DIAGNOSTIC DE CORROSION DU BÉTON ARMÉ

CONTEXTE

La pathologie principale du béton armé est la corrosion des armatures.

Mécanisme de la corrosion des armatures

La corrosion des armatures dans le béton est un phénomène électrochimique. Les réactions se produisent en milieu humide, en présence d'oxygène.

À l'état initial, la solution interstitielle du béton est à un pH de l'ordre de 13 étant donné la teneur en alcalins (Na et K) et la quantité de chaux libérée par le ciment lors de son hydratation. Dans ce milieu basique, les armatures sont recouvertes d'une couche d'oxydes passifs protectrice : on dit alors qu'elles sont passivées. Le béton par sa compacité s'oppose à la pénétration d'agents agressifs. La pénétration de ces derniers est d'autant plus faible que la porosité du béton est faible.

Plusieurs agents extérieurs peuvent s'attaquer à la protection naturelle assurée par le béton :

– les eaux pures et acides qui provoquent un appauvrissement du liant par lixiviation de la chaux et un abaissement du pH du béton ;
– les ions chlorure provenant de l'eau de mer ou des sels de déverglaçage qui agissent par rupture du film passif ;
– le dioxyde de carbone qui engendre un abaissement du pH.

D'autres agents agressifs (sulfates, nitrates, sels d'ammonium, etc.) peuvent également pénétrer dans le béton d'enrobage.

En outre, la vulnérabilité du béton d'enrobage vis-à-vis de l'intrusion d'agents agressifs peut dépendre des désordres, notamment de la fissuration dont les origines potentielles multiples comme les causes mécaniques, les cycles de gel-dégel, les différentes réactions sulfatiques, etc. sont traitées dans d'autres fiches de diagnostic du présent Cahier Interactif (D1-2, D1-3, D1-4, etc.).

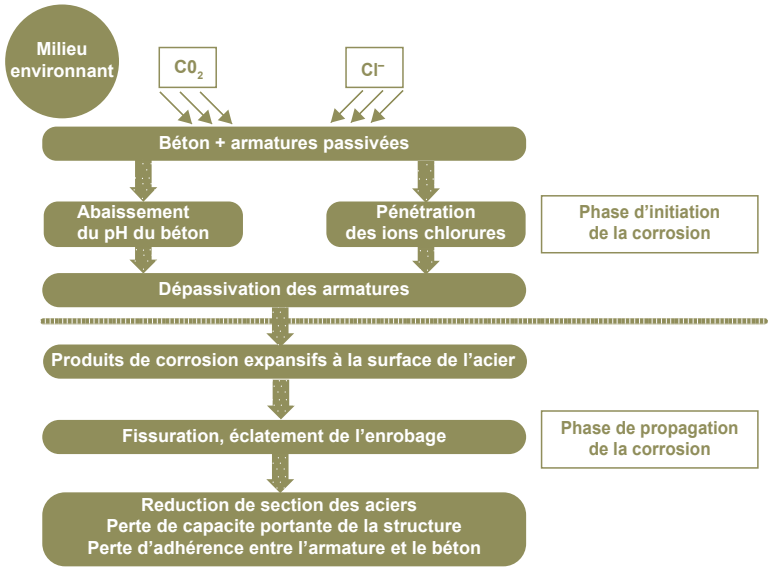
Les deux agents les plus couramment rencontrés sur les ouvrages étant le dioxyde de carbone et les chlorures, nous retiendrons comme causes principales de la corrosion des armatures, la carbonatation du béton et la pénétration des ions chlorure.

En fonction de la perméabilité de surface du parement, le dioxyde de carbone (CO_2) et les ions chlorure (Cl^-) du milieu environnant pénètrent dans le béton, ce qui conduit à la destruction du film d'oxydes passifs des armatures : on dit alors qu'elles sont dépassivées.

Des produits de corrosion expansifs se forment alors à la surface de l'acier, ce qui entraîne une fissuration puis un éclatement du béton d'enrobage, accélérant le processus de corrosion et pouvant conduire à la ruine locale de la structure. Le schéma de la figure suivante explicite le processus. À noter que dans certains cas où il existe une circulation importante d'eau, les produits de corrosion peuvent être délavés au fur et à mesure de leur formation et ne pas donner lieu au développement de gonflement d'armatures et de fissuration du béton.

