brienz: Ringgenberg	gén. mas- sive	grain fin	gris-bleu foncé	2000-2700	2,62-2,67	2,66-2,73	0,04-2,8	facile à travailler
Calcaire compact	Pierre de Läger Pierre du Jura Marbre de St-Triphon	Schaffhouse: Hemmental Läger: Dielsdorf, Baden Jura: Lëufelfingen, Soleure, Bienne, Euchenette, La Neuveville, Valangin, La Chaux-de-Fonds Vaud: Saint-Triphon Jura: Laufen, Rislach, MuttENZ, Balsthal	gén. mas- sive	pres- que sans grain	jaunâtre clair, blanc,jaune clair gris sombre (devient gris clair)	1660-1750 1400-2000 1000-1500 1100-1500	2,58-2,68	2,70-2,74	0,2-3,2 0,1-2,6	facile à travailler et à tailler
Calcaire poreux	Pierre d'Hauterive	Neuchâtel: Hauterive, Saint-Blaise	mas- sive	poreu- se	jaune,jaune foncé	1100-1600			0,6-5,5	facile à tailler
De dépôts calcaires animaux (échino-ermes)		Vaud: Villeneuve (Arvel), Bex Valais: Collombey	mas- sive	pres- que sans grain	clair, gris-jaune	1800-2100 1100-1800			0,1-3,4	facile à travailler et à tailler

Tableau 7.2:
Tableau synoptique des principales pierres naturelles suisses, liste de 1930, selon [7.10]. Les données correspondent à la situation de l'époque et peuvent servir de base à l'évaluation des bâtiments existants. Depuis d'importantes modifications sont intervenues dans les métiers de la pierre. On s'en tiendra donc, pour les nouveaux ouvrages, aux données actuelles que l'on trouve dans le document [7.11]. En ce qui concerne les différentes sortes de pierres, référez-vous à [7.5, 7.6]

Genre	Appellation dans le commerce	Principaux sites d'extraction	Texture	Structure	Couleur	Résistance à la compression – sec en kg/cm ²	Densité apparente en kg/dm ³	Poids spécifique en kg/dm ³	Absorption d'eau en % du poids	Façonnage possible
Grès antique (Grès de Zoug)	Pierre de St-Margreth	Saint-Gall: Margrethen	massive	grain fin	gris-bleuâtre	500-800	2,44	2,67	1,7-3,5	facile à tailler
	Grès de Buchberg, de Bollingen	Obersee: Buchberg, Bollingen, Jona, Schmerikon, Uznaberg Zoug: Menzingen, Lottenbach			gris-jaunâtre	500-1900	2,35-2,51	2,64-2,69	2,5-6,0	
Grès calcaire stratifié	Pierre de Rorschach	Saint-Gall: Staad-Rorschach	en plaques	grain fin	bleuâtre verdâtre	800-1100	2,45	2,66-2,72	1,0-2,5	facile à fendre en plaques
non stratifié	Grès de Stockern	Lucerne: Renggloch, Root, Rootenberg	massive	grain fin	gris-verdâtre	250-400	2,15-2,26	2,67-2,72	5,5-7,6	facile à couper et à tailler
Grès riche en calcaire (appenzellois)	Grès d'Attalens	Berne: Stockerne, Ostermundigen, Krauchthal, Oberburg, Fribourg	massive	grain fin	gris-bleuâtre	1100-1700	2,66-2,67	2,73-2,78	0,3-1,0	bonne à façonner
	Grès de Corbières	Appenzel: Waldstatt, Teufen Saint-Gall: Ebnat, Krumenau Obersee: Benken Romandie: Attalens, Chexbres, Echarlens (Corbières)	massive	grain fin	gris-bleuâtre	1600-2700	2,60-2,69	2,66-2,75	0,05-0,20	bonne à travailler
Grès siliceux (Flyscheret autres)		Glaris: Matt (Sernfital) Uri: Attinghausen Obwald: Guber (Alpnach) Berne: Mitholz (Kandersteg), Schwarzenburg-Gurnigel Fribourg: Plasselb Valais: Massongex, Saint-Gingolph Saint-Gall: Buchsberg, Sevelen Nidwald: Beckenried	massive	grain fin	gris-bleuâtre	1800-3400	2,66-2,70	2,72-2,77	0,23-0,41	
	Grès coquillé	Saint-Gall: Thal (Rorschach) Argovie: Mägenwil, Würenlos, Othmarsingen Fribourg: Seiry (Estavayer)	massive	grain gros-sier	gris-bleuâtre	350-900	2,10-2,58	2,68-2,71	1,1-4,0	facile à tailler
Grès coquillé	Grès de Mägenwil	Appenzel: Herisan (Schachen)	massive	pisolithique	gris clair	1400-1500	2,74	–	0,1-0,1	difficile à travailler
	Nageflue grain fin	Saint-Gall: Degersheim Zurich: Rüti	massive							
Grès grossier		Schwyz: Goldau (Bergsturz)	massive	grossière	bigarré	–	–	–	–	difficile à tailler

Tableau 7.2
(suite):
idem page précédente

7.3 Mécanismes de vieillissement et de dégradation

Les principales indications relatives aux mécanismes de vieillissement et de dégradation, valables pour tous les matériaux, figurent dans le paragraphe 2.3. Comme les autres matériaux, la pierre naturelle est l'objet de sollicitations externes et internes qui provoquent sa dégradation. Il peut s'agir d'influences naturelles ou anthropogènes (dues à l'homme).

La pierre naturelle se décompose sous l'effet de processus mécaniques-physiques, chimiques et biologiques [2.12, 7.12, 7.13].

Les facteurs internes varient selon les roches que l'on trouve dans la nature; ce sont eux qui, à sollicitations égales, font qu'une pierre est plus résistante ou plus durable qu'une autre.

La composition minéralogique donne des indications sur le comportement chimique. La structure schisteuse, l'orientation minérale et surtout la porosité, donnent des indications sur le comportement physique.

En maçonnerie aussi, il faut tenir compte de l'interaction des matériaux, interaction qui varie souvent en fonction du degré d'humidité. Ainsi, le béton ou le ciment Portland s'accordent mal avec le grès. On sait que la dureté mécanique du mortier à base de ciment dégrade les matériaux plus tendres, et que les sels de ce même mortier rongent le grès et le mortier de chaux [7.14].

Le comportement à long terme de la pierre naturelle dépend également de son exposition aux intempéries. A proximité du sol, son comportement est déterminé par l'humidité du sol et par les eaux de suintement qui transportent souvent des sels.

Les formes les plus fréquentes de dégradation de la pierre sont:

- la désagrégation sableuse;
- le délitage;
- le feuilletage;
- les efflorescences, les croûtes et le salpêtre;
- l'effritement p. ex. du calcaire.

Les illustrations 7.8 à 7.12 reproduisent quelques-unes de ces dégradations.

Les dégâts se produisent d'autant plus rapidement que la surface de la pierre n'a pas été correctement façonnée.

Le maintien de l'aptitude fonctionnelle d'un ouvrage en pierre naturelle dépend aussi de l'état des joints au mortier. S'ils sont mal faits, ils favorisent les dégâts dus à la pénétration de l'humidité et au gel. A cet égard, le matériau le plus délicat est le «vieux» mortier de chaux (à base de chaux éteinte).



Figure 7.8: Désagrégation sableuse caractéristique: mur en grès près du Palais fédéral à Berne



Figure 7.9: Dégradation généralisée au pont de Nydegg: les eaux de ruissellement entraînent une désagrégation sableuse considérable par cristallisation saline



Figure 7.10: Formation de croûtes sur de la pierre de grès: mur de soutènement à Zürich



Figure 7.11: Les racines de bouleau transpercent le «Holzbrücke» à Olten



Figure 7.12: Dégradation généralisée du mur de soutènement de l'esplanade du Münster à Berne: l'humidité saline, provenant du remplissage la face arrière, a transpercé le mur, rongé le grès

7.4 Surveillance

En matière de surveillance (auscultation des ouvrages et inventaire des dégradations), il faut distinguer, dans le domaine de la pierre naturelle, entre les ouvrages fonctionnels (tunnels routiers et ferroviaires) et les ouvrages qui, même à vocation fonctionnelle, possèdent une valeur culturelle et peuvent ou doivent être considérés comme monuments historiques. Il peut s'agir de ponts, d'ouvrages de soutènement ou de façades.

Si l'on fait cette différence, c'est que l'on procède avec une délicatesse toute particulière quand il s'agit d'ausculter des ouvrages classés ou susceptibles de l'être. En effet, une auscultation basée exclusivement sur la technique peut conduire à des carottages qui laisseront des cicatrices ineffaçables. C'est pourquoi l'inventaire des dégradations repose avant tout sur l'inspection visuelle [1.2].

Selon [7.8], cet inventaire devrait se faire à l'aide d'un plan que l'on légende en fonction des observations (cf. fig. 7.13). On complète ces travaux à l'aide de prises de vue photographiques avant de dresser les échafaudages.

Si nécessaire, on procède à des analyses en laboratoire.

Pour les ouvrages purement fonctionnels, p. ex. l'habillage des tunnels en pierre naturelle, c'est également l'inspection visuelle qui prime. L'auscultation thermographique peut donner des indications complémentaires sur l'état de l'habillage, sur la pénétration de l'humidité ou sur les zones de ruissellement [1.2, 7.15]. On peut imaginer se servir bientôt de méthodes en plein essor comme le géoradar et les ultrasons, comme l'expose le document [1.2] qui parle également des techniques d'auscultation que sont le carottage (avec analyses ultérieures en laboratoire) et l'endoscopie (inspection des cavités se situant derrière l'habillage).

Formes d'altération / dommages		Pierres / matériaux	
	Pierre naturelle intacte		Granit
	Légère désagrégation sableuse		Calcaire dense
	Désagrégation sableuse		Grès bernois A
	Forte désagrégation sableuse		Grès bernois B
	Formation de croûtes		Tassot
	Formation de feuillets		Inclusions de marne
	Décohésion		Rhabillage en mortier de ciment, pierre artificielle
	Effritement		Crépi
	Efflorescences		
	Ruissellements		
	Lichens, algues		
	Fissures		
Mesures d'assainissement			
	Nettoyage: brossage / aspiration / rinçage		
	Consolidation		vert clair
	Raboter légèrement / Ravaler		
	Modelage chaux-trass		jaune
	Modelage époxy		orange
	Remplacement par de la pierre naturelle		rouge
	Tassot		rouge
	Remplacement par de la pierre artificielle		bleu
	Hydrofugation		vert foncé
	Rhabillage en crépi		

Figure 7.13: Légendes utilisées en ville de Berne pour la documentation sur les sortes de pierres, les dégâts et les mesures d'assainissement [7.11]

7.5 Entretien et rénovation

La distinction que nous avons faite en 7.4 entre les ouvrages à caractère purement fonctionnel et les monuments historiques, vaut également pour la conception et l'exécution des mesures d'entretien et de renouvellement.

Pour les ouvrages fonctionnels comme les tunnels routiers et ferroviaires, il s'agit avant tout que la maçonnerie assure une portance correcte et qu'elle soit suffisamment étanche à l'eau. Certaines substances agressives comme les sels de déverglaçage peuvent attaquer, voire ronger la surface de la pierre et les joints.

Les joints défectueux doivent être soigneusement grattés ou piqués, et nettoyés au sable ou à l'eau sous pression. Ces travaux exigent parfois que l'on assure la tenue de la pierre avec des coins en bois. Le nouveau joint se fait généralement en deux temps (voir fig. 7.14). Dans un premier temps, on remplit le fond du joint avec du mortier; on déterminera de cas en cas s'il faut opter pour du ciment de Portland ou pour des ciments à la chaux (trass). A cet égard, le principe de base est que le matériau utilisé pour le joint doit être plus tendre que la pierre qu'il côtoie. Dans un deuxième temps, on applique un mortier à base de ciment (à haute teneur en ciment) et, le cas échéant, contenant un additif qui renforce l'étanchéité à l'eau, le tout lissé au fer, après quoi l'on retire les coins en bois.

Il est possible d'injecter dans les joints, sur de grandes zones, de la barbotine ou du mortier à base de ciment. Il s'agit alors de commencer par contrôler si l'on peut remplir sans inconvénients l'espace situé entre la maçonnerie et la roche. Cette mesure ne présente aucun inconvénient dans les montages faiblement

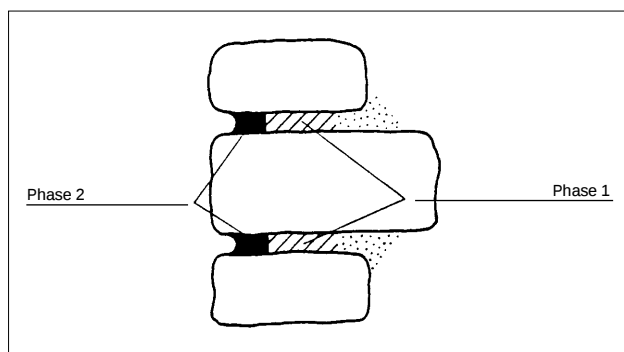


Figure 7.14: Renouvellement des joints en maçonnerie

irriguées; en revanche, il vaut mieux ne pas l'appliquer dans les massifs fortement irrigués: en empêchant l'eau d'emprunter son cheminement naturel, on crée une pression hydraulique qui peut se répercuter négativement sur la solidité de l'ouvrage.

