

DURABILITE DES OUVRAGES D'ART – SOLUTIONS GLOBALES SIKA

Préparé par :

MarouaneZohry : Directeur Technique de Sika Maroc

zohry.marouane@ma.sika.com

Deyae Drissi : Adjointe au Directeur Technique de Sika Maroc

drissi.deyae@ma.sika.com

Abstract

Maîtriser la durée de vie d'un ouvrage d'art représente un enjeu économique majeur pour les investisseurs, les gestionnaires et les usagers. Cette démarche implique en premier lieu, dans la phase de conception, des exigences en terme de durabilité qu'il est nécessaire de pouvoir exprimer contractuellement.

La durabilité des ouvrages d'art en béton s'obtient par une conception soignée, en fonction de la catégorie de l'ouvrage ainsi que sa classe environnementale, prenant en compte notamment les aspects liés à l'infiltration des différents agents agressifs, à la maîtrise de la fissuration, aux dispositions d'enrobage, et au choix approprié des matériaux.

Après la phase de conception, la durabilité dépendra aussi de nombreux paramètres liés aux dispositions constructives, à la réalisation de l'ouvrage ; aux conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance.

Ce présent exposé a pour objet de vous apporter un rappel sur les principaux modes de dégradation pouvant atteindre un ouvrage d'art, de parler brièvement de la notion de durabilité et durée de vie ; pour enfin proposer des solutions Sika aux diverses dégradations auxquelles peuvent être sujets différents ouvrages.

INTRODUCTION

Les ouvrages d'art en béton armé sont conçus pour préserver leur fonctionnalité sur de très longues périodes, pouvant dépasser les 100 ans.

Cependant, durant cette durée de service, la structure est sujette à des altérations variées. Celles-ci atteignent soit la matrice cimentaire, soit le béton, voire souvent les deux. Leurs origines sont nombreuses, depuis la formulation jusqu'à la mise en œuvre ; mais aussi et surtout à causes des conditions environnementales, à savoir : carbonatation, attaque des chlorures, cycles gel-dégel ; sans oublier les phénomènes de gonflement interne tels que l'alcali-réaction ou encore le « dernier-né » des causes de dégradation du béton : la réaction sulfatique interne (DEF).

Afin d'évaluer la durabilité d'un ouvrage en béton armé, il est nécessaire de bien connaître les différents mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation.

I- MECANISMES DE DEGRADATION DU BETON ARME

En matière de durabilité, deux types de processus de dégradation; sont identifiés comme d'importance majeure : corrosion des armatures et gonflement interne.

I-1- Corrosion des armatures :

Les principales origines de la dégradation par corrosion sont :

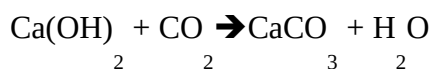
- Un enrobage (cf. Définition dans le *BAEL 91* [26]) insuffisant, ou plutôt le non-respect lors du coulage du béton, de l'enrobage prévu,
- Une qualité médiocre ou inadaptée du matériau,
- Un environnement agressif.

La carbonatation du béton et la **pénétration des ions chlorure** (issus d'un contact avec de l'eau de mer, des embruns, ou des sels de déverglaçage) sont les deux processus susceptibles de dépassiver les armatures et d'engendrer leur corrosion.

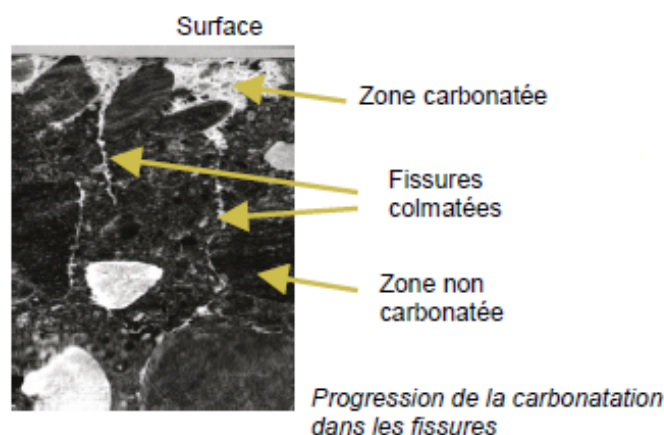
I-1-a- Carbonatation du béton :

La carbonatation relève d'un phénomène de vieillissement naturel des matériaux à base de liant minéral, appelé aussi cancer du béton.

