

APPROCHE PERFORMANTIELLE ET PROBABILISTE DE LA DUREE DE VIE DES OUVRAGES EN BETON

C. Cremona⁽¹⁾, V. Baroghel-Bouny⁽¹⁾

⁽¹⁾ Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris

Résumé

La détérioration du béton se traduit par des étendues de dommages différents, allant de la fissuration à l'éclatement du béton, de la perte de section d'armatures à la perte d'adhérence. Une prédiction pertinente de cette performance, actualisée par des résultats d'inspection fiables, est la base du succès de la gestion des ouvrages en béton. C'est suivant cet objectif qu'une opération de recherche a été lancée en 2006 au LCPC pour tenter d'améliorer la qualité et la pertinence des données fournies par l'auscultation, d'adapter les modèles d'évolution de la dégradation aux conditions réelles que connaissent les ouvrages, d'introduire des outils d'analyse statistique et d'évaluer l'efficacité des traitements électrochimiques.

Mots-clés

Interaction béton/environnement – corrosion – capacité portante – mesures électrochimiques – traitements électrochimiques

1. INTRODUCTION

La corrosion des armatures est l'une des principales causes de détérioration des ouvrages en béton armé. Ce phénomène de dégradation est provoqué par des agents agressifs tels que les chlorures (notamment présents dans le sel de déverglaçage appliqué sur les routes en hiver) ou, le dioxyde de carbone de l'atmosphère qui se dissout dans l'eau interstitielle du béton. Ces agents agressifs provoquent la corrosion des armatures lorsque leur teneur dépasse un seuil critique dans le béton au contact des aciers. La cinétique du processus de corrosion est donc essentielle pour caractériser de manière efficace et pertinente la performance de l'ouvrage tout au long de sa durée d'usage. Durant cette période, trois phases principales de performance peuvent être identifiées :

- la première se caractérise par une perte de durabilité au niveau du matériau qui débute lorsque les agents agressifs pénètrent le béton d'enrobage et qui se termine lorsque les armatures sont dépassivées ; la corrosion peut alors s'amorcer ;
- la deuxième phase de performance définit la perte d'aptitude au service de l'ouvrage. Les détériorations infligées à la structure se traduisent par de la fissuration d'ampleur plus ou moins importante ;
- la troisième phase correspond à la perte de sécurité structurale qui se traduit par de fortes réductions des sections d'armatures. La capacité portante de l'ouvrage est donc particulièrement réduite.

En raison du patrimoine important d'ouvrages de génie civil en béton armé, et par conséquent du nombre de structures dégradées, des décisions sont souvent prises en urgence sur les techniques et les moments pour les réparer. Cette prise de décision ne peut être efficace qu'en disposant de modèles d'évaluation des diverses phases de performance d'un ouvrage en béton armé.

De nombreux travaux ont été menés durant ces dernières années, au LCPC et dans la communauté scientifique et technique nationale et internationale, pour aborder d'une part l'amélioration de la durabilité des ouvrages, et d'autre part, pour appréhender l'aptitude au service et la sécurité structurale des ouvrages. Les attentes des maîtres d'ouvrages et du monde professionnel en général, et les développements de la normalisation européenne sur une approche performantielle des ouvrages ont suggéré aux divisions BCC et FDOA du LCPC de regrouper leurs efforts dans le domaine de l'évaluation de la performance des ouvrages en béton armé pour en proposer une démarche globale et cohérente.

2. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

La maîtrise du vieillissement des ouvrages existants en béton armé est un enjeu économique majeur au moment où leur âge moyen les situent dans la période critique de début de propagation de la dégradation par corrosion. De plus la notion de coût global se généralise dans nos sociétés. Cette notion inclut le coût de conception et de construction, mais aussi celui de maintenance, de vulnérabilité, et de démolition/reconstruction (y compris remise en état des sites). La demande

générale de la société pour plus de services aux meilleures conditions économiques, dans le respect de l'environnement et des contraintes nouvelles induites par le développement durable, obligent le secteur du génie civil à développer une politique de gestion des constructions cohérente et intégrée. Toute action visant à maintenir en service les ouvrages existants présente des effets bénéfiques sur le développement durable.

Jusqu'à présent, la connaissance partielle des phénomènes de dégradation en particulier dans les conditions réelles des ouvrages, la qualité parfois médiocre des constructions au cours du temps, l'augmentation des charges de service et environnementales, le manque d'entretien, ont amené à une accélération du vieillissement de nombreux ouvrages. Par ailleurs, le poids économique des constructions civiles se révèle si élevé que leur remplacement induit de nombreuses difficultés, en raison de sites encombrés ou de conséquences sociales importantes. Leur réparation et leur remise à niveau demandent également des sommes considérables.

L'analyse des phases de performance, et de façon plus générale des cycles de vie des ouvrages, devrait gagner en précision par l'amélioration de la qualité et de la pertinence des données fournies par l'auscultation, par l'adaptation des modèles d'évolution de la dégradation aux conditions réelles que connaissent les ouvrages, et par l'amélioration des outils d'analyse statistique. Disposer de tels modèles, méthodes et outils doit permettre une meilleure évaluation de la performance et la prise de décision précoce ajustée par des informations sur site doit offrir un retour sur investissement des opérations d'entretien et de réparation.

Ces constats mettent en évidence l'importance de disposer de méthodes pertinentes d'évaluation et d'amélioration de la performance des ouvrages en béton armé. Trois objectifs ont ainsi pu être mis en évidence et sont au centre du programme de recherche.

2.1. Vers une distinction de la durabilité « matériau » et de la durabilité « structure »

L'une des étapes essentielles dans l'évaluation de la performance des ouvrages en béton est la qualification de la durabilité. Cette exigence de performance est souvent difficile à définir et plusieurs sens lui sont donnés en pratique. Dans le cadre d'un ouvrage en béton, il est ainsi essentiel que la structure puisse conserver sa résistance sans que sa gestion technique (ou sa fonction) soit modifiée de façon significative, afin de ne pas compromettre sa durabilité. Il convient de rappeler que la durabilité n'est pas la garantie d'une durée de vie infinie à la structure, mais un objectif de qualité orientant aussi bien la conception de l'ouvrage que celle du matériau.

Cette remarque permet l'identification de deux concepts distincts vis-à-vis de la durabilité : celle du matériau et celle de la structure. La durabilité du matériau se vérifie à partir de sa capacité de conserver ses caractéristiques et son intégrité pendant la durée de vie prévue pour la structure. La durabilité de la structure dépend de celle du matériau ; cependant elle ne se résume pas exclusivement à la qualité du matériau employé. C'est pourquoi la durabilité de la structure (complète ou d'un

élément) consiste dans l'accomplissement de ses performances de sécurité structurale et d'aptitude au service dans des conditions prévues d'utilisation. L'Eurocode EN1990 « Basis of structural design » ajoute un élément supplémentaire à cette définition de la durabilité : celle de maintenance. La durabilité d'une structure est alors sa capacité à remplir ses fonctions durant la durée de vie prescrite avec une maintenance appropriée.

L'une des problématiques abordées dans l'opération est de distinguer ces deux échelles de la durabilité et d'offrir des éléments de réponse pour leur modélisation, leur prévision et leur suivi sur la durée d'usage.

2.2. Vers une caractérisation probabiliste de la performance

Lors de la conception d'un ouvrage, il est admis qu'il sera construit, mis en service et exploité en conformité avec les hypothèses adoptées. Cependant, l'ouvrage peut acquérir certaines spécificités au cours du temps, soit par le changement d'usage ou des charges d'exploitation, soit par des phénomènes de dégradation, qui provoquent une réduction de sa résistance. Ces modifications introduisent de nombreuses incertitudes. C'est pourquoi, il est souhaitable que la prédiction de la performance soit réalisée en utilisant une approche probabiliste. Dans ce cadre, les diverses variables qu'elles soient physico-chimiques, environnementales, structurales ou d'exploitation, possèdent des variabilités à préciser et à introduire dans les simulations. Avec une telle démarche, il est alors possible de vérifier si les conditions de durabilité, d'aptitude au service et de sécurité structurale fixées sont ou non atteintes selon un degré de confiance prescrit.

2.3. Vers une prise en compte de la gestion des ouvrages

Limiter l'opération aux seuls aspects de durabilité, de fissuration par corrosion et de perte de capacité portante apparaîtrait réducteur aux yeux des maîtres d'ouvrages soucieux de gérer au mieux leur patrimoine. Cela conduirait également à laisser de côté une approche préventive de la gestion de ces ouvrages. En effet, si le risque de corrosion est détecté et localisé suffisamment tôt, l'extension des dégradations peut être évitée, les réparations sont alors moins coûteuses. Rappelons qu'actuellement, le contrôle de la corrosion des armatures se fait souvent à l'aide d'inspections visuelles. Ces examens visuels mettent en évidence les fissurations ou éclatements de l'enrobage de béton. Les opérations de réparations sont alors plus onéreuses que si les dégradations sont détectées précocement par des méthodes non destructives. Ces méthodes de caractérisations électrochimiques portent essentiellement sur la mesure du potentiel d'électrode et sur la mesure de la résistance de polarisation des armatures. Sur la base de ces indications, des traitements électrochimiques de réhabilitation peuvent être mis en place. Selon l'origine de la corrosion et son stade d'avancement, selon la structure de l'ouvrage et son environnement, il peut s'agir de protection cathodique, de traitement de déchloration ou encore de réalcalinisation. Les traitements électrochimiques sont alors fondés sur l'utilisation d'un courant généré soit par une alimentation soit par des anodes sacrificielles. Mais, ces traitements ne sont abordés que dans quelques normes ou recommandations, et laissent de nombreuses questions ouvertes.

L'inspection d'ouvrages en béton armé au moyen de contrôles non destructifs par caractérisation électrochimique et la mise en œuvre de techniques préventives de protection des ouvrages seront donc des problématiques considérées par le programme de recherche.

3. PROGRAMME SCIENTIFIQUE

Les objectifs précédents traduisent en réalité plusieurs exigences de recherche et de développement :

- faire porter l'évaluation de la performance des ouvrages en béton non seulement sur la propagation des agents, mais aussi sur l'amorçage et la propagation de la corrosion,
- assurer un transfert des modèles physico-chimiques (incubation et propagation de la corrosion) à l'échelle du matériau vers des modèles de comportement d'éléments de structure,
- mieux comprendre et appréhender l'impact de la corrosion sur le comportement des aciers, de la fissuration du béton et de l'adhérence béton-armature,
- intégrer les actions préventives de contrôle et de maintenance.

Pour cela, objectifs et exigences ