

Réparation des ouvrages en béton armé

Partie 1 : Pathologies et diagnostic

Reinforced concrete repair

Part 1 : Pathologies et diagnosis

par **Luc COURARD**

Professeur, PhD, Ingénieur civil des constructions

GeMMe - Laboratoire des Matériaux de Construction, Université de Liège, Liège, Belgique

et **Benoît BISSONNETTE**

Professeur titulaire, PhD, Ingénieur

Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton, Université Laval, Québec, Canada

Résumé

La réparation des bétons nécessite non seulement une bonne connaissance du support à réparer, des matériaux de réparation et de l'environnement dans lequel ils vont être mis en œuvre, mais aussi une compréhension des mécanismes à la base de l'adhésion. Les compatibilités dimensionnelle, électrochimique, chimique et porosimétrique (perméabilité) sont les clés de la réussite et de la durabilité de la réparation. Dans cette première partie, une analyse du patrimoine bâti en jeu et des stratégies d'intervention possibles est d'abord proposée. L'accent est mis ici sur l'étude des effets et des causes des dégradations affectant les ouvrages en béton armé: fissuration, épaufures et désintégrations sont les principaux types de défauts de surface observés, en lien très souvent avec la corrosion des armatures en acier sous-jacentes. Un diagnostic juste permettra de définir les techniques d'intervention et les produits de réparation les mieux adaptés (Partie 2).

Abstract

Repair of concrete not only requires knowledge of the support to repair, the repair materials and the environmental conditions in which they will be implemented, but also an understanding of the mechanisms underlying adhesion. Dimensional, electrochemical, chemical and porosity (permeability) compatibilities are the key to the success and durability of the repair. In a first part, an analysis of the patrimonial heritage at stake and the possible intervention strategies is proposed. The emphasis is put here on the study of the effects and causes of deterioration affecting reinforced concrete structures: cracking, spalling and disintegration are the main types surface defects observed, most often in connection with corrosion of the underlying steel reinforcement. A proper diagnosis will allow selecting the most suitable repair techniques and materials (Part 2).

Mots-clés / *Keywords* :

	français	anglais
Technologies impliquées	Adhérence, réparation	<i>Adhesion, repair</i>
Domaines d'application	Bâtiments et travaux publics, béton armé	<i>Buildings and civil engineering, reinforced concrete</i>
Type d'article	Etat de l'art	<i>State of the art</i>

Description du contenu	Béton armé, dégradations, réparation	<i>Reinforced Concrete, degradations, repair</i>
-------------------------------	--------------------------------------	--

Table des matières

1	<i>Nature et situation globale du patrimoine bâti</i>	4
1.1	Valeur économique et maintenance	4
1.2	Patrimoine culturel et historique	6
1.3	Stratégie d'intervention : forme et timing	8
2	<i>Principales pathologies des bétons armés</i>	10
2.1	Causes et effets des dégradations	10
2.1.1	Fissurations	12
2.1.2	Epaufures	14
2.1.3	Désintégration	15
2.2	Corrosion des armatures	16
2.2.1	Principes et conditions de la corrosion	16
2.2.2	Carbonatation	18
2.2.3	Diffusion des ions chlores	19
2.3	Mécanismes à la base de la désintégration des bétons	20
2.3.1	Dissolution par attaque acide	20
2.3.2	Attaque sulfatique	20
2.3.3	Gel-dégel	21
2.3.4	Réaction alcali-granulat	22
2.4	Diagnostic	22
2.4.1	Introduction	22
2.4.2	Procédures en cas d'épaufures et fissurations	23
2.4.3	Procédures en cas de désagrégation	24
2.5	Conclusions	24
Conclusion		26
Remerciements		26

Introduction

Les problèmes principaux que posent l'étude et l'exécution des ouvrages de génie civil et des bâtiments sont bien connus et, en général, étudiés avec soin. Les normes servant de référence offrent des sécurités suffisantes et les hypothèses de calcul vont dans le sens de la prudence.

Il en résulte que l'effondrement d'un ouvrage, mis à part le cas d'un accident pendant la construction, est un événement extrêmement rare.

Néanmoins, de nombreux ouvrages, pourtant parfaitement appropriés aux charges qu'ils supportent, ne manquent pas de poser de graves problèmes d'entretien pendant leur durée de service.

De plus, des problèmes récurrents apparaissent sur des ouvrages de même nature, de même époque ou de même conception. Les dégâts peuvent résulter de l'emploi involontaire mais répété de dispositifs de construction inappropriés, de méthodes de conception ou d'exécution mal adaptées, de matériaux inadéquats.

Cette utilisation répétée de dispositifs, de matériaux ou de méthodes qui ne donnent pas satisfaction provient aussi du fait que l'ingénieur qui conçoit et l'entrepreneur qui exécute ne se rendent pas compte des difficultés qu'ils créent et n'apportent donc pas les rectifications qu'il faut pour les travaux ultérieurs. Cet état de fait est explicable, même si non excusable : la conception, la construction et l'entretien des ouvrages ou des bâtiments sont généralement confiés à des services ou des entreprises différents. Les contacts entre corps de métier sont souvent mal organisés

ou tout simplement inexistant.

Quoiqu'il en soit, il est une constatation indubitable : le béton, comme tous les autres matériaux, subit l'outrage du temps. Il se fissure, se désagrège ou éclate sous l'effet de sollicitations physiques, mécaniques et chimiques. Il convient donc de l'entretenir, de le réparer voire de le démolir si le mal est incurable.

On aura compris qu'une étude solide de l'environnement dans lequel le matériau sera utilisé ainsi que des conditions de mise en œuvre sont les premières précautions à prendre. L'entretien et la maintenance constituent la deuxième étape de la gestion « en bon père de famille ». La « réparation » représente une intervention plus conséquente au niveau de l'ouvrage ou du matériau.

La réparation des ouvrages d'art, bâtiments, routes, etc. en béton armé est une opération qui devient maintenant habituelle. Le béton reste un matériau performant et durable, mais l'explosion de la construction au sortir de la seconde guerre mondiale a été telle que le nombre d'infrastructures et de bâtiments dégradés nécessitant aujourd'hui une intervention augmente de façon exponentielle.

A l'interface entre la science et l'ingénierie des matériaux, les systèmes et techniques de réparation doivent être choisis dans une optique à court terme – il faut rendre à un ouvrage ses capacités originelles – mais aussi à plus long terme car il s'agit de lui assurer une nouvelle vie. L'atteinte de ces objectifs repose sur une appréciation juste et suffisamment précise de la condition des éléments. Le diagnostic constitue ainsi une opération fondamentale de tout travail de réfection d'un ouvrage en béton armé.

réparation : opération de remise en état d'un élément ou d'un ouvrage dégradé,

restauration : opération de rétablissement de l'ouvrage à son état originel, avant sa mise en service,

renforcement : ensemble des travaux visant à préparer l'ouvrage à une exploitation plus intensive en tenant compte des sollicitations mécaniques, thermiques ou chimiques. Chacune de ces sollicitations peut prendre un caractère permanent ou non, de courte ou de longue durée, statique ou dynamique.

1 Nature et situation globale du patrimoine bâti

1.1 Valeur économique et maintenance

Le patrimoine bâti (public et privé) représente pour un pays une valeur qui atteint plusieurs milliers de milliards de dollars. A titre d'exemple, une étude entreprise en Belgique en 1983 a montré que la valeur de reconstruction de 3684 ponts gérés par le Ministère des Travaux Publics s'élevait à 3,5 milliards d'euros tandis que des sommes de 350 milliards et 480 milliards représentaient respectivement la valeur des 1.400 km d'autoroutes et 12.000 km de routes gérées par ce Ministère. Une estimation actualisée [1] parle d'un patrimoine de 1.650 millions d'Euros.

En Amérique du Nord [2], de sérieux problèmes de durabilité du béton affectent un très grand nombre de structures et, tout particulièrement, celles qui sont associées au réseau routier, même si d'autres types de structures tels que barrages, produits en béton (pavés, tuyaux, regards d'égout, etc.) sont aussi dégradés.

Aux États Unis seulement, on estime que les coûts de réparation des structures en béton endommagées par les cycles gel-dégel ou la corrosion des aciers d'armature

sont de 16 à 24 milliards de dollars (2005). Chaque année, c'est environ 400 millions de dollars supplémentaires qui s'ajoutent à cette liste.

Au Québec [3], on observe à peu près les mêmes problèmes mais à une échelle plus petite. C'est par centaines que l'on peut compter les structures ou les parties de structures (ponts, ponceaux, viaducs, tabliers de pont et trottoirs, stationnements multi-étages) qui doivent être réparés ou reconstruits en raison de leur état avancé de détérioration. Dans la majorité des cas, on pourrait démontrer que les coûts de réparation et d'entretien des structures endommagées en viennent rapidement à dépasser les coûts initiaux de construction. Au Québec, le service d'entretien du Ministère des Transports réserve plus de la moitié de son budget pour l'entretien des structures en béton dont l'endommagement est relié à la corrosion des aciers d'armature.

Au Canada, on estime à environ cinq milliards de dollars le coût de réparation des stationnements multi-étages urbains affectés par des problèmes de corrosion [4].

L'endommagement des infrastructures a aussi un effet sur la qualité de vie des usagers et sur l'activité socio-économique de toute une région. On peut notamment citer :

- interruption de la circulation;
- réduction de la capacité de service;
- retards;
- embouteillages;
- baisse de la performance du transport en général.

L'O.C.D.E. (Organisation de Coopération et de Développement Économiques) a estimé que, pour assurer la maintenance, la protection et la réparation du patrimoine bâti, il faudrait y consacrer annuellement un budget équivalent à 0,5 à 2 % de sa valeur de reconstruction.

Cette activité représente donc un marché considérable pour l'industrie de la construction. Plusieurs intervenants y participent : il s'agit principalement des propriétaires ou des gestionnaires (privés et publics), des bureaux d'études, des laboratoires d'essais et de contrôles, des entrepreneurs généraux et spécialistes, des fournisseurs de matériaux, des compagnies d'assurances, des organismes financiers, etc. Cette activité s'appuie sur des données techniques et économiques puisque ces deux types d'informations sont à considérer pour chaque intervenant d'une opération de réparation ou de maintenance. La forme de l'intervention va aussi dépendre du patrimoine considéré.

Il existe plusieurs moyens de classer le patrimoine bâti. On distingue, par exemple, des classements établis selon :

- la nature du patrimoine : les routes, les ponts et autres ouvrages d'art, les voies hydrauliques, les réseaux d'assainissement, les bâtiments résidentiels ou commerciaux, les bâtiments et les structures industrielles (cheminées, réservoirs, etc.), les bâtiments et monuments historiques, etc.
- l'âge du patrimoine;
- le matériau principal constituant ce patrimoine : structures en béton, en maçonnerie, en métal, etc.

Ce patrimoine perd progressivement sa valeur, soit parce qu'il se détériore pour diverses raisons, soit qu'il s'use (routes, égouts, sols industriels, etc.), soit qu'il n'est plus adapté à l'usage pour lequel il était prévu (insuffisance mécanique, insuffisance fonctionnelle ou autre, etc.), soit pour des raisons esthétiques, etc.

Les dégradations proviennent de multiples causes qui trouvent leurs origines dans :

- les effets des environnements (pluies acides, sels de déneigement, atmosphères industrielles ou maritimes, effets du gel, etc.);
- des actions exceptionnelles (tremblement de terre, incendie, percussions de

- véhicules, etc.);
- les sollicitations de service (usure, fatigue, etc.);
 - des erreurs de conception et/ou d'exécution de la construction qui accentuent les actions décrites ci-avant.

Ces sollicitations, qui peuvent agir en synergie, entraînent une diminution des propriétés ou des performances de la construction, ce qui limite sa durée de vie.

1.2 Patrimoine culturel et historique

Le patrimoine en béton n'est pas que fonctionnel. On retrouve également une typologie du patrimoine en béton dans les bâtiments industriels [5], les lieux de loisirs, les édifices religieux [6], les établissements scolaires, les habitations et, finalement, le génie civil [7]. On pourrait y ajouter les constructions militaires, les monuments funéraires et commémoratifs, les édifices civils (hôtels de ville, beffrois), etc.

Le *domaine industriel* a largement usé du béton. A l'avènement de l'ère industrielle, les bâtiments sont faits de briques. Ils sont austères et fonctionnels. Pour contrer les dégâts des incendies, l'acier est de plus en plus utilisé mais il est aussi de plus en plus cher. C'est pourquoi, au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, le béton armé apparaît comme une solution. Il est résistant au feu, bon marché et il permet l'ouverture de grands espaces. Ce changement de matériau n'induit pas, pour autant, un changement esthétique. Le fonctionnalisme reste de mise (Fig. 1).



Figure 1 – Anciennes brasseries Wielemans, Forest, Belgique (Arch. A. Blomme, 1932) [8].



Figure 2 – Maison du Peuple, Dour, Belgique (Arch. A. Van Craenenbroeck, 1927-1929) [8].

Les *maisons du Peuple* servent de lieux de rencontre au prolétariat (Fig. 2). Aucun style propre à ces maisons ne se dégage. Néanmoins, dans les années 1920-1930, l'Art déco a la cote. L'explication réside sans doute dans le fait que ce type d'architecture accepte de grands murs aveugles. Ceux-ci sont nécessaires pour répondre à la fonction de cinéma que ces cercles remplissent de plus en plus souvent.

D'autre part, les piscines couvertes se développent, même si leur origine est plus précoce. Le premier édifice construit en Belgique l'a été à Verviers, en 1868. De la même façon, les cinémas (Fig. 3) vont couvrir le territoire et assurer le développement des loisirs pour tous.



Figure 3 – Cinéma Le Varia (Art Nouveau), Charleroi, Belgique (Arch. Claes, 1913).



Figure 4 – Cathédrale *Saint Mary of the Assumption*, San Francisco (Arch. P.L. Nervi, Photo Nicolas Janberg, Structurae 2005).

La construction d'églises (Fig. 4) est liée à la création de nouveaux quartiers et est souvent inspirée de la modernité (le Bauhaus mais aussi Le Corbusier).

En 1933, le 3^{ème} congrès du CIAM – Congrès international d'Architecture moderne – voit dans la construction en hauteur la solution aux problèmes de logements [8]. La pratique relaiera la théorie dans les années 1950. Dès les années 1970, cette pratique est remise en cause, c'est la fin de la construction d'habitations en hauteur. Un problème spécifique dans la réparation d'œuvres architecturales réside notamment dans le droit d'auteur. La loi sur les droits d'auteur protège les œuvres d'architectes à titre de « créations de l'esprit » pour autant qu'elles témoignent d'un caractère original et qu'elles portent l'empreinte de l'auteur, quel qu'en soit le style [9]. L'originalité d'une œuvre architecturale est liée aussi bien à sa structure qu'à son enveloppe, à l'aménagement de ses espaces intérieurs qu'à son intégration dans l'environnement.

Puisque de ces particularités découlent généralement l'intérêt de la construction, le

patrimoine en béton classé entre généralement dans la catégorie des œuvres protégée par les droits d'auteur. La loi donne, pendant septante (soixante dix) ans ou plus (suivant le pays) après la mort de l'auteur, des priviléges exclusifs qui peuvent rentrer en conflit avec la procédure administrative liée à la restauration.

1.3 Stratégie d'intervention : forme et timing

La durée de vie d'un ouvrage (TV) est déterminée par la diminution maximale admissible d'une ou de plusieurs performances choisies [10]. En-dessous de cette valeur, la stabilité, la sécurité, l'aspect esthétique ou les performances fonctionnelles, ne sont plus suffisantes (Fig. 5) et une action est à entreprendre d'urgence.

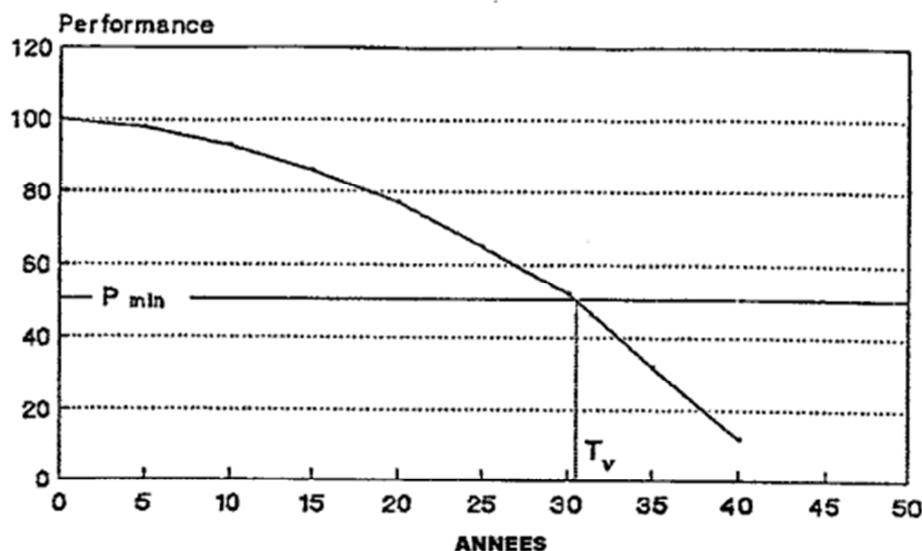


Figure 5 – Durée de vie et évolution des performances d'un ouvrage avec le temps.