On distingue traditionnellement deux phases de corrosion :

– une phase d'initiation de la corrosion (ou phase d'incubation) qui va jusqu'à la dépassivation des aciers et pour laquelle il existe une modélisation abondante sur les phénomènes de transfert dans le béton ;
– une phase de propagation de la corrosion qui va jusqu'à la ruine de la structure et pour laquelle peu de modèles fiables existent.



Processus de corrosion

Modélisation du comportement du matériau

Les éléments énoncés ci-avant permettent de proposer une modélisation du béton armé et de son environnement vis à vis du mécanisme de dégradations du béton armé par corrosion des armatures.

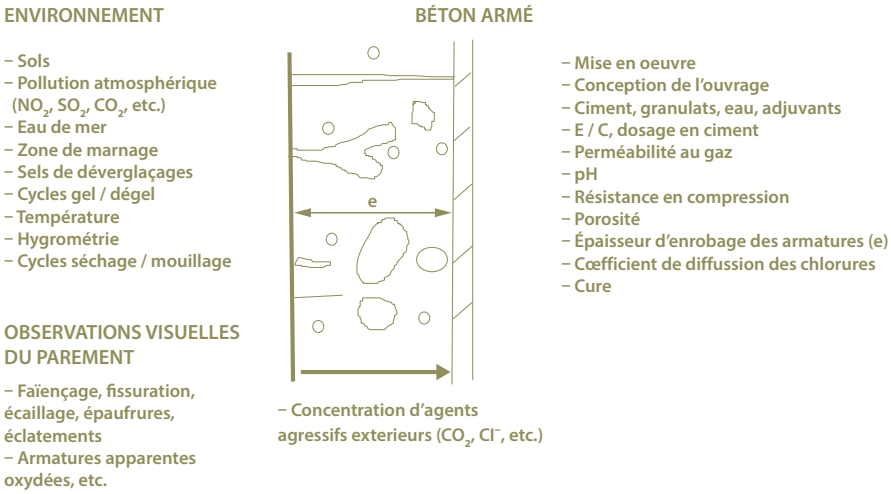


Schéma de principe de la modélisation de la corrosion du béton armé et paramètres associés (Cerema)

Évolution de la profondeur de carbonatation

D'après un bon nombre d'expériences rapporté dans la littérature, l'épaisseur de la profondeur carbonatée augmente proportionnellement avec la racine carrée du temps :

$$x = a + b\sqrt{t}$$

La difficulté consiste à caler cette loi (détermination des paramètres *a* et *b* à partir des caractéristiques de l'ouvrage afin d'obtenir une modélisation représentative de l'évolution réelle. Les paramètres *a* et *b* dépendent de la formulation du béton (E/C, dosage en ciment), des conditions de mise en œuvre (coffrage, cure), donc du coefficient de diffusion du CO^2 dans le béton et des conditions environnementales (teneur en CO^2, température et humidité).

Divers modèles numériques cherchent à tenir compte de ces phénomènes en mesurant certains paramètres (comme le coefficient de diffusion ou la teneur en portlandite) et en ajoutant des facteurs déterminés de manière plus ou moins empirique [1, 2, 3, 4, 5]. Ainsi, le modèle de Papadakis et *al.* [4, 5] permet d'estimer le coefficient *b* à partir des données extérieures et de la formulation à partir des formules suivantes, la seule mesure nécessaire étant la porosité de la pâte carbonatée ϕ_p^c. Des détails et des exemples d'application sur 2 bétons M25 et M50 sont disponibles dans le guide AFGC [1].

$$b = \sqrt{\frac{2D_{e,CO_2}^{c}\,[CO_2]}{[Ca(OH)_2]^{\circ}+3[CSH]^{\circ}}} \quad \text{avec} \quad D_{e,CO_2}^{c} = 1{,}64\times10^{-6}\,\phi_p^{c\,1{,}8}\left(1-\frac{HR}{100}\right)^{2{,}2}$$

D_{e,CO_2}^{c} (m²/s) coefficient de diffusion effectif du dioxyde de carbone dans le béton carbonaté,

$[Ca(OH)_2]^{\circ}$ et $[CSH]^{\circ}$ (mol/m³) teneur en portlandite et C-S-H dans le béton sain,

$[CO_2]$ (mol/m³) teneur en dioxyde de carbone extérieure et HR (%) humidité relative extérieure.

Une méthode pratique peut consister à encadrer l'évolution probable par des courbes d'évolution obtenues à partir de résultats expérimentaux pour différents bétons et pour différentes conditions d'exposition. Il est également possible d'ajuster les paramètres *a* et *b* par des mesures de profondeur de carbonatation opérées à différentes dates sur un même ouvrage.

Évolution de la concentration en chlorure

La vitesse de pénétration des ions chlorure dépend notamment de la porosité de la pâte de ciment qui, selon sa composition, peut piéger une partie plus ou moins importante des ions chlorure. Elle décroît avec le rapport E/C de façon exponentielle et dépend de la concentration de la solution environnante.

A partir de la loi de diffusion de Fick, la concentration en chlorure à une profondeur *x* (m), à un temps *t* (s) donné peut être approchée par la formule suivante :

$$c_{Cl^-}(x,t) = c_{Cl^-}^{0} + \left(c_{Cl^-}^{ext} - c_{Cl^-}^{0}\right)\times\left(1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{app}\times t}}\right)\right)$$

erf est la fonction « erreur » définie par : $erf(u) = \frac{2}{\sqrt{\Pi}}\int_0^u e^{-t^2}dt$

avec : $c_{Cl^-}^0$, la concentration initiale en ions chlorure libres ;
$c_{Cl^-}^{ext}$, la concentration en ions chlorure dans le milieu environnant ;
D_{app}, le coefficient de diffusion apparent des ions chlorure (m²/s).

Modélisation du comportement de la structure

En se fondant sur la thèse de Rita Cassia Silva [6], l'évolution de la performance d'un ouvrage au cours du temps fait appel à 3 phases qui sont modélisées à partir de modèles classiques de la littérature.

- La première phase correspond à l'apparition de la fissuration : le principe du modèle consiste à comparer la quantité de rouille formée au cours du temps avec une quantité nécessaire dite critique pour créer une fissure le long de l'armature (modèle de Weyers). Lorsque la porosité du béton autour de l'armature est remplie, la pression de gonflement dépasse la résistance à la traction du béton qui se fissure.
- La seconde phase est représentative de la propagation de cette fissure jusqu'à une ouverture d'environ 1 mm d'ouverture où l'on observe un éclatement du béton. Dans cette phase, la fissure se propage avec l'augmentation des produits de corrosion de façon linéaire selon le modèle le plus simple (Modèle de Thoft-Christensen).
- La troisième phase correspond à la perte de sécurité structurale : le modèle le plus simple considère une perte de section progressive des aciers qui réduit la performance des structures.

Si la perte de section des aciers est un paramètre primordial pour l'évaluation de la capacité portante des ouvrages, d'autres paramètres comme la perte d'adhérence acier/béton qui résulte de la fissuration ou de l'éclatement du béton et la baisse de ductilité des aciers corrodés jouent également un rôle important.

La baisse de la résistance en fatigue d'aciers corrodés est également à prendre en considération si l'on veut vérifier l'état limite de fatigue de la structure.

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC

ÉTAPE 1 ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE

On identifiera dans le dossier de l'ouvrage tous les éléments utiles au diagnostic :

- formulation du béton (nature et dosage du ciment, rapport E/C, nature et dosage des additions, etc.) ;
- nature, diamètre et position des aciers ;
- enrobage des aciers ;
- classes d'exposition des parties d'ouvrages ;
- fréquence de salage et nature des fondants utilisés ;
- traitement des parements ;
- durée de la cure.

ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE

Cette étape a pour objectif de repérer les désordres susceptibles d'indiquer une corrosion des armatures comme :

- des gonflements ;
- des zones sonnant le creux ;
- des fissures le long des aciers ;
- des traces d'oxydation ;
- des épaufrures du béton ;
- des éclatements de béton avec armatures apparentes et oxydées.


Fissures le long des aciers (Ifsttar)


Traces d'oxydation (Ifsttar)


Armatures apparentes et oxydées (Ifsttar)

Même en l'absence de tels défauts visuels ou sonores, l'ouvrage pourra faire l'objet d'une auscultation visant à déterminer le risque de corrosion des armatures (mesures de l'épaisseur d'enrobage, de la profondeur de carbonatation, de la teneur en chlorures, de la résistivité, de la perméabilité de surface). Ce type d'auscultation entre dans la démarche des « inspections ciblées » qui vise à avoir une approche préventive pour anticiper l'apparition de désordres dus à la corrosion.

Ce type d'auscultation entre également dans le cadre de l'approche performantielle de la durabilité des ouvrages d'art [7] qui implique un suivi de l'ouvrage par la mesure des témoins de durabilité (profondeur de carbonatation, profil de teneur en $CaCO_3$, profondeur de pénétration des chlorures, profil de teneur en chlorure, etc.).

Si ces défauts sont décelés, il est impératif de procéder à une auscultation plus approfondie de l'ouvrage.

Concernant le diagnostic des armatures, la mesure du potentiel d'électrodes permet d'évaluer leur état d'enrouillement, et la mesure de la vitesse de corrosion permet d'estimer une vitesse de corrosion instantanée [8].

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

En ce qui concerne le béton, plusieurs essais complémentaires permettent d'établir un diagnostic :

– la mesure de l'épaisseur d'enrobage des armatures ;
– la mesure de la profondeur de carbonatation permet d'évaluer le risque de corrosion lié à l'abaissement du pH du béton ;
– la mesure de la teneur et du gradient de chlorures permet d'évaluer le risque de corrosion lié à la pénétration de chlorures ;
– la mesure de la résistivité du béton en surface du parement qui est fonction de l'humidité et de la salinité, indique un risque de corrosion des armatures ;
– la mesure de la perméabilité de surface du béton détermine l'aptitude du parement aux échanges hydriques et gazeux avec le milieu ambiant, c'est à dire la possibilité de pénétration des agents agressifs (dont CO_2 et Cl^-).

Les mesures de perméabilité de surface sont à considérer comme des mesures accompagnatrices du diagnostic ou comme des mesures destinées à fournir des paramètres aux modèles employés pour établir le diagnostic ou le pronostic. Dans notre approche du problème, nous les laisserons de côté.

Examinons à présent les 3 cas possibles qui se présentent face à un ouvrage [9].

Cas 1 - Il n'y a aucun désordre apparent (zones saines ou apparemment saines)

S'il n'y a pas de raison de suspecter de la corrosion, on peut ne rien faire et laisser la structure continuer sa vie. Mais si l'on souhaite bien gérer ses ouvrages, alors il est important de connaître les réserves d'alcalinité ou de temps d'attaque par les chlorures, de façon à pouvoir appliquer une politique préventive généralement moins coûteuse qu'une politique curative.

C'est pourquoi il est recommandé de faire des mesure d'épaisseur d'enrobage, de profondeur de carbonatation et de teneur en chlorures.

Avec ces mesures et avec les modèles vus précédemment on peut évaluer le temps t qui reste pour atteindre une dépassivation des aciers par la carbonatation et/ou par les chlorures :

– Si $t \leq 1$ an, il convient tout d'abord de vérifier l'état des armatures par des percements, des mesure de potentiel, de résistivités, et de vitesses de corrosion. Selon les résultats, 2 traitements sont alors possibles : si la corrosion n'est pas détectée, il convient d'envisager une intervention à court terme pour éliminer le risque de corrosion des armatures ; si la corrosion est avérée, une intervention rapide est nécessaire afin de stopper ou de ralentir la corrosion et d'éliminer sa (ou ses) cause(s).
– Si 1 an $< t \leq 5$ ans, il convient de planifier la protection dans les années qui viennent.
– Si $t > 5$ ans, on a le temps de réagir, et l'on propose de revenir faire des mesures dans 5 ans pour suivre l'avancée du front de carbonatation ou de chlorures. Si le béton est très compact, cet avancement peut être très lent et dans ce cas, on peut décider de refaire des mesures dans 10 ans.

Cas 2 - La corrosion est possible

Les signes extérieurs sont généralement des fissures, des gonflements ou des zones sonnant creux ; on cherche alors à diagnostiquer la présence ou l'absence de corrosion et pour cela on effectue des percements au droit des désordres, des mesures de potentiel d'électrode, de résistivité et de vitesse de corrosion afin de déterminer si les armatures sont corrodées ou en cours de corrosion.

Si des signes de corrosion se révèlent lors de ces mesures, on cherche alors à déterminer les causes de la corrosion par des mesures d'épaisseur d'enrobage, de profondeur de carbonatation et de gradient de chlorures.

S'il n'y a pas de signe apparent de corrosion, alors il faut rechercher d'autres causes aux désordres.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

Cas 3 - La corrosion est visible et évidente

Les signes extérieurs sont des traces d'oxydation, des éclatements de béton avec armatures apparentes oxydées, jusqu'à des pertes partielles ou totales de section d'armatures.

On commence par mesurer l'épaisseur d'enrobage des aciers. Cette mesure, associée aux mesures de la profondeur de carbonatation et de la teneur en chlorures, permet de déterminer la ou les cause(s) de la corrosion des armatures.

L'ampleur (étendue) des zones dégradées est également évaluée en effectuant des percements, des mesures du potentiel d'électrode, de résistivité et de vitesse de corrosion dans les zones apparemment saines de façon à savoir si la corrosion s'y est amorcée.

Selon les résultats trouvés, et après une application éventuelle de modèles pour pronostiquer la progression de la carbonatation et/ou des chlorures, on décide de traiter la structure de façon curative (enlèvement du béton carbonaté et/ou chloruré puis ragréage, méthodes électrochimiques, etc.) ou de façon préventive (revêtements de protection, protection cathodique, etc.) selon les zones.

RÉFÉRENTIEL

[1] Baroghel-Bouny V. et *al.* Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages - Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction - État de l'art et Guide pour la mise en oeuvre d'une approche performantielle sur la base d'indicateurs de durabilité, Documents AFGC, juillet 2004, 252p.

[2] Duracrete, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, The EU – Brite EuRam III, January 2000.

[3] FIB, Model Code for Service Life Design, Task Group 5.6, 2006, Bulletin n°34, 116p.

[4] Papadakis V.-G., Vayenas C.-G. et Fardis M.-N., Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation, ACI Materials Journal, july-august 1991, Vol. 88, n°4, pp. 363-373.

[5] Papadakis V.-G., Vayenas C.-G. et Fardis M.-N., Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete, ACI Materials Journal, march-april 1991, Vol. 8, n°2, p. 186-196.

[6] Cassia Silva R., Contribution à l'analyse probabiliste de la performance des ponts en béton armé, Paris : LCPC, 2005, Études et Recherches des laboratoires des ponts et chaussées, OA50, 246p.

[7] LCPC, Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton : Application de l'approche performantielle - Recommandations provisoires, Paris : LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique MAITROUB, 56p.

[8] Cremona C., Rougeaud P., Torrenti J.-M., Poyet S., Adelaide L., Berthaud Y., Bouteiller V. et L'Hostis V. Durée de vie des ouvrages en béton armé - Approche prédictive, performantielle et probabiliste - Recommandations du projet ANR-APPLET : IFSTTAR - CERIB; 2012.

[9] Grimaldi G. et Raharinaivo A. (1999) Vers une stratégie de réparation du béton armé dégradé, Bulletin des Laboratoires des ponts et chaussées, n° 223, septembre à décembre 1999, pp 59-70.

Recueil de méthodes d'auscultation des matériaux et structures d'ouvrages d'art :

- B2-1 Mesure de la profondeur d'enrobage et du diamètre des aciers
- B2-2 Mesure de la profondeur de carbonatation
- B2-3 Prélèvements de poudre en béton pour mesure de la teneur en agents agressifs
- B2-4 Mesure du potentiel d'électrode (Cu/CuSO4) (selon la norme ASTM C-876-91)
- B2-5 Mesure de la vitesse de corrosion de l'acier dans le béton
- B2-6 Mesure de la résistivité du béton
- B2-7 Mesure de la perméabilité à l'air du béton de surface

LOGIGRAMME

Un logigramme ou un schéma décisionnel résume la méthodologie du diagnostic en visualisant de façon séquentielle et logique les actions à mener et les décisions à prendre.

D1-1 : DIAGNOSTIC DE CORROSION DU BÉTON ARMÉ