Le dioxyde de carbone (CO₂) présent dans l'air pénètre sous forme gazeuse dans le béton par le réseau poreux ou fissural. En présence d'eau, il provoque une réaction chimique avec la pâte de ciment hydratée, dite de carbonatation. Cette réaction transforme les produits d'hydratation, notamment l'hydroxyde de calcium (portlandite) Ca(OH)₂ et les C-S-H, en carbonates de calcium CaCO₃. Cette carbonatation n'est pas nocive pour le béton. Par contre, en raison de la consommation de la réserve basique que constitue la portlandite, la carbonatation abaisse le pH de la solution interstitielle du béton (initialement entre 12,5 et 13,5) jusqu'aux environs de 9.



Les armatures étant protégées par le milieu basique du béton, elles se retrouvent exposées et dépassivées ; d'où l'amorce du processus de corrosion (réaction expansive).



I-1-b- Attaque des ions chlorures :

La pénétration des ions chlorure dans le béton requiert la présence d'une phase liquide. En milieu saturé, c'est-à-dire par exemple dans le cas de structures immergées dans de l'eau de mer, les ions chlorure pénètrent dans le béton par diffusion, sous gradient de concentration (entre la surface contenant des chlorures et le cœur exempt de chlorure). Lorsque la structure en béton est soumise à des cycles d'humidification séchage en présence de chlorures (zone de marnage, exposition aux embruns ou aux sels de déverglaçage), les chlorures peuvent pénétrer dans le béton par absorption capillaire et migrer avec la phase liquide par convection au sein de la zone concernée par les cycles.

A partir d'une certaine teneur en chlorures, la couche de passivation de l'acier est attaquée. La corrosion due aux chlorures est un phénomène dangereux, parce qu'elle se produit localement et entraîne une réduction importante de la section d'armature.

La pénétration des ions de chlore et d'oxygène dans le béton durci est limitée lorsque celui-ci est de bonne qualité, c'est-à-dire rapport E/C faible, teneur suffisante en ciment. L'enrobage des armatures devra être aussi suffisant.



I-2- Gonflement interne :

Il est à noter que dans le cas des gonflements internes, la dégradation commence de l'intérieur vers l'extérieur. Les méthodes de réparation et restauration sont alors limitées, d'où l'intérêt d'une démarche préventive.

I-2-a- Alkali-réaction :

On désigne par alcali-réaction un ensemble de réactions chimiques (cf. § 5.2.3) internes au béton impliquant certains types de granulats renfermant des espèces minérales qui peuvent se révéler comme potentiellement réactives au contact de solutions riches en oxydes alcalins Na_2O et/ou K_2O . Ces oxydes alcalins peuvent être d'origine interne (ciment, additions minérales, granulats, adjuvants, eau de gâchage) ou externe (sels de déverglaçage, par exemple). Ils se retrouvent dissous dans la solution interstitielle du béton.

3 conditions **simultanées** peuvent provoquer l'apparition de ces désordres:

- Présence de **silice réactive** dans les granulats.
- Pourcentage élevé d'**alcalins solubles** dans le béton (Na_2O , K_2O).
- **Environnement** humide ($> 80\%$ HR)

I-2-b- Réaction sulfatique interne :

La réaction sulfatique interne (RSI) peut être définie par la formation différée de l'ettringite dans un matériau cimentaire, plusieurs mois voire plusieurs années après la prise du ciment, et sans apport de sulfates externes.

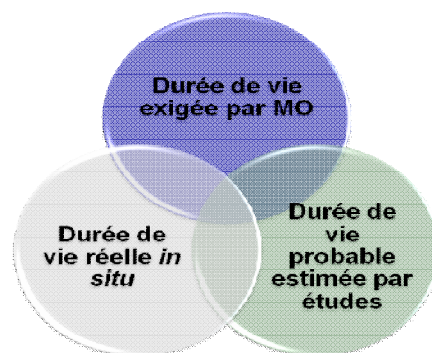
Le terme différé signifie que l'Ettringite n'a pas pu se former lors de l'hydratation du ciment, en raison de l'échauffement important du béton intervenant plusieurs heures à plusieurs jours après son coulage.

Les éléments concernés par une RSI sont :

- Pièces critiques: « **Pièces en béton pour lesquels la chaleur dégagée n'est que très partiellement évacuée vers l'extérieur et conduit à une élévation importante de la température du béton** » (Cf. annexe III, guide LCPC 2007)
- Éléments coulés en période estivale, et ont subi une température estimée supérieure à 80°C à cœur pendant le durcissement du béton.
- Éléments soumis à un environnement humide pendant plusieurs années.
- Ou bien, éléments préfabriqués ayant subi un traitement thermique très élevé.

II-DURABILITE ET DUREE DE VIE D'UN OUVRAGE :

La durabilité sous-entend un objectif de qualité orientant aussi bien la conception de l'ouvrage que celle du matériau et sa mise en oeuvre. Il est donc nécessaire de prendre en compte la durabilité du matériau et celle de la structure.

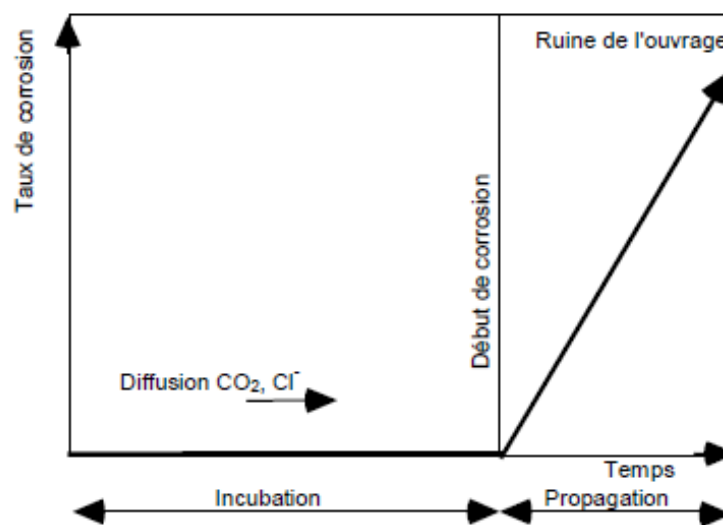


Il faut entendre par *durée de vie*, la durée de service sans précaution initiale particulière, sans entretien spécialisé et sans réparation importante du gros oeuvre ou de la structure (cf. Définition de l'Eurocode 1 [12]).

Elle correspond donc à un fonctionnement normal et à une maintenance courante pour un niveau de service donné qui peut également faire intervenir des considérations d'esthétique.

La durée de vie des structures en béton, et notamment de celles en béton armé, est fonction de deux périodes qui gouvernent les processus de dégradation des matériaux

- **Période d'incubation** : Période où les agents agressifs transitent dans le matériau et où les processus physico-chimique à l'origine de la corrosion peuvent avoir lieu à l'échelle microscopique, mais aucune dégradation n'est visible.
- **Période de propagation**: Après dépassement, la corrosion devient possible et sa progression est fonction de l'environnement (humidité relative, quantité d'oxygène...) On entre alors dans phase de propagation



De ce fait, la façon la plus simple et la plus efficace d'augmenter la durée de vie des ouvrages consiste à augmenter la durée de la période **d'incubation** ; d'où l'intérêt d'une formulation et conception adaptée

III- APPROCHE PERFORMANTIELLE :

L'approche performantielle est une démarche globale, prédictive de la durabilité des structures en béton, fondée sur la notion d'**Indicateurs de Durabilité**. Elle permet de formuler les bétons pour une **durée de vie attendue**, dans un environnement donné; lors de la phase de conception.

L'approche performantielle est caractérisée par six étapes principales :

- Choix de la durée d'utilisation de projet
- Prise en compte des conditions environnementales et principaux risques de dégradation
- Sélection **des indicateurs de durabilité** et spécifications associées
- Formulation du béton - Épreuves d'étude

- Réalisation des épreuves de convenance et de contrôle
- « Point zéro durabilité » et suivi de l'ouvrage

IV-SOLUTIONS SIKA POUR DES OUVRAGES DURABLES :

Pour réduire les coûts de maintenance, les matériaux à utiliser doivent avoir une durabilité prouvée afin d'augmenter la durée de service et espacer la fréquence de maintenance.

Sika propose une gamme étendue de solutions pour la formulation, la réparation, la protection et le renforcement des structures de pont en béton ainsi qu'en acier, capables de satisfaire aux exigences de durabilité.

IV-1- Formulation du béton :

La formulation du béton est l'étape la plus cruciale, et qui intervient directement sur la durée de vie (période d'incubation) d'un ouvrage en béton armé.

Utiliser un adjuvants adéquat permet d'intervenir sur les grandeurs ayant une influence directe sur la durée de vie de l'ouvrage, à savoir : porosité, perméabilité accessible à l'eau et aux gaz.

Dégradation	Grandeurs Influentes	Solution Sika
CARBONATATION	☑ Porosité ☑ Perméabilité à l'eau ☑ Perméabilité aux gaz	■ Sika® ViscoCrete®: Bétons à très faibles rapports E/C ■ SikaControl®: minimiser les (fissures) retrait du béton
IONS CHLORURES	☑ Porosité ☑ Perméabilité à l'eau ☑ Perméabilité aux gaz ☑ Coefficient diffusion ions chlorures	■ SikaCrète®: fumée de silice pour réduire la porosité de la matrice ■ Sika®Ferrogard®: Inhibiteur de corrosion pour empêcher toute corrosion de l'armature d'acier
GEL / DEGEL	☑ Basses température ☑ Manque de vases d'expansion	■ SikaAer®: pour augmenter la résistance au gel et au cycle gel/dégel
ALCALI-REACTION	☑ Silice réactive ☑ Alcalins actifs ☑ Perméabilité à l'eau	■ Sika® ViscoCrete®: Bétons à très faibles rapports E/C
RSI	☑ Maîtrise du traitement thermique ☑ Ciment adapté	■ Plastiretard®: Retardateur, pour contrôler et étaler la chaleur d'hydratation ■ SikaControl®: minimiser les (fissures) retrait du béton ■ Sika® ViscoCrete®: Bétons à très hautes R.M, remplacer éventuellement une quantité du ciment

IV-2- Réparation du béton :

Afin de restituer la structure et remplacer le béton défectueux, Sika fournit tous les produits nécessaires pour la réparation et la protection des bétons conformément à la **NF EN 1504**, qu'il s'agisse de dégradations liées au béton ou dues à la corrosion des armatures.

Les mortiers de réparation Sika sont classés selon le référentiel de la norme, en mortiers de classe R1, R2, R3 et R4.

Mortiers R1 et R2 selon la NF EN 1504 : Pour des réparations non structurales et réparations d'éléments non porteurs, assurant une finition très esthétique.

- **Sika Monotop 150® Ragréage M :** Mortier de ragréage garnissant à fine granulométrie, prêt à gâcher pour des épaisseurs de 1 à 5 mm par passe. Classement R1 selon la EN 1504-3.
- **Sika Monotop® 250 M :** Mortier de réparation fin, clair, fibré et rapide. Classement R2 selon la EN 1504-3.

Mortiers R3 et R4 selon la NF EN 1504 : Pour réparations structurales, réparations d'éléments porteurs, offrant les meilleures performances mécaniques, physiques et de protection.

Dans cette catégorie également les mortiers spéciaux, spécifiquement étudiés pour des résistances accrues contre les agressions chimiques.

- **Sika Monotop® 612 FM:** Mortiermono composant pour réparations prêt à gâcher, fibré et à prise rapide. Classé R3 selon la EN 1504-3.
- **Sika Monotop® 630 SR M :** Mortier de réparation monocomposant à base de ciment PM ES, charges spéciales, fibres et adjuvants ; à prise rapide pour travaux en environnement agressif. Classement R4 selon la EN 1504-3
- **SikaTop® 122 Réparation M:** Mortiers hydraulique prédosébi-composants, renforcé par des fibres synthétiques pour réparations des bétons.
- **SikaTop® 121 Surfaçage M :** Mortier hydraulique prédosé à hautes performances pour imperméabilisation, surfaçage et collage.
- **SikaTop®Armatec 108 M:** Revêtement anticorrosion pour la protection des armatures du béton armé.