Des sollicitations exceptionnelles peuvent entraîner une ruine immédiate de l'ouvrage ou raccourcir sa durée de vie (Fig. 6) : un tremblement de terre, un incendie, le passage d'un convoi en surcharge sont à considérer comme des sollicitations exceptionnelles.

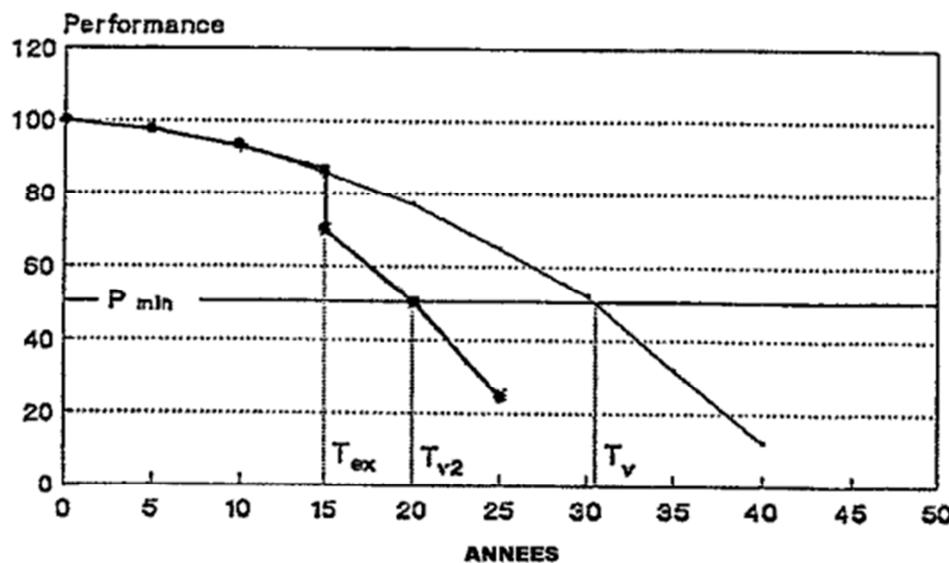


Figure 6 – Durée de vie et effet de sollicitations exceptionnelles sur l'évolution des performances d'un ouvrage avec le temps.

Au contraire, la durée de vie d'un ouvrage pourra être accrue (de TV à TV2) en augmentant la performance initiale à la construction. Le passage de la performance P1 à la performance P2 (Fig. 7) s'accompagne d'un coût additionnel. En prévoyant une protection supplémentaire pour l'ouvrage, on diminuera l'effet de l'environnement agressif et on augmentera la durée de vie (TV à TV3).

L'influence du choix au niveau des performances (P1 ou P2) et des coûts qui y sont associés est à étudier en fonction du taux d'intérêt, de la durée de vie prévue (TV2 et TV3 – Fig. 7) et des autres facteurs affectant l'utilisation de l'ouvrage.

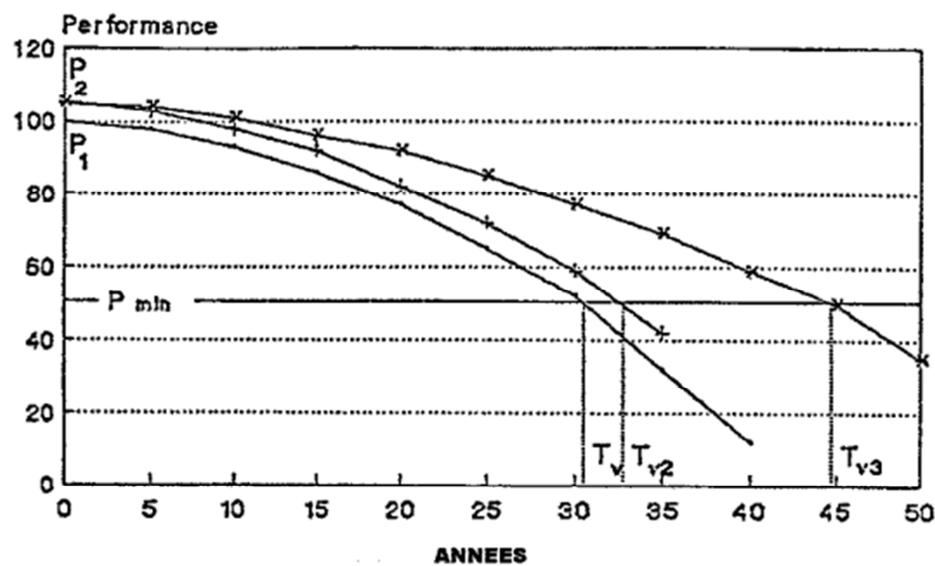


Figure 7 – Effet de l'augmentation des performances initiales sur la durée de vie d'un ouvrage.

La durée de vie peut également être accrue en réparant la construction après une certaine durée d'utilisation (TR), en portant la performance de P' à P'' (Fig. 8).

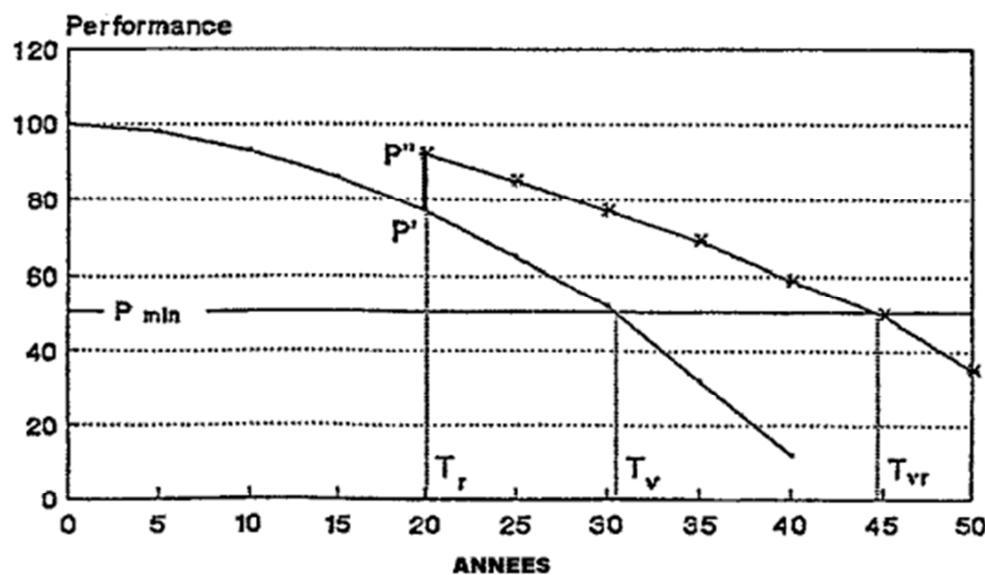


Figure 8 – Effet d'une intervention P'' (p.e. opération de maintenance) sur la durée

de vie d'un ouvrage.

Une étude sera entreprise en vue d'évaluer l'effet économique de l'opération de réparation au temps TR. Il sera aussi utile d'évaluer l'intérêt économique de renforcer l'ouvrage en portant la performance à P''' (Fig. 9). Les coûts des opérations ne sont pas nécessairement proportionnels aux différences ($P'' - P'$) et ($P''' - P'$) car une partie du coût des travaux (installation du chantier, échafaudage, etc.) n'augmente pas proportionnellement avec le gain de performance recherché.

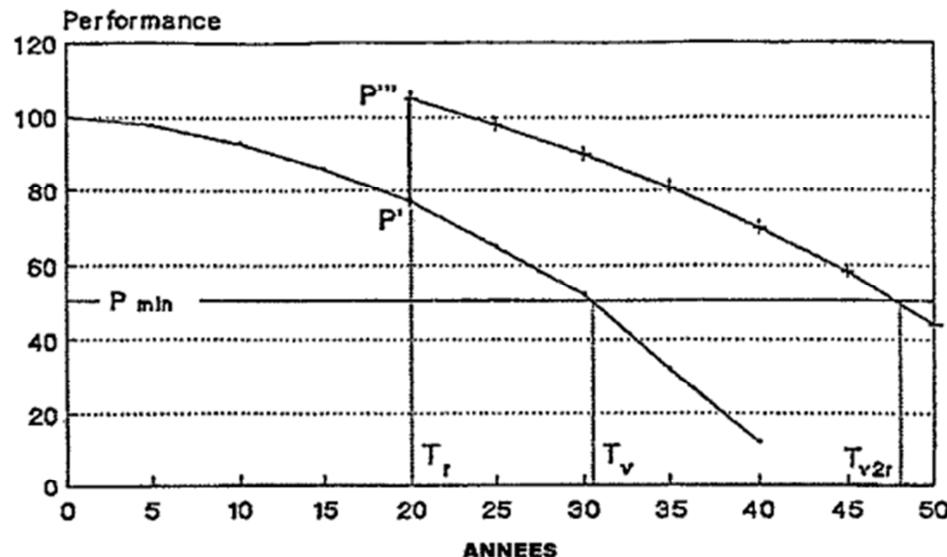


Figure 9 – Effet d'une intervention ($P''' > P''$) sur la durée de vie d'un ouvrage.