Si des dégâts n'apparaissent que sur des pierres ou des zones isolées, on peut procéder à un remplacement. Toutefois, il s'agit d'un procédé onéreux et l'on préfère souvent, dans ce cas, faire appel au béton. Autre solution qui a fait ses preuves: l'application de béton projeté sur les zones endommagées, surtout quand il s'agit de vastes surfaces voûtées [4.30]. Au ciseau, on dégage la maçonnerie endommagée jusqu'au matériau encore sain; on dégage également les joints et les éventuelles fissures. Les surfaces ainsi dégagées sont giclées au sable, à l'eau et à l'air sous pression. Ces surfaces doivent être humides, de sorte que le béton y adhère ensuite efficacement. On détermine l'épaisseur et la pose d'un éventuel ferrailage en fonction de l'emplacement des travaux et des sollicitations futures (fig. 7.15).

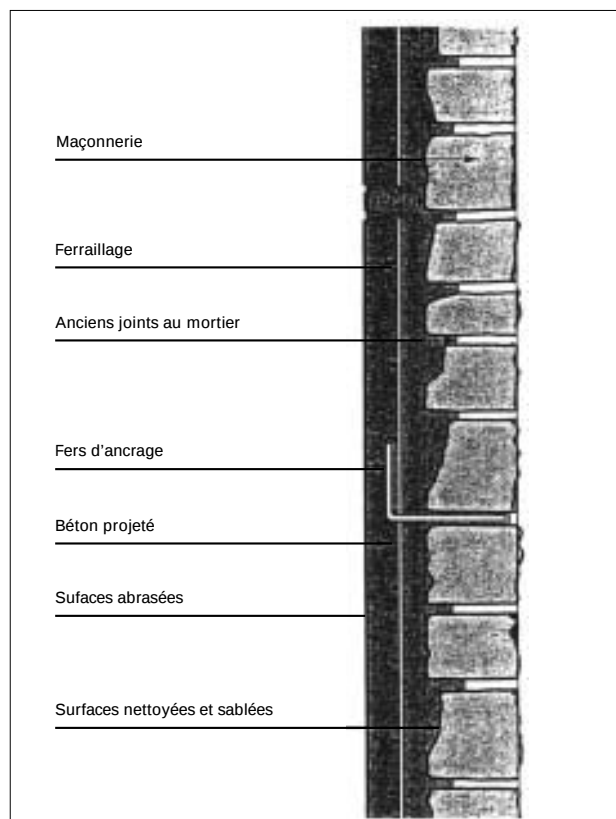


Figure 7.15: Nouvelle couche de béton projeté sur une maçonnerie en pierre naturelle [4.40]

Les documents [7.16] et [7.17] donnent de précieuses indications d'ordre technique et organisationnel sur la conception et l'exécution des mesures d'entretien spécialisé des tunnels en exploitation.

Quand on a à faire à des ouvrages de maçonnerie qui sont constamment détrempés, on essaie de dévier l'eau. Pour les ouvrages de soutènement, il suffit généralement d'accéder au niveau du sol côté terre, de poser un drainage et de bétonner ensuite l'arrière du mur (fig. 7.16). On essaie parfois, en pure perte, de résoudre le problème de la pénétration d'humidité en procédant à des injections à travers le mur, ou en appliquant une couche protectrice sur sa face ouverte; dans ce dernier cas, l'«étanchéité» ne dure jamais bien longtemps.

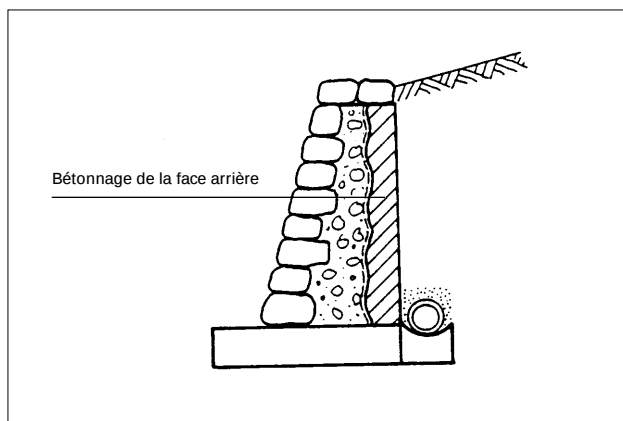


Figure 7.16: Assainissement d'un mur constamment détrempé: mise à jour de la face arrière, pose d'un drainage, bétonnage de la face arrière

La maintenance des ouvrages en pierre naturelle est revenue d'actualité dans les années 70, lorsqu'il a fallu se mettre à restaurer des monuments historiques [7.18]. Les métiers de la pierre, jadis florissants, avaient alors pratiquement disparu. Il fallut donc commencer par imaginer des méthodes et inventer des matériaux qui ne correspondaient pas forcément aux spécificités de la pierre naturelle, tant on était conditionné par la philosophie du béton et des produits chimiques qui l'accompagnent.

Pour donner suite aux expériences faites et à des travaux d'entretien mal faits, l'Association des conservateurs suisses de monuments historiques regroupe les conservateurs de monuments historiques de tous les cantons et de quelques villes

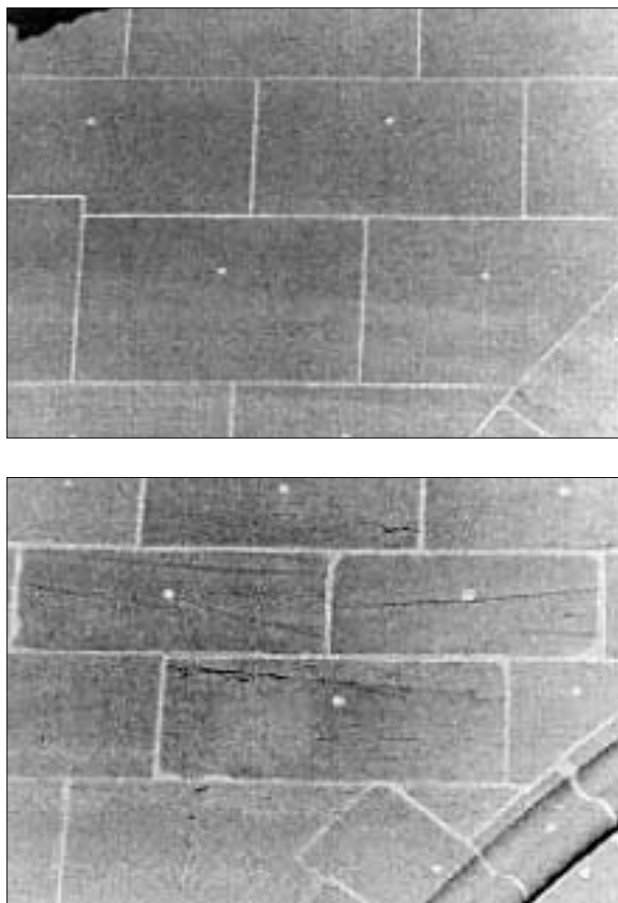


Figure 7.17: Alors que la façade refaite à «fond» donne, de par ses nouveaux joints, une impression de rigidité «industrielle», la partie que l'on s'est contenté de nettoyer et de rejointoyer où nécessaire, présente encore les traces du façonnage original, elle fait son âge [7.18]

suisses. Elle a organisé le 14 novembre 1986 à Berne un colloque d'une journée sur le thème «Mieux connaître la dégradation de la pierre» auquel était également représentée la Commission fédérale des monuments historiques. Suite à des discussions approfondies menées à l'appui d'exemples concrets concernant la molasse – une pierre particulièrement menacée – la résolution suivante a été prise:

«L'Association des conservateurs suisses de monuments historiques est profondément préoccupée par l'importance croissante des atteintes que l'on peut observer sur tous les matériaux de construction exposés à l'air libre. Les pierres naturelles – et plus particulièrement les molasses – d'un usage courant dans les bâtiments à valeur historique,

posent un problème de par leur importance. Les approches effectuées à l'aide de méthodes scientifiques, dont le développement doit être encouragé, confirment que, outre l'érosion naturelle et les interventions inappropriées, la pollution de l'air est une cause de dégradation de la pierre. Les mesures de restauration, qui s'imposent en suscitant de grands frais, sont en nette augmentation; elles ne doivent pas nous faire croire que des menaces croissantes planent sur notre patrimoine historique, au point de ne pouvoir plus transmettre à l'avenir que de pâles copies. L'Association des conservateurs suisses de monuments historiques affirme catégoriquement que nos monuments ne sauront être protégés efficacement que par la réduction notable, et intervenant rapidement, des produits polluants dispersés à l'air libre.

L'Association des conservateurs suisses de monuments historiques, bénéficiant d'une expérience largement tirée de considérations pratiques, s'est préoccupée des mesures effectives à prendre dès maintenant face aux dégradations de la pierre. Elle tient à rappeler que, d'une part, chaque monument possède le caractère d'un objet original et que, d'autre part, seul peut être considéré comme monument une œuvre transmise par le cours de l'histoire. Les éléments constitutifs, la forme originale, les pellicules picturales ainsi que les marques de l'outil dans leurs détails, tout comme l'empreinte de l'artisan, sont indissociables du monument, tout comme les traces intervenues au cours du temps. Le but ultime de chaque mesure de protection est l'entretien ainsi que la conservation du modèle original qui nous a été transmis au cours de l'histoire.

L'Association des conservateurs suisses de monuments historiques affirme que, partout où cela est possible, les pierres qui font partie intégrante de monuments historiques, doivent être conservées dans leur substance originale. D'où l'importance de l'entretien ordinaire d'un bâtiment, afin de pouvoir le protéger à titre préventif avant que les dommages ne prennent de l'importance. L'entretien de parties originales doit également être envisagé en priorité lorsque des pierres sont déjà endommagées. Le but premier des mesures à prendre est le retardement d'un processus de dégradation et non pas la restitution d'une «belle» surface quasiment neuve. La dimension des interventions doit être réduite au minimum; il s'agit de garder des possibilités d'interventions suffisantes pour les mesures qui resteront à prendre lors de l'intervention des générations à venir (intervention minimale = réversibilité maximale).

De hautes exigences doivent être formulées pour les matériaux utilisés pour la conservation et la consolidation en ce qui concerne la connaissance exacte de leur composition, leur comportement avec la matériaux d'origine, leur mise en œuvre, leur durabilité; face à des produits miracles peu éprouvés, il convient d'être extrêmement prudent. Seuls des artisans expérimentés et connaissant dans le détail les particularités de chaque pierre devraient pouvoir accomplir de telles tâches particulières. Des connaissances acquises en plus de la formation artisanale traditionnelle des tailleurs de pierres et des sculpteurs sont nécessaires pour des édifices historiques bâtis en pierre. L'Association des conservateurs suisses de monuments historiques demande l'organisation dans notre pays de possibilités de formation complémentaire ou continue, pour l'heure inexistantes, ceci pour les personnes appelées à restaurer la pierre.»

C'est avec grand soin qu'il faut entretenir les ouvrages en pierres naturelles, qu'ils soient classés monuments historiques ou qu'ils méritent de l'être, comme c'est le cas pour certains ponts et certains ouvrages de soutènement. Le document [7.18] donne toutes sortes d'indications à ce sujet. Ces indications s'appuient pour la plupart sur les données propres aux ouvrages en grès de la ville de Berne, ce qui n'empêche pas qu'elles sont souvent applicables à d'autres sortes de pierre. L'auteur insiste sur le fait que ses recommandations ne sont pas des trucs infaillibles que l'on pourrait appliquer sans réfléchir: chaque ouvrage possède des particularités dont il faut tenir compte.

Une intervention peut comprendre les phases suivantes:

Nettoyage

La décision sur les mesures à prendre doit être précédée d'un nettoyage soigné et prudent qu'effectueront de vrais spécialistes de la pierre. Le nettoyage à sec à la brosse douce et à l'aspirateur, ou un arrosage prolongé à l'eau claire, donnent souvent d'excellents résultats. Pour ce dernier procédé, on pose une installation fixe, l'eau ne doit pas être sous pression, on n'utilise ni produit chimique, ni brosse dure ni moyen mécanique; on prendra garde aux joints ouverts et aux baies de fenêtres. Dans certains cas exceptionnels qui exigent l'autorisation du département des monuments historiques, on utilise le microsablage ou le nettoyage à la vapeur.

Réparation des joints

On ne renouvelle que les joints qui sont fissurés ou n'adhèrent plus. La dépose du matériau ne doit pas entraîner d'évasement. Le nouveau matériau doit être plus tendre que la pierre qui l'entoure (on utilise en principe du mortier à base de chaux); sa couleur et son grain doivent correspondre au mortier d'origine (procéder à un échantillonnage). On ne touchera pas aux joints qui sont intacts ou qui ne présentent que de fines fissures, ou encore dont la matière ne peut être reproduite comme on le voudrait.

Conservation

La pierre de taille qui s'effrite en surface peut être traitée de sorte à ralentir sa désagrégation. Il ne s'agit pas de généraliser ce procédé qui exige une connaissance approfondie de la pierre, voire des analyses en laboratoire. Dans bien des cas, ces renforcements ont été payants pour autant qu'ils aient été réalisés par des ouvriers spécialisés qui utilisaient surtout de l'ester d'acide silicique. On n'envisage l'hydrofugation que dans des cas extrêmes.

Ravalement de la pierre

Le ravalement de la pierre de taille entraîne une perte de substance et l'effacement des marques de l'âge et du façonnage originel. Ce genre d'intervention ne se justifie pas pour les bas de façade ou des éléments comme les moulures, les encadrements de fenêtres, etc. Si, exceptionnellement, on doit envisager un ravalement (ce peut être, par exemple, sur des ouvrages de la fin du 19^e ou du début du 20^e qui avaient été mal retouchés et qu'il faut restaurer), ce ne sera qu'après entente avec les responsables des monuments historiques et sur la base d'une solide documentation. Dans tous les cas, le ravalement se fera dans les règles de l'art de la pierre de taille, pour correspondre parfaitement, par la procédé et l'aspect, au façonnage originel.

Rhabillage au mortier

Le mortier permet de réparer de petites dégradations. Selon les expériences faites à ce jour, il faut utiliser des mortiers purement minéraux à base de ciment chaux-trass (part la plus faible possible de ciment qui doit être pauvre en sels); il faut encore que la température nocturne ne descende pas au-dessous de 2°C pendant les quatre semaines qui suivent la fin des travaux. Les mortiers à bases synthétiques posent des problèmes de stabilité volumétrique, d'adhérence, de couleur ou de réversibilité. Pour l'élaboration de ces mortiers, on sera très précis quant à la composition (spécifications des

matériaux) et aux objets de référence; la qualification de l'ouvrier joue également un rôle majeur.

Il ne faut en aucun cas confondre ce genre de rhabillage au mortier avec les couches ou les recouvrements exécutés en matériaux à base de plastiques qui sont à éviter absolument puisqu'ils représentent l'exact contraire de ce qu'on attend des travaux de restauration de la pierre.

Remplacement de la pierre de taille

Dans certains cas, un rhabillage au mortier ne suffirait pas ou s'avérerait impossible, par exemple sur des éléments très exposés aux intempéries, comme les tablettes de fenêtres ou les larmiers; il faut donc remplacer la pierre de taille. Le nouveau matériau doit se confondre parfaitement avec l'ancien (pierre naturelle, structure et couleur identiques). On trouve aujourd'hui des pierres synthétiques à base de ciment ou de résine: elles ne conviennent en aucun cas à la restauration puisqu'elles présentent des défauts technologiques (teneur en sels, stabilité volumétrique) et esthétiques (grain, couleur, vieillissement irrégulier). Les pièces de remplacement en pierre naturelle doivent être sculptées exactement comme les anciennes. Leur épaisseur ne doit pas être inférieure à 12 cm, sauf pour les tablettes de fenêtres. On apportera un soin tout particulier à ce que les joints qui entourent la nouvelle pièce soient parfaitement conformes à l'ensemble. Le mortier de pose et de scellement doit être à base de chaux (bonne diffusion de l'eau, mortier plus tendre que la pierre): on évitera l'utilisation de ciment à cause de sa dureté et des sels qu'il contient.

Travaux d'ornement

La conservation de la substance concerne les sculpteurs au premier chef. Si la restauration s'avère problématique, on effectuera un moulage de sécurité en plâtre après avoir nettoyé, renforcé et rhabillé la pièce au mortier. Ce moulage sera stocké dans les archives des monuments historiques. Les copies d'ornements ne se justifient que dans des cas rarissimes.

Protection mécanique

Dans des cas particuliers, il peut être intéressant de protéger certains éléments contre les intempéries. Les solutions doivent être soumises au service des monuments historiques.

Pour toute autre information au sujet des travaux de restauration des ouvrages en pierre naturelle, veuillez vous référer à la littérature spécialisée.

8. Bibliographie

Chapitre 1: Introduction

- [1.1] PI-BAT: Maintenance des routes à grand trafic en exploitation. N° 724.452 f, 1991
- [1.2] PI-BAT: Techniques d'auscultation des ouvrages de génie civil N° 724.453 f, 1991
- [1.3] Wolff A.: Zur Technologie der Substanzerhaltung am Kölner Dom, Tiefbau, Ingenieurbau, Strassenbau, 6/83, S. 356-364
- [1.4] SIA Dokumentation D 031: Anker und Spannkabel, 1989
- [1.5] SIA Dokumentation D 055: Sicherheit und Dauerhaftigkeit von Befestigungssystemen, 1990

Chapitre 2: Bases

- [2.1] Recommandations SIA 169, Maintenance des ouvrages de génie civil, 1987
- [2.2] Norme SIA 160: Actions sur les structures porteuses, 1989
- [2.3] Norme SIA 162: Ouvrages en béton, 1989
- [2.4] Norme SIA 162/1: Ouvrages en béton – Essais des matériaux, 1990
- [2.5] Norme SIA 161: Constructions métalliques, 1991
- [2.6] Norme SIA 161/1: Constructions métalliques – Assurance de la qualité, certificats d'exploitation, contrôles, matériaux, 1991
- [2.7] SIA Dokumentation D 041: Einführung in die Norm SIA 160 «Einwirkungen auf Tragwerke»
- [2.8] SIA Dokumentation D 042: Einführung in die Norm SIA 162 und 161/1 «Betonbauten», 1989
- [2.9] Documentation SIA D 070, Introduction aux nouvelles normes SIA 161 «Constructions métalliques» 1991
- [2.10] SIA Dokumentation D 072: Die Rolle des Architekten in der neuen Tragwerksnormen, 1991
- [2.11] Weber H.: Steinkonservierung in Deutschland, Bautenschutz – Bausanierung, 1/1987, S. 6-8
- [2.12] Arnold A.: Auswirkungen der Luftschadstoffe auf Kulturgüter, Vortrag anlässlich der Informationstagung der SVA vom 14./15.5.1984 in Zürich
- [2.13] Triptet I., Wiederkehr P.: Etude du problème des précipitations acides en Suisse, Dissertation, EPFL, Mars 1983
- [2.14] BUWAL: Zur Lage der Umwelt in der Schweiz, Umweltbericht 1990, EDMZ, 3000 Bern, Bestell-Nr. 319.402 d
- [2.15] Meyer H.G.: Qualitätssicherung – eine neue Aufgabe im Bauwesen?, Bautechnik, Heft 7, Juli 1986, S. 217-223
- [2.16] SIA Dokumentation D 062: Qualitätssicherung im Bauwesen – Eine Forderung unserer Zeit, 1990
- [2.17] Rechsteiner P.: Die Bauproduktrichtlinie, Referat anlässlich des SBG-Workshops «Der EG-Binnenmarkt und Ihr Unternehmen», 16./17. und 28./29. Januar 1990

Chapitre 3: Exigences relatives aux systèmes de protection et critères de choix

- [3.1] Groupe de travail «Galleries»: Dégâts aux joints des galeries de protection. Ingénieurs et Architectes suisses 9/91, p. 107-109
- [3.2] Darwin D., Manning D. G., Hognestad E. et al: Debate: Crack width, cover and corrosion, Concrete International, May 1985, S. 20-35
- [3.3] Käser M., Menn Ch.: Dauerhaftigkeit von Stahlbetontragwerken; Auswirkungen der Rissbildung, Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich, April 1988, Bericht Nr. 160

Chapitre 4: Construction en béton

- [4.1] Menn C.: Stahlbetonbrücken, Springer-Verlag, Wien New York, 1986
- [4.2] Keller T.: Dauerhaftigkeit von Stahlbetontragwerken – Transportmechanismen – Auswirkung von Rissen, Dissertation, ETH Zürich, 1991
- [4.3] SIA Documentation D 068, Bétons à hautes performances (BHP), 1991
- [4.4] Martinola M.: Anwendungen von Hochleistungsbeton mit Microsilica in Brücken und Hochbau, Seminar in Konstanz, 1991
- [4.5] Schiessl P.: Einfluss von Rissen auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen, DAFStb, Heft 255, Berlin, 1986
- [4.6] Documentation SIA D 057: Corrosion et protection contre la corrosion, 1990.
- [4.7] Jungwirth D. u.a.: Dauerhafte Betonbauwerke, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1986
- [4.8] Bonzel J., Hilsdorf H.K.: Beton, Betonkalender 1990, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [4.9] Elsener B.: Elektrochemische Methoden zur Bauwerksüberwachung, SIA Dokumentation D 020, 1988
- [4.10] Peter G. u.a.: Bedeutung des Betons für den Korrosionsschutz, SIA Dokumentation D 020, 1988
- [4.11] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, Teil 1 und 2, August 1990, Beuth Verlag, Berlin und Köln
- [4.12] Böhni H. u.a.: Schutz und Sanierung von Stahlbetonbauwerken im Bereich von Strassen, Forschungsbericht 212, Bundesamt für Strassenbau, Auftrag 9/83, März 1991
- [4.13] Menn C., u.a.: Zustandsermittlung, Zustandsbeurteilung und Verstärkungsmassnahmen bei Stahlbetonbrücken (Arbeitstitel), Forschungsauftrag Nr. 82/90 des ASB, erscheint 1992
- [4.14] Recommandation SIA 162/3: Détermination de la profondeur de carbonatation du béton, 1990
- [4.15] Jungwirth D.: Elektrochemische Schutzverfahren aus der Sicht der Praxis unter besonderer Berücksichtigung der Realkalisierung, SIA Dokumentation D 065, 1990
- [4.16] SIA-Dokumentation D 065, Elektrochemische Schutzverfahren für Stahlbetonbauwerke, 1990
- [4.17] Schmalz P.: Zusammenfassung und Ausblick, SIA Dokumentation D 065, 1990
- [4.18] Office Fédéral des Routes: Directives pour l'utilisation d'armatures passives revêtues de résine époxy, Berne, 1991
- [4.19] PI-BAT: Techniques d'auscultation des ouvrages de génie civil N° 724.453 f, 1991
- [4.20] Hunkeler F.: Bauwerksinspektion mittels Potentialmessung, Schweizer Ingenieur und Architekt, 12/91, S. 272-278
- [4.21] Recommandation SIA 162/2: Détermination de la teneur en chlorures dans le béton, 1990
- [4.22] Theiler F.P.: Chemische Analysen, SIA Dokumentation D 020, 1988
- [4.23] Böhni H.: Grundlagen der Korrosion und des elektrochemischen Korrosionsschutzes, SIA-Dokumentation D 065, 1990
- [4.24] Hunkeler F.: Untersuchungen zum kathodischen Korrosionsschutz an der Fahrbahnplatte im Strassentunnel San Bernardino, SIA Dokumentation D 065, 1990
- [4.25] Korrosionskommission: Richtlinie für Projektierung, Ausführung und Überwachung des kathodischen Korrosionsschutzes von Stahlbetonbauwerken, C7d, Ausgabe 1991
- [4.26] Merkblatt SIA 2002, Ausgabe Oktober 1990, Inspektion und Instandsetzung von Bauteilen aus Beton
- [4.27] Kruse M.: Einfluss von Verkehrserschütterungen auf die Spritzbeton-Qualität bei Brückensanierungen, IBETH-Projekt 048/86, August 1987, Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich
- [4.28] SIA 198, Untertagbau, Vernehmlassungsentwurf, Dezember 1990
- [4.29] DIN 18 551, Spritzbeton, Herstellung und Güteüberwachung, Entwurf März 1990, Berlin
- [4.30] Teichert P.: Spritzbeton, Herausgeber E. Laich SA, 6670 Avegno, 1991
- [4.31] Ammon C.: Spritzbeton und seine Eigenschaften – Wiederverwendung von Rückprall und Einfluss der Liegezeit des Trockengemisches auf die Qualität des Spritzbetons, IBETH-Projekt 037/83, März 1984

- [4.32] Ammon C.: Haften von Spritzbeton am Fels, Beton und Tunnelsteinen, IBETH-Projekt 042/84, März 1985
- [4.33] Hodel N.: Einfluss von tiefen Temperaturen auf die Qualität des Spritzbetons, IBETH-Projekt 046/85, März 1986
- [4.34] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Bauteilen, Teil 3: Qualitätssicherung der Bauausführung, Februar 1991, Beuth Verlag, Berlin und Köln
- [4.35] Bundesminister für Verkehr: Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für das Füllen von Rissen in Betonbauteilen (ZTV-RISS 88), Bonn
- [4.36] Deutscher Beton-Verein E.V.: Schützen, Instandsetzen, Verbinden und Verstärken von Betonbauteilen (SIVV-Lehrgangs-Handbuch), März 1990, Wiesbaden
- [4.37] Empfehlung SIA 271, Ausgabe 1986, Flachdächer mit Bitumen-Dichtungsbahnen, Polymer-Bitumen-Dichtungsbahnen, sowie Kunststoff-Dichtungsbahnen
- [4.38] SIA Dokumentation 60, Dächer-Konstruktive und bauphysikalische Probleme bei Flach- und Steildächern, 1983
- [4.39] SIA Documentation 79, Toitures-Architecture et construction, 2^e édition, 1986
- [4.40] Dournow R.: Ausführungsrichtlinien für Flachdachabdichtungen, VERAS (Verband schweizerischer Gussasphalt- und Abdichtungsunternehmen), Ausgabe 1989
- [4.41] Recommandation SIA 272: Etanchéité des ouvrages enterrés, 1980
- [4.42] Norme SIA 280: Lés d'étanchéité en matière synthétique (les polymères), performances exigées et essais des matériaux, normes, 1983
- [4.43] Norme SIA 281: Lés d'étanchéité de bitume polymère (LBP), performances exigées et essais des matériaux, norme, 1983
- [4.44] Normen VSS 556 001 ... VSS 556 029 Bitumen-Dichtungsbahnen
- [4.45] Recommandation SIA V 274: Etanchéité des joints dans la construction, 1988
- [4.46] Office fédéral des routes: Détails de construction de ponts, directives 1990
- [4.47] SBB, Weisung W Bau GD 36/89, Allgemeine Grundlagen, Normalquerschnitte und konstruktive Details für die Ausbildung beschotterter Brücken, 1989
- [4.48] Ruckstuhl F.: Etanchéité des tunnels de routes nationales, Ingénieurs et Architectes suisses N° 22/87, p. 398–400
- [4.49] Klawe N., Haack A.: Tiefbaufugen, Fugen- und Fugenkonstruktionen im Beton- und Stahlbetonbau, Ernst & Sohn, Berlin, 1990
- [4.50] Tenucci J.: Erneuerungen und wärmetechnische Verbesserungen von Flachdächern, in [4.26], S. 39-49
- [4.51] Ragonesi M.: Erneuerung von Flachbedachungen, Schweizer Ingenieur und Architekt, 36/89, S. 934-941
- [4.53] Blumer M.: Sanierung von Brückenabdichtungen und -belägen, Sonderdruck Fachtagung der ATAG Strassenbau AG, 1983, S. 18-55
- [4.54] Wruck R., Günther G.: Untersuchungen von Fahrbahnabdichtungen auf Betonbrücken, Heft 510, 1987, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Bonn – Bad Godesberg
- [4.55] Kantonsingenieurbüro Nidwalden, Anschlüsse von Brückenabdichtungen aus Polymer-Bitumen-Dichtungsbahnen PBD, Zwischenbericht, Juli 1989 (nicht veröffentlicht)
- [4.56] Zwicky P.: Abdichtung für Ingenieurbauwerke, Schweizer Ingenieur und Architekt, 16/89, S. 418-422
- [4.57] Vital J.D.: Das Flachdach aus der Sicht des PTT-Fachmannes, Unterlagen zur ERFA-Tagung 1990
- [4.58] PI-BAT: Techniques d'auscultation des ouvrages de génie civil, N° 724.453 f, 1991
- [4.59] Jenni J.-P.: Stand der Technik bei der flächenhaften Erfassung des baulichen Zustandes von Tunnelbauwerken, VSS Forschungsauftrag 59/88, 1990
- [4.60] Österreichisches Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Strassenforschung, Aufsuchen und Sanieren von Lecks in Brückenabdichtungen, Heft 395, Wien 1991
- [4.61] Haack A., Emig K.-F.: Parkdeckabdichtung mit Bitumenwerkstoffen, Bitumen 4/89, S. 162-171

- [4.62] Lohmeyer G., Weisse Wannen – einfach und sicher, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1991
- [4.63] DBV-Merkblatt, Wasserundurchlässige Baukörper aus Beton, Deutscher Beton-Verein e.V., August 1989
- [4.64] Grube H.: Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton, Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Darmstadt, 1982

Chapitre 5: Construction métallique

- [5.1] Wittfoht H.: Building Bridges, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1984
- [5.2] SIA-Dokumentation D 030, Einsatz von «nichtrostenden» Stählen im Bauwesen, 1988
- [5.3] Schmid E.V.: Wetter- und Korrosionsschutz, Curt R. Vincentz-Verlag, Hannover, 1983
- [5.4] Theiler F.P.: Für eine sichere «Haut» beim Stahl, Handelszeitung, Nr. 50, 13.12.1990
- [5.5] Cassady S.: Spanning the Gate – The Golden Gate Bridge, Squarebooks, Mill Valley, CA, 1986
- [5.6] SN 555 001, Protection de surface des constructions métalliques, B3, 1990, Centre suisse de la construction métallique, Zurich
- [5.7] von Baeckmann W.: Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz, Vulkan-Verlag Essen, 4. Auflage, 1987
- [5.8] Korrosionskommission: Richtlinien für Projektierung, Ausführung und Betrieb des kathodischen Schutzes von Rohrleitungen, C1, Ausgabe 1987, Zürich
- [5.9] Korrosionskommission: Regel der Technik-Projektierung, Ausführung und Betrieb des kathodischen Schutzes erdverlegter Lagerbehälter aus Stahl, C5, Ausgabe 1989, Zürich
- [5.10] Haas G. u.a.: Die Stahlüberbauten der Faröbrücken, Dänemark, Stahlbau, Heft 12, Dez. 1985, S. 353-363
- [5.11] Vejdirektoratet, DK: The Superstructure of the Farö Bridges, Part 1, Design of the Steel Superstructure, 1987
- [5.12] Fischer M., Wien B.: Erfahrungen mit Brücken aus wetterfesten Stählen, Stahlbau, 1988

Chapitre 6: Construction en bois

- [6.1] Meierhofer U.: Metallkorrosion in Holz, Schweizer Ingenieur und Architekt, 24/90, S. 696-698
- [6.2] Theiler F.: Korrosionsverhalten mechanischer Verbindungsmittel. 18. Fortbildungskurs der Schweiz. Arbeitsgem. für Holzforschung Ingenieurholzbau / Verbindungen und Verbindungsmittel, 1986
- [6.3] Rückert J.: Korrosionsverhalten von Metallen in Verbindung mit Holz, VDI-Tagung «Korrosion und Korrosionsschutz metallischer Bau- und Installationsteile innerhalb Gebäuden», Mannheim, 1984
- [6.4] Norme SIA 164: Constructions en bois, 1981
- [6.5] EMPA/Lignum: Richtlinie Holzschutz im Bauwesen, 1983/84
- [6.6] Meierhofer U., Sell J.: Mängel und Schäden in wetterbeanspruchten Brettschichtträgern, Publikationsreihe «Baumängel, Behebung und Vorbeugung», Bd. 5, 1982, Baufachverlag Zürich-Dietikon
- [6.7] Meierhofer U., Sell J., Strässler H.: Zur Wetterbeanspruchung tragender Holzbauteile, Ingenieurholzbau in Forschung und Praxis, Bruderverlag Karlsruhe, 1982, S. 67-74
- [6.8] Sell J., Meierhofer U., Kropf F.: Brettschichtholz für den Innen- und Aussenbau, Empfehlung und Sicherstellung der langfristigen Funktionstüchtigkeit, Schweiz. Baudokumentation i4 00200, 1989
- [6.9] Lignum: Reglement: Gütezeichen für druckimprägniertes Holz, 1984
- [6.10] SAH-Fortbildungskurs: Holz in der Renovation, 1985
- [6.11] EMPA/Lignum: Richtlinie Holzzerstörende Insekten und ihre Bekämpfung, 1986
- [6.12] EMPA/Lignum: Richtlinie Der echte Hausschwamm und seine Bekämpfung, 1986
- [6.13] Lignum: Dokumentation Holz, Holzschutz und Oberflächenbehandlung, 1976

Chapitre 7: Construction en pierre naturelle

- [7.1] Tang Huancheng: Ancient Chinese Bridges, Chinese Cultural Relics Publishing House, 1987
- [7.2] Sadler H.: Brücken, Die bibliophilen Taschenbücher, Nr. 498, Harenberg Kommunikation, Dortmund, 1986
- [7.3] Leonhardt F.: Brücken-Ästhetik und Gestaltung, Deutsche Verlagsanstalt, 1984
- [7.4] Norme SIA 178: Maçonnerie de pierres naturelles, 1980
- [7.5] de Quervain F.: Technische Gesteinskunde, Birkhäuser Verlag, Basel, 1967
- [7.6] de Quervain F.: Die nutzbaren Gesteine der Schweiz, Kommissionsverlag: Kümmerly & Frey, Bern, 1969 (z.Zt. in Neubearbeitung)
- [7.7] SBB, Besondere Bestimmungen für die Ausführung des Mauerwerkes der Tiefbauarbeiten, 1924 (vergriffen)
- [7.8] Arnold A. et al: Sumpfkalk – Grubenkalk, ETH Zürich, Institut für Denkmalpflege, Merkblatt Nr. 2, 1979
- [7.9] Arnold A.: Die Mörtel und ihre Herstellung, Vortrag Seminar vom 11.11.88 in Bonn (nicht veröffentlicht)
- [7.10] Schweiz. Baumeisterverband, Richtlinien für die Ausführung von Natursteinmauerwerk (entsprechend den besonderen Bestimmungen der SBB, undatiert, um 1930 (vergriffen)
- [7.11] Schwarz H.: Die Steinbrüche in der Schweiz und ihre Materialien, Dissertation, Universität Zürich, 1983
- [7.12] Krumbein W.E.: Biogene Bauschäden-Anamnese, Diagnose und Therapie in Bautenschutz und Denkmalpflege, Bautenschutz-Bausanierung, Nr. 1/87, S. 14-23, Nr. 3/87, S. 110-117
- [7.13] Bock E.: Biologisch induzierte Korrosion von Naturstein – starker Befall mit Nitrifikanten, Bautenschutz-Bausanierung, Nr. 1/87, S. 24-27
- [7.14] Arnold A.: Moderne alkalische Baustoffe und die Probleme bei der Konservierung von Denkmälern, «Natursteinkonservierung», Arbeitsheft 31, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege München, 1985
- [7.15] Amberg R.: Thermographische Aufnahmeverfahren zur Erkennung des Zustandes von Tunnelauskleidungen, Zeitschrift Tunnel, Sonderausgabe zum Symposium «Sanierung von Tunnelbauwerken», 12./13. März, München, 1987, S. 14-18
- [7.16] Sonderausgabe der Zeitschrift Tunnel zum Symposium «Sanierung von Tunnelbauwerken», München, 12./13. März, 1987
- [7.17] Jolissaint P.: Die Sanierung von Bahntunnels unter dem Aspekt der Besonderheiten und Schwierigkeiten, Technische Akademie Esslingen, Lehrgang Nr. 7115/84 038, Sept. 1984
- [7.18] Furrer B.: Restaurierung von Sandsteinen, Schweizer Ingenieur und Architekt, 42/90, S. 1199-1204
- [7.19] Norme SIA 226: Maçonnerie de pierres naturelles, prestations et fournitures, 1976
- [7.20] Norme SIA 246: Travaux en pierre naturelle, dallages, revêtements, pierres de taille, 1976
- [7.21] CEN, Draft Standard on natural stone blocks, TC 127, WG 1, TG 7, December 1990
- [7.22] Meisel U., u.a.: Naturstein-Erhaltung und Restaurierung von Aussenbauteilen, Bauverlag, Wiesbaden, 1988
- [7.23] Snethlage R.: Messungen zur Dauerhaftigkeit von Hydrophobierungen an Sandsteingebäuden, Bautenschutz-Bausanierung, Sonderausgabe, 1988, S. 16-19, 1. Statusseminar des Bundesministers für Frischung und Technologie «Erhaltung von Naturstein», 17.12 – 18.12.1986, Mainz
- [7.24] Untersuchungen für die Natursteinkonservierung, ISBN 3-8167-4053-7, 183 Seiten, Best. Nr. 4, IRB-Verlag, Stuttgart
- [7.25] Restaurierung von Steinbrücken, ISBN 3-8167-4087-1, 101 Seiten, Best. Nr. 38, IRB-Verlag, Stuttgart
- [7.26] Bernhard F., u.a.: Naturstein in der Denkmalpflege, ISBN 3-87188-140-6, 1012 Seiten, Berufsbildungswerk des Steinmetz- und Bildhauerhandwerks e.V., Wiesbaden, 1991
- [7.27] Eckhardt P.: Naturstein aus der Schweiz und der übrigen Welt – Geschichte und Stand des schweizerischen Natursteingewerbes, Bull-Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. Ing. (101.54, Nr. 126, April 1988, S. 31-37)

9. Annexes

9.1 Index des abréviations

ASE	Association suisse des électriciens
ASPEE	Association suisse des professionnels de l'épuration des eaux
CNA	Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents
IFICF	Inspection fédérale des installations à courant fort
IFP	Inspection fédérale des pipelines
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris
LFEM	Laboratoire fédéral d'essai des matériaux
LIGNUM	Union suisse en faveur du bois
MMR	Management de la maintenance routière
OCF	Office des constructions fédérales
OFR	Office fédéral des routes
SI	Services industriels
SN	Normes suisses (Schweizer Normen)
SSC	Société suisse de protection contre la corrosion
SSIGE	Société suisse de l'industrie du gaz et des eaux
SZS	Centre suisse de la construction métallique
VSS	Union suisse des professionnels de la route

9.2 Crédit photographique

La provenance de la plupart des illustrations figure dans leurs légendes respectives, sauf pour les suivantes:

Chapitre 3:

- 3.9, 3.11, 3.12, 3.14, 3.15: Département des travaux publics du Canton d'Uri, Altdorf

Chapitre 4:

- 4.47, 4.48: Bureau d'ingénieurs cantonal de Nidwald, Stans
- 4.49: Kilcher SA, Recherswil

Chapitre 6:

- Toutes les illustrations sauf 6.1: LFEM, secteur bois, Dübendorf; Lignum, Zurich.

Chapitre 7:

- 7.4: Service des monuments historiques de la ville de Berne
- 7.8 à 7.13: A. Arnold, Institut des monuments historiques, ETH Zurich

Associations de soutien

ASE

**Association suisse
des électriciens**

Sia

**Société suisse
des Ingénieurs et des Architectes**

SLG

**Association suisse
de l'éclairage**



Union technique suisse