IV-3- Protection du béton :

Afin de prolonger la durée de vie de l'ouvrage, il est possible d'effectuer des travaux d'entretien préventifs (protection vis-à-vis de la pénétration de l'eau, des chlorures et du CO₂,...) par exemple à l'aide des revêtements ou des hydrofuges techniques.

- **Sika® FerroGard® -903:** Inhibiteur de corrosion liquide, appliqué sur la surface
- **Sikagard®-550 W Elastic :** Revêtement coloré de finition en phase aqueuse, à extrait secélevé, résistant à la fissuration
- **SikaTop® 107 Protection / 121 Surfaçage M:** Revêtement de protection à base de ciment et de polymère
- **Sikagard® -680 S BetonColor :** Revêtement à hautes performances, à base de résine acrylique

Etant donné que l'humidité est la cause principale des dommages occasionnés aux

matériaux de construction, en particulier la structure poreuse ; une hydrofugation s'avère d'une grande importance.

L'hydrofugation permet d'empêcher, ou tout au moins de limiter ou retarder un grand nombre de détériorations ; en créant une zone hydrophobe aussi bien en surface qu'à l'intérieur du matériau, et en réduisant considérablement l'absorption d'eau et de polluants. Le risque potentiel de dégradation est ainsi fortement réduit.

Cette hydrofugation est réalisée à l'aide d'une imprégnation hydrophobe (c'est le terme utilisé dans la norme NF EN 1504-2 ; aussi appelé hydrofuge de surface).

- **Sikagard®-706 Thixo /-705 L /-740 W** : Imprégnations à base de silane
- **Sikagard®-704 S** : Imprégnation à base d'association silane/siloxane



IV-4- Protection de l'acier :

L'acier structural est également très répandu à travers le monde pour la construction de ponts et d'éléments de ponts, notamment la superstructure, les rails de parapets, les tabliers et les câbles. La protection de cet acier contre la corrosion est par conséquent essentielle afin d'accroître la durabilité et la viabilité écologique de la structure. Les chlorures et la condensation peuvent accélérer le processus de corrosion de l'acier et ils doivent être tenus à distance des surfaces en acier.

Sika propose un large éventail de systèmes de protection de l'acier testés et certifiés conformément à la norme internationale EN ISO12944, et qui garantissent la durée de service définie jusqu'à la première maintenance, ainsi que la viabilité écologique de l'ouvrage.

- **Sika Cor®** : Système pour protection anticorrosion des aciers, à hautes performances et à long terme

IV-5- Renforcement structurel :

Dans le cas d'endommagement d'un ouvrage d'art, de modification de sa structure ou de sa capacité portante, une solution très durable serait d'utiliser des lamelles en fibres de carbone. En effet, les lamelles en carbone sont insensibles à la corrosion et résistent parfaitement à l'environnement alcalin.

Les différents systèmes de renforcement structurel utilisent la colle époxydique structurale **Sikadur**[®].

- Renforcement à la flexion : **Sika® CarboDur**[®], système PRFC de plats pultrudés collés, à base de fibres de carbone.
- Renforcement à l'effort tranchant : **SikaWrap**[®], tissus uni-directionnels (systèmes de renforcement tissé à base de fibre de carbone) pour application sur poutres et poteaux



CONCLUSION

- La dégradation des ouvrages d'art est un problème majeure qui a des impacts sur les plans économique et sécuritaire. Pour s'en prémunir, des mesures préventives s'avèrent nécessaires dès la phase conception.
- Le coût d'une démarche préventive, s'avère négligeable en comparaison avec le coût d'une opération lourde d'entretien en cas de dégradation.
- Sika Maroc accompagne ses partenaires dans les grands projets d'envergure, depuis la conception jusqu'à la réalisation; par la proposition de solutions adaptées, le conseil technique et l'assistance sur chantier.

Bibliographie :

- **Guide LCPC 2010** (Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton)
- **Guide AFGC 2004** (Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages)
- **Guide LCPC 2007** (Recommandation pour la prévention des désordres dus à la RSI)
- **Brochure Sika** : Ouvrages D'Art, solutions Sika pour la rénovation des ponts
- **Norme NF EN 1504**