Il s'agit de choisir le paramètre TR et le niveau ($P'' - P'$) ainsi que les autres choix concernant la technique et les matériaux de réparation.

2 Principales pathologies des bétons armés

2.1 Causes et effets des dégradations

La cause principale des pathologies du béton armé et précontraint est l'eau : elle intervient dans pratiquement tous les mécanismes de dégradations. Quant aux dégradations, on les classe habituellement en 3 grandes catégories : fissures, épaufures, désagrégations. Après avoir procédé aux examens concernant le matériau et le micro-environnement, on est confronté alors au problème de définir la ou les cause(s) de ces dégradations [11].

Le problème est doublement complexe car, d'une part, des dégradations telles que des fissures peuvent être dues à une dizaine de causes et, d'autre part, une cause peut donner plusieurs types de dégradations (Tableau 1).

Afin de disposer d'indications permettant d'établir un diagnostic, il est utile de dresser un tableau des diverses causes de dégradations du béton ou de l'élément en béton.

A ce stade, survient une autre difficulté en ce qui concerne le classement des causes. On peut, par exemple, les classer dans un ordre chronologique d'apparition de la dégradation ou en fonction de la nature de la cause (physique, chimique, thermique, biologique, etc.). Un autre classement pourrait être effectué en se basant sur la responsabilité de l'intervenant, selon que l'erreur a été commise au niveau de :

- prescripteur (calcul, choix des matériaux, techniques, détail);
- entrepreneur (non-exécution selon les prescriptions);
- fournisseur de matériaux.

Les causes de dégradations reprises au tableau 1 sont précisées en fonction de l'âge du béton, en spécifiant s'il s'agit d'une cause inactive (x) ou active (xx)¹ au moment de l'observation (quelques mois ou années après la période de construction). (préciser ces termes actifs et inactifs ici)

Plusieurs causes peuvent agir successivement. Par exemple, la ségrégation du béton provoque des fissures, qui seront un facteur d'accélération de la corrosion des armatures qui traversent ou se trouvent à proximité de ces fissures mais aussi un facteur de concentration des tensions mécaniques dans une zone particulière (changement brusque de la section de l'élément).

D'autre part, une cause peut avoir plusieurs origines. La corrosion des armatures peut être due à un enrobage insuffisant (erreur lors de l'étude ou lors de la mise en œuvre ou erreur de composition du béton (haute teneur en chlorures)). Les surcharges mécaniques locales peuvent être dues à :

- une erreur au cours de l'étude (sous-estimation des sollicitations mécaniques ou erreur de calcul);
- une modification des conditions d'utilisation (situation inconnue au moment de l'étude);
- une modification des fondations ou du support.

Tableau 1 - Causes des dégradations

Causes des dégradations	Effets			
	Fissure	Epafrure	Désagrégation	Activité
A. Causes survenant avant durcissement : 1) ségrégation du béton 2) ressage 3) retrait à l'état plastique	x x x			x x x
B. Causes survenant au début et pendant le durcissement 1) modification du support ou du coffrage 2) effet du gel sur béton jeune 3) retrait	x x x	x x	x	x x x

¹ Tout au long de cette section, le caractère inactif (x) ou actif (xx) des différentes causes est généralement indiqué avec la même notation. Une cause inactive constitue un événement antérieur qui n'a plus d'autre effet que la cause observée et n'entraînera pas directement d'autres effets.

C. Causes survenant après durcissement :				
1) effet thermique - déformation empêchée/différentielle - gel/dégel - incendie	x x	x x x	x x	xx xx x
2) effet de l'eau - effet absorption d'eau/séchage (+ déformation empêchée ou différentielle)	x	x		xx
3) effet chimique - attaque en surface - réaction chimique avec expansion	x	x	x x	xx xx
4) corrosion des armatures	x	x		xx
5) surcharge mécanique/ concentration de tension - statique - dynamique - impact et tremblements de terre - érosion	x x x	x x x	x	xx xx x xx

2.1.1 Fissurations

La figure 10 illustre les principales causes de fissuration dans un ouvrage en béton.

2.1.1.1 Fissures apparaissant avant le durcissement

Elles peuvent être dues à des mouvements des supports à un moment où le béton n'est plus suffisamment fluide pour refermer la fissure :

- déplacement du coffrage (x);
- affaissement du sol/support (x).

La ségrégation du béton à l'état plastique (x) est aussi une cause de fissuration. Les granulats se déplacent par gravité et leur mouvement est perturbé par :

- une armature : ce qui provoque une fissure au-dessus de l'armature si la ségrégation est très importante; si elle est plus limitée, il y a formation d'un creux sous l'armature;
- un lit d'armature : les granulats au-dessus de l'armature ne peuvent pas passer facilement entre les mailles de l'armature; il se crée un espace vide sous le lit de l'armature (ce qui réduit considérablement l'efficacité et la durabilité de l'armature et du béton).

L'une des causes les plus importantes de la fissuration au jeune âge reste toutefois le retrait du béton à l'état plastique (x) : puisque l'eau en excès s'évapore, le volume du béton diminue. Si celui-ci est empêché de se déformer et il y a formation de fissure. Il y a un âge critique pour lequel la déformabilité du béton est minimale. Une dernière cause est l'effet du gel sur du béton jeune (vert).

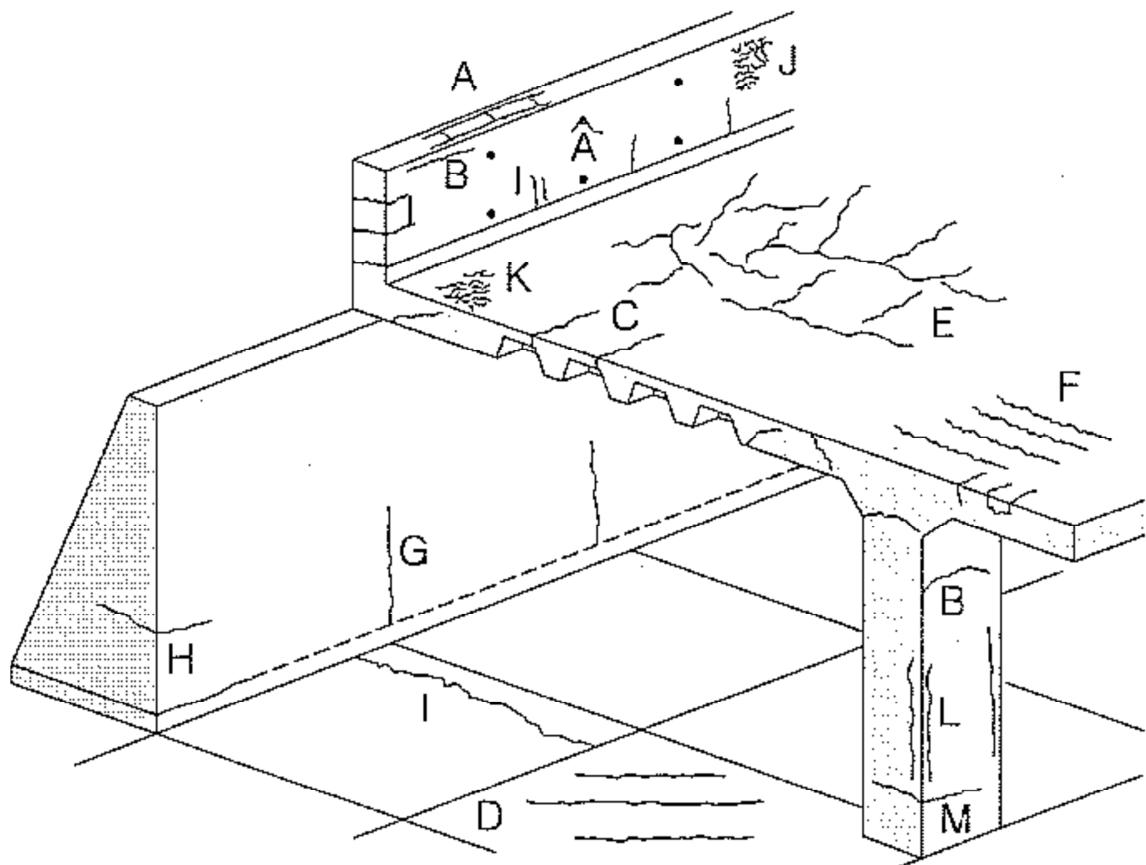


Figure 10 – Schéma de fissurations fréquentes dans les ouvrages en béton.

- A, B, C : fissures de tassement plastique
- D, E, F : fissures de retrait en phase plastique
- G et H : fissures résultant du retrait du béton jeune
- I : fissures dues au retrait de séchage à long terme
- J et K : faïençage causé par un retrait différentiel
- L et M : fissures dues à la corrosion des armatures

2.1.1.2 Fissures survenant au début du durcissement

Outre le retrait de durcissement (x), le retrait thermique initial (x) est une cause importante de fissuration. Du fait du caractère exothermique des réactions d'hydratation du ciment, il y a échauffement de la masse de béton. A ce stade, on peut encore distinguer deux effets distincts. La température n'étant pas uniforme dans toute la masse du béton, la zone centrale restant plus longtemps chaude, les zones extérieures en refroidissant sont soumises à une contrainte de traction qui peut provoquer une fissuration.

Un autre phénomène vient s'y superposer si l'élément est solidaire d'un autre élément inerte. La masse du béton arrivée à température maximale va refroidir. Ce retrait va induire des contraintes de traction dans le béton.

2.1.1.3 Fissures survenant après le durcissement

Les fissurations survenant dans des ouvrages en béton après le durcissement sont principalement de 3 origines :

- Effet thermique externe (xx)
 - variation journalière, saisonnière;
 - retrait empêché;
 - cycles gel-dégel;
 - incendie (x);
- Effet de l'absorption d'eau (gonflement du béton lors de l'absorption d'eau et retrait au séchage) (xx)
- Réactions chimiques expansives (xx)

- réactifs externes (réactions sulfatiques);
- réactifs internes (réaction alcali-granulats réactifs) (Fig. 11).



Figure 11 – Effets de réaction alcali- granulats combinées aux cycles de gel-dégel.

Les surcharges mécaniques accidentelles (x) ou permanentes - statique (fluage (xx)) ou dynamique (fatigue (xx)) - peuvent également causer des dommages importants dans les structures.

Enfin, la corrosion et le gonflement des armatures (xx) représentent une part importante des fissurations et des épaufures, qui en sont souvent la suite logique.

2.1.2 Epaufures

On peut classer les épaufures sur base de 3 causes principales :

- effets thermiques
 - variation thermique externe (xx);
 - cycles gel-dégel (xx);
 - effet du gel sur le béton jeune (x);
 - incendie (x);
- effets mécaniques
 - surcharges mécaniques accidentelles (x);
 - surcharge mécanique courante (xx);
- effets physico-chimiques
 - corrosion et gonflement des armatures (xx) (Fig. 12);
 - réactions chimiques expansives mais sollicitations de compression (xx).



Figure 12 – Effets de la corrosion des armatures.

2.1.3 Désintégration

La désintégration des bétons relève de 3 causes principales (Fig. 13).

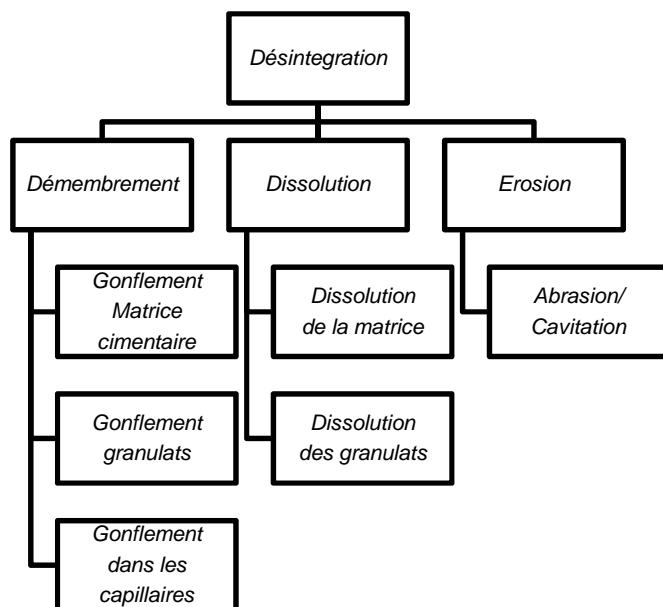


Figure 13 – Modes et effets de la désintégration des bétons

On distingue deux causes principales de la désagrégation des bétons :

- effets thermiques
 - effet du gel sur le béton jeune (x);
 - cycles gel-dégel (xx) (Fig. 14);
 - incendie (x);
- effets mécaniques
 - érosion (xx);
- effets physico-chimiques
 - réactions chimiques expansives ou non. Ces réactions sont actives ou inactives selon que les réactifs chimiques extérieurs ont ou n'ont pas été éliminés (protection ou changement d'affectation de la construction).



Figure 14 – Effets des cycles de gel-dégel.

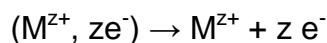
2.2 Corrosion des armatures

La corrosion des armatures et la cause principale des épaufures du béton armé.

2.2.1 Principes et conditions de la corrosion

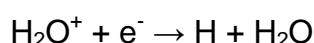
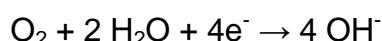
La corrosion des matériaux métalliques à température ambiante ou relativement peu élevée est essentiellement due à l'eau liquide venant à leur contact [12]. La phase aqueuse peut être neutre, acide ou basique. La corrosion aqueuse est un processus électrochimique qui voit son origine dans le caractère de conduction électrique des deux phases en présence : conduction électronique dans la phase métallique et conduction ionique dans la phase aqueuse, appelée aussi électrolyte. Les réactions électrochimiques permettent les transferts de charge au niveau de l'interface entre le métal (électrode) et l'électrolyte.

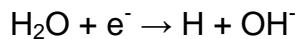
Sur certaines zones de l'interface métal - électrolyte, le métal s'oxyde sous la forme d'ions chargés positivement (ou cations) qui passent en solution dans le liquide ou sous forme de composés solides tels que des oxydes qui restent sur le métal [13]. La réaction d'oxydation du métal (réaction anodique) peut s'écrire ainsi :



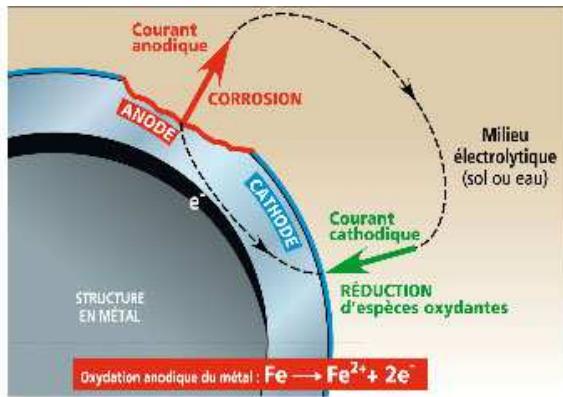
où M représente le métal, M^{z+} est le cation métallique à la valence z.

Cette réaction d'oxydation libère des électrons qui doivent être consommés pour assurer la neutralité électrique. C'est pourquoi une ou plusieurs réactions de réduction d'espèces chimiques oxydantes (réactions cathodiques) présentes dans la phase aqueuse ont nécessairement lieu simultanément à l'interface. Les réactions cathodiques les plus courantes sont les réductions de l'oxygène dissous, des ions H_3O^+ ou de l'eau :





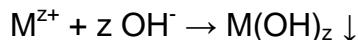
Ce processus constitue une pile de corrosion dans laquelle le courant dit anodique va du métal vers la phase aqueuse aux endroits où il se corrode (zones anodiques) et le courant dit cathodique entre dans le métal aux endroits où le ou les espèces oxydantes se réduisent (zones cathodiques) (Fig. 15). En l'absence de courant électrique extérieur les courants anodique et cathodique sont égaux et de sens opposés [14].



La pile de corrosion

Figure 15 – Formation d'une pile à la surface de l'acier (<http://www.protectioncathodique.net/la-corrosion-aqueuse.php>).

Les produits des réactions (1) et (2) sont des ions qui peuvent rester en solution ou réagir pour donner un précipité (produit de corrosion) selon la réaction :



Dans le cas des aciers ordinaires, on forme ainsi de la rouille. Dans certains cas (acières inoxydables par exemple) il se forme une couche d'oxyde protectrice de très faible épaisseur (quelques nanomètres) : on parle alors de "passivité" et la vitesse de corrosion résiduelle est très faible. La vitesse de corrosion d'un métal est donc directement liée à l'intensité des réactions anodiques et cathodiques qui se déroulent à l'interface. Le flux d'électrons, qui est donc le courant de corrosion, est lié, par la loi de Faraday, à la quantité de métal oxydé.

De ce fait la vitesse de corrosion d'un métal peut s'exprimer de diverses manières : en courant de corrosion (par exemple en microampères par cm^2), ou en masse de métal oxydée par unité de temps et par unité de surface (par exemple mg par dm^2 et par jour) ou encore en épaisseur de métal oxydée par unité de temps (par exemple μm par an). Pour l'acier ordinaire on a sensiblement la correspondance suivante :

$$1 \mu\text{A}/\text{cm}^2 = 1 \mu\text{m}/\text{mois} = 2,5 \text{ mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{jour}$$

ou encore

$$1 \text{ mm/an} = 7,8 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{an} = 860 \text{ mA}/\text{m}^2$$

La thermodynamique permet de prévoir les domaines de stabilité des espèces chimiques présentes dans un système de corrosion. Les diagrammes potentiel pH (diagrammes de Pourbaix), ainsi obtenus sont des auxiliaires précieux pour

connaître l'influence d'une variation de pH ou de potentiel sur les domaines de stabilité ou de prédominance des ions ou composés considérés (Fig. 16).

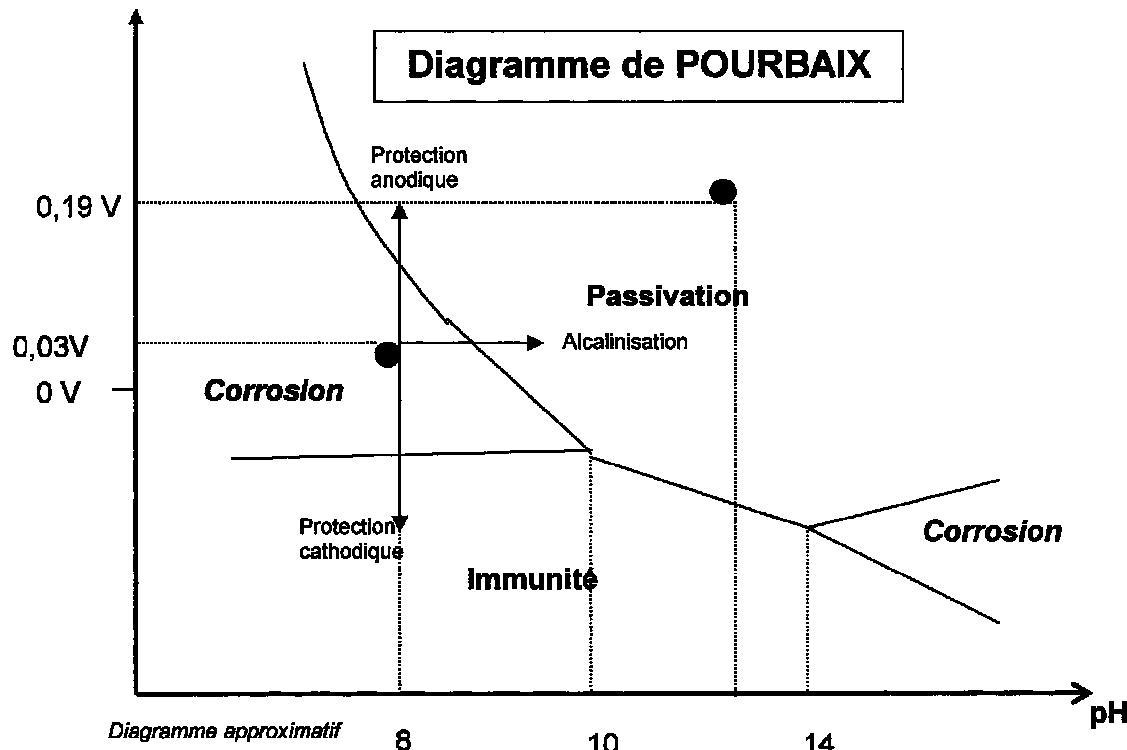


Figure 16 – Diagramme de Pourbaix pour le fer (www.algor-expertises.com).

2.2.2 Carbonatation

La carbonatation des bétons est un processus lié à la réaction de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$, produit au moment de l'hydratation du ciment, avec le CO_2 de l'air [15]. La transformation de l'hydroxyde en carbonate de calcium CaCO_3 s'accompagne d'une augmentation de la résistance en compression du béton mais surtout d'une diminution du pH de la solution interstitielle qui passe de 12-13 à 9-10 : si ce phénomène n'a pas de conséquence majeure pour le béton, il n'en n'est pas de même pour l'armature en acier noyée dans ce dernier. L'acier, qui était passivé grâce au pH élevé, se retrouve dans une zone de non passivation, ce qui a pour effet de remettre en route le processus de corrosion et la formation de rouille [16].

La manifestation visible de ce phénomène est l'apparition d'épaufrures à la surface du béton, avec décollement de la zone de béton au-delà de l'armature et laissant apparaître cette dernière en fond de la zone dégradée (Fig. 17).



Figure 17 – Dégradation liée à la carbonatation des bétons.

2.2.3 Diffusion des ions chlores

Les ions chlore viennent principalement des environnements marins et de l'utilisation de sels de dé verglaçage en période hivernale. Ils ont besoin de l'eau pour être transportés par diffusion ou advection dans la porosité des bétons, même si la voie principale de pénétration reste les fissures existantes [16,17]. Ce mode de transport génère des attaques localisées (alors qu'elles sont plus diffuses dans le cas de la carbonatation) qui peuvent causer des réductions de section de l'armature, particulièrement dangereuses dans le cas de la précontrainte (Fig. 18).



Figure 18 – Dégradation liée à l'effet des ions chlores.

Il existe également des situations dans lesquelles les ions sont dans le béton à l'origine : il s'agit de bétons fabriqués à partir de granulats ou sables marins non lavés, ou dans lesquels des accélérateurs de prise à base de chlorures de calcium ont été utilisés, en particulier en cas de travaux en période hivernale.

2.3 Mécanismes à la base de la désintégration des bétons

2.3.1 Dissolution par attaque acide

Les phénomènes de dissolution par attaque acide [13] sont liés à une réaction acide-base avec les éléments basiques du béton, principalement la chaux sous forme de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Le sel produit est dissout dans l'eau et le mécanisme continue si l'apport d'acide continue, avec dissolution de la pâte et déchaussement éventuel des granulats (Fig. 19).



Figure 19 – Attaque acide produite par le vin sur un béton.

Si le liquide contenant l'acide est en mouvement, le mécanisme de dissolution est accéléré.

2.3.2 Attaque sulfatique

Les attaques sulfatiques peuvent être internes ou externes au béton. Elles procèdent généralement en deux étapes :

Etape 1 : sulfate de calcium (eaux agressives) + portlandite (pâte de ciment)

→ gypse secondaire

Etape 2 : gypse secondaire + aluminales tricalciques (pâte de ciment)

→ ettringite secondaire

Le gypse secondaire et l'ettringite sont des produits expansifs, qui engendrent progressivement un éclatement et une décohésion du béton (Fig. 20). Ce même genre de phénomène, connu sous le nom de formation différée d'ettringite, peut se

produire en interne, sans sulfates de calcium extérieurs, dans le cas d'un environnement humide et de conditions extérieures induisant une température élevée dans le béton [18].



Figure 20 – Désintégration du béton par attaque sulfatique dans un bassin de stockage d'eaux usées.

2.3.3 Gel-dégel

L'eau est un des rares éléments de la nature à avoir un volume plus important à l'état solide qu'à l'état liquide (pour une masse équivalente). Dans l'eau solide, les molécules s'organisent en mailles moléculaires de forme hexagonale, générant beaucoup plus de vide entre elles : la masse ne change pas quand elle se solidifie mais son volume varie et augmente d'environ 10 %.

Lorsque l'eau pénètre dans les pores du béton, les forces d'adhésion capillaires abaissent le point de congélation : l'eau contenue dans les pores les plus fins ne se transforme en glace qu'à une température loin au-dessous de 0 °C. La glace se forme donc d'abord dans les pores les plus grands et, ensuite, lors d'un abaissement plus poussé de la température, dans les plus petits [19].

Néanmoins, l'expansion de l'eau dans la porosité des bétons provoque l'apparition de contraintes qui peuvent engendrer un écaillage progressif du béton, à partir de la surface (Fig. 21).

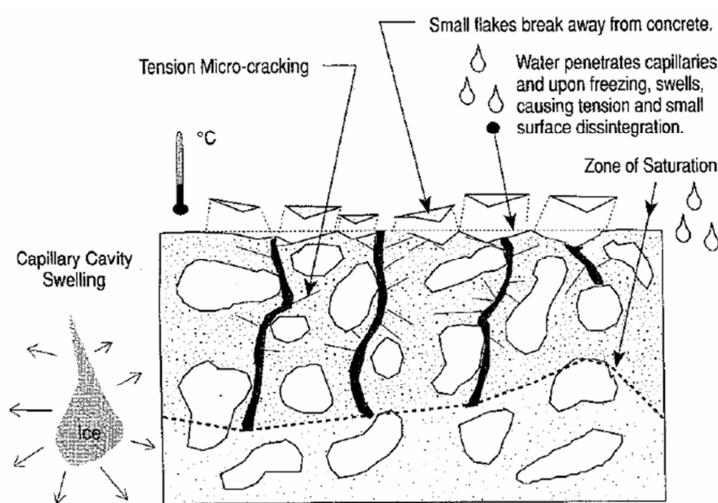


Figure 21 – Effet du gel de l'eau dans les bétons [19].

L'utilisation de sels de dé verglaçage a tendance à accélérer le phénomène destructif du gel.

2.3.4 Réaction alcali-granulat

L'alcali réaction est une réaction chimique entre la silice de granulats et les alcalins présents dans la pâte de ciment. Seuls les granulats contenant des silices réactives (ou amorphes) sont concernés [20]. La réaction, qui se déroule à la périphérie des granulats, entraîne des gonflements préjudiciables à la résistance des bétons, sous forme de faïençage et éventuellement d'éclatements (Fig. 22). Si l'alcali réaction est principalement du type alcali-silice, il existe aussi des réactions alcali-carbonate et alcali-silicate.

Cette réaction, quand les conditions sont remplies relativement aux alcalins et silices réactives, se développe préférentiellement dans les ouvrages soumis à une humidité permanente, comme la plupart des ouvrages hydrauliques. Elle concerne alors l'ouvrage en masse.



Figure 22 – Dégradations typiques due à l'alcali-réaction dans le béton.

2.4 Diagnostic

2.4.1 Introduction

Il s'agit de mettre en œuvre diverses techniques d'investigation pour déterminer la (ou les) cause(s) qui ont provoqué les dégradations observées [19]. Ceci est principalement nécessaire si la (ou les) cause(s) reste(nt) active(s). Il faut supprimer ou minimiser ces causes ou en tenir compte dans la stratégie de la réparation ou de la protection.

Pour établir le diagnostic, on peut suivre des procédures comme celles qui consistent à travailler par éliminations successives. Dans les procédures décrites ci-après, on confirme ou on rejette les diverses hypothèses en commençant par les plus faciles à traiter. Pour appliquer cette méthode, de travail, il est utile de :

- connaître les modifications des sollicitations (ou des conditions de service) qui auraient pu se produire depuis la construction (certaines conditions auraient pu être modifiées plusieurs fois);
- connaître l'âge des dégradations, notamment au travers de techniques d'évaluation des dégradations ou de déformations anormales [21].

Il est nécessaire de parcourir l'ensemble des hypothèses et de ne pas s'arrêter dès que l'on a trouvé une cause possible car plusieurs causes peuvent avoir agi ou peuvent encore agir simultanément ou successivement et il faut en tenir compte dans la stratégie de réparation.

Le diagnostic est particulièrement délicat à établir lorsque la première dégradation s'est produite lors de la construction ou que la cause a disparu entre le moment de la construction et le moment de l'évaluation avant intervention. Le diagnostic sera d'autant plus sûr que l'on a suffisamment de :

- renseignements concernant les conditions lors de la construction et de l'exploitation de l'ouvrage;
- renseignements concernant l'environnement (actuel et antérieur);
- renseignements concernant le comportement antérieur de l'ouvrage (courbes reprenant les évolutions de plusieurs caractéristiques ou performances des matériaux et de l'ouvrage, en fonction du temps);
- temps pour effectuer des relevés pendant une durée suffisante et pour mesurer des modifications :
 - cycliques des dégradations;
 - monotones des dégradations. Il faut donc prévoir les moyens et le temps pour cette étape importante du processus global d'intervention.

Il faut aussi remarquer qu'une erreur initiale entraîne une série de faiblesses qui se marquent par une sensibilité accrue aux diverses causes de dégradations. C'est ainsi qu'une erreur de composition (par exemple un E/C trop élevé) va entraîner :

- une ségrégation plus importante;
- un retrait plus important;
- une résistance plus faible vis-à-vis de l'environnement;
- une résistance mécanique plus faible qui pourrait être insuffisante dans des zones particulières, etc.

Dans un tel cas, on peut établir des corrélations entre les effets des différentes causes de dégradations et ainsi conforter l'hypothèse de départ (E/C trop important).

2.4.2 Procédures en cas d'épaufures et fissurations

2.4.2.1 Causes évidentes

Un impact ou un incendie sont facilement décelables. Dans l'historique de l'ouvrage, on devrait retrouver la date et les conditions de l'accident, du tremblement de terre ou de l'incendie. Pour vérifier que la corrosion des armatures est à la base d'un dégât, il suffit de décaper l'enrobage fissuré pour vérifier que l'armature est rouillée et a gonflé suite aux processus de corrosion.

2.4.2.2 Dégradations cycliques

Ces dégradations résultent de modifications cycliques des actions (mécaniques et/ou environnementales). Il s'agit d'établir le parallélisme, éventuellement en tenant compte du retard à la réaction dû à l'inertie de la structure, entre l'évolution des dégradations et l'évolution des actions. En particulier, il convient de réaliser un examen du parallélisme entre les caractéristiques des dégradations (ex. : ouverture des fissures) et les caractéristiques des paramètres (charges mécaniques, température du béton, teneur en eau du béton).

2.4.2.3 Dégradations croissantes (vitesse mesurable)

Il est essentiel de vérifier l'activité des réactions chimiques. Cette activité peut être confirmée grâce à l'analyse des produits en contact avec le béton ou des produits de dégradation encore présents dans le béton même si l'attaque chimique n'est plus effective.

2.4.2.4 Erreurs en cours d'étude

Au départ des observations et des mesures (section, caractéristiques des matériaux, plan d'armature), et/ou de la note de calcul (initiale), il est possible de vérifier les états de contraintes particulièrement aux endroits des dégradations observées. Pour que cette origine des dégradations soit validée, il faut que les contraintes calculées entraînent des dégradations identiques à celles effectivement observées (position, orientation, type (fissure ou épaufure)).

Les effets de ces erreurs peuvent être amplifiés pour des détails de l'élément (concentration de tensions dans des zones particulières).

2.4.3 Procédures en cas de désagrégation

Selon le cas, il s'agit de désagrégation de la masse du béton (hypothèse à vérifier, l'attaque du béton jeune par le gel, l'incendie, l'attaque chimique expansive) ou de dégradations en surface (hypothèse à vérifier : attaque chimique superficielle ou érosion).

L'attaque par le gel/dégel requiert la présence simultanée de température inférieure à 0 °C et de béton saturé d'eau à plus de 91 %.

2.5 Conclusions

Sauf circonstances exceptionnelles, toutes les dégradations résultent d'inadéquations (à un moment ou à un autre) entre la construction (matériaux ou éléments) et son environnement (environnement climatique ou autres actions). Ces interactions défavorables entre la construction et son environnement ont souvent été sous-estimées à l'étape "projet", lors des opérations de construction ou à l'utilisation. Une étude réalisée par la *British Cement Association* (Fig. 23) montre clairement que le trop faible recouvrement des armatures et la non prise en compte de l'environnement représentent plus de 50% des causes de dégradation. La mauvaise qualité du béton, les défauts de conception et la main-d'œuvre non qualifiée seraient par ailleurs responsables d'environ 25% des défauts observés. La corrosion des armatures, qu'elle soit liée au phénomène de carbonatation ou à la diffusion des ions chlores, et qui est une conséquence des « défauts » qui viennent d'être cités représente, en Belgique, entre 85 et 95% des causes de dégradations.

Ce qui est particulièrement préoccupant, c'est que l'on a constaté que, plus de 50% des réparations sont des échecs après seulement 5 ans et que les processus de dégradation ont repris de plus belle, comme le montre l'exemple de la figure 24. Les situations où l'on a procédé au choix inadéquat des matériaux et/ou de la technique de réparation sont à l'origine de plus de la moitié des échecs recensés (Fig. 25).

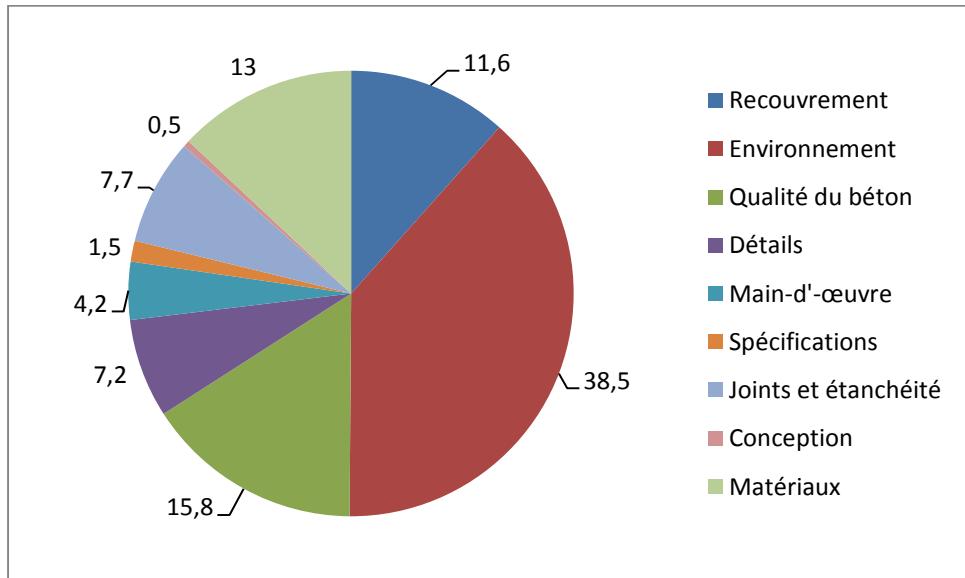


Figure 23 – Principales causes de défauts et dégradations dans les constructions (BCA, 1997, d'après [11]).



Figure 24 – Fissuration après réparation (*Parc Skaryszewski, Varsovie*).

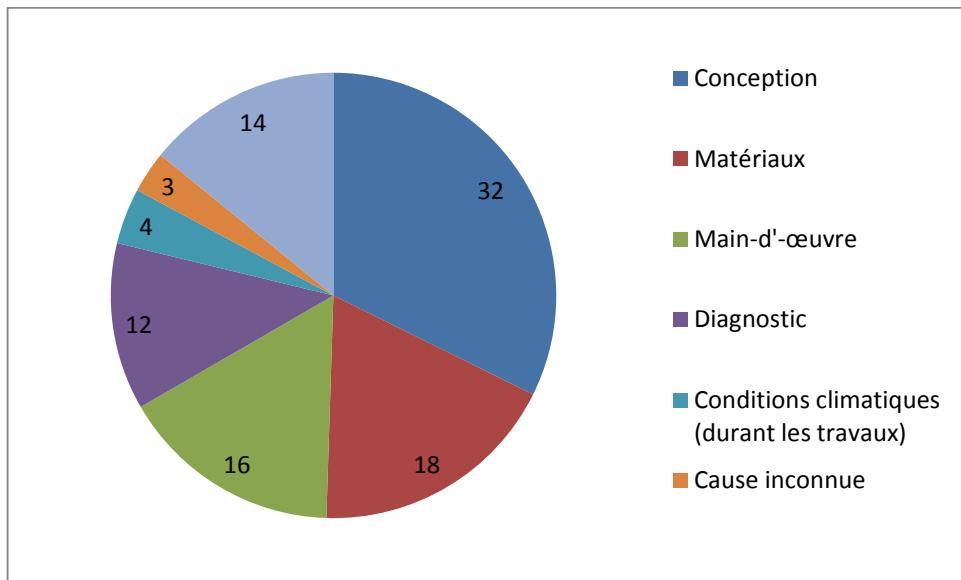


Figure 25 – Principales causes des échecs des réparations en béton [11].

Conclusion

L'entretien et la maintenance de nos structures et infrastructures constituent un défi majeur pour nos sociétés. L'environnement construit en béton armé date principalement de l'après-guerre et nécessite d'urgence un plan de remise à niveau, quand il n'est pas déjà trop tard et que la seule solution qui reste est la démolition.

Les dégradations subies par les structures en béton armé sont liées dans tous les cas à la présence d'eau et, dans les environnements courants, à la corrosion des armatures, qui engendre gonflement de l'acier et épaufures dans le béton. La prise en compte de l'environnement dans lequel l'ouvrage est construit est fondamentale, non seulement dans le cas de la construction neuve, mais aussi en situation de maintenance et de réparation. Le produit utilisé, en particulier pour la réparation des épaufures, devra apporter une résistance supplémentaire par rapport à l'environnement extérieur, en même temps qu'une bonne compatibilité – essentiellement dimensionnelle – avec le support à réparer (Partie 2).

Remerciements

Les auteurs souhaitent rendre ici hommage aux professeurs Michel PIGEON (Université Laval) et Robert DEGEIMBRE (Université de Liège) qui les ont formés dans cette discipline et leur ont appris les fondements scientifiques qui sont à la base de tous les développements qui sont présentés ici.

Un remerciement est également adressé aux gouvernements du Québec et de Wallonie-Bruxelles (Wallonie-Bruxelles International) qui ont permis, depuis plus de 15 ans, l'échange et la collaboration de chercheurs de l'Université de Liège et de l'Université Laval sur ces thématiques de recherche.

Sources bibliographiques

- [1] Règlement concernant la gestion des ouvrages d'art. Ministère de l'Équipement et des Transports, Direction Générale des Services Techniques (Ed. P.H. Besem), 99p.
- [2] GAGNE R., LINGER L. (2007) *La durabilité du béton*, Deuxième édition, Presses de l'École des Ponts et Chaussées, J.P. Olliver et A. Vichot Éditeurs, Chapitre 10 – La

- durabilité des bétons en ambiance hivernale rigoureuse, 70p.
- [3] Bulletin d'Information Technique. Suivi du gel et du dégel dans les chaussées au moyen de stations de mesure de la température. Direction du Laboratoire des Chaussées, 6 (8), août 2001.
- [4] PERREAUULT-CHABOT J. (2010) Modélisation de la pénétration des chlorures dans les stationnements multi-étages. Mémoire de maîtrise, Université Laval, 179p.
- [5] SIMONNET C. Le béton : histoire d'un matériau, Marseille, Ed. Parenthèses, 2005, 219p.
- [6] GILLARD A., COURARD L., PAQUET P. (2001) Churches and concrete in Liège district : history, architecture and pathologies. Restoration of Buildings and Monuments **17**(1) 3-14.
- [7] Van de VOORDE S. (2009) Hennebique's Journal Le béton armé. A close reading of the Genesis of Concrete Construction in Belgium. Proceedings of the Third International Congress on Construction History (eds. K.-E. Kurrer, W. Lorenz, V. Wetzk.), Cottbus, 1453-1462.
- [8] DUVIVIER P., MONTFORT B. (2008) Les monuments en béton : méthodologie pour la préparation des travaux de restauration. Travail de fin d'études, Faculté des Sciences Appliquées et Faculté de Philosophie et Lettres, 203p.
- [9] TOUZEAU L. (2011) La Protection du patrimoine architectural contemporain, Paris, L'Harmattan ([ISBN 978-2-296-13806-3](#))
- [10] PRITCHARD B. (1992) Bridge design for economy and durability. Thomas Telford Services, London, 172p.
- [11] COURARD L., VAN DER WIELEN A., DARIMONT A. (2009) From defects to causes : pathology of concrete and investigation methods. 17th Slovenski kolokvij o betonih, Ljubljana, Slovénie (19 mai), 29-48.
- [12] FONTANA, M. G., GREENE N. D. Corrosion Engineering, McGraw-Hill, New York, New York, 1967.
- [13] TRETHEWEY K.R., CHAMBERLAIN J. Corrosion for Science and Engineering, Longman Scientific & Technical, Burnt Mill, UK, 1995.
- [14] CAPRA B. Corrosion des structures en béton armé. Techniques de l'ingénieur, Pathologie générale - Pathologie du béton, 2014/11/10, ref. article : c6151,
- [15] JERGA J (2004) Physico-mechanical properties of carbonated concrete. Construction and building materials **8**, 645-652.
- [16] DE SCHUTTER G. Damage to concrete structures. CRC Press, NW Boca Raton, 203, 189p.
- [17] HALAMICKOVA P., DEWITLER R., BENTZ D. L., GARBOCZI J. (1995) Water permeability and chloride diffusion in Portland cement mortars: relationship to sand content and critical pore diameter. Cement and Concrete Research **25**(4), 790-802.
- [18] COURARD L., DARIMONT A., SCHOUTERDEN M., FERAUCHE F., WILLEM X., DEGEIMBRE R. (2003) Durability of Mortars modified with metakaolin. Cement Concrete Res. **33**(9), 1473-1479.
- [19] POYET S. (2003) Etude de la dégradation des ouvrages en béton atteints par la réaction alcali-silice - approche expérimentale et modélisation numérique des dégradations dans un environnement hydro-chémo-mécanique variable. Materials. Université de Marne la Vallée, 237p.
- [20] EMMONS P.H. (1994) Concrete repair and maintenance illustrated, RS Means Company, Kingston, MA, USA, 295p.
- [21] CARINO N.J. (2003) Non destructive test methods to evaluate concrete structures. Sixth CANMET/ACI International Conference on the Durability of Concrete, Special Seminar, Thessaloniki, Greece, 75p.

Normes et standards

EN 1504-10 : 2003. Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions - Requirements - Quality control and evaluation of conformity, CEN, Brussels.

ACI 364.1-R07 (2007) Guide for Evaluation of Concrete Structures before Rehabilitation, Committee 364 Rehabilitation, American Concrete Institute, Detroit (MI), USA, 22 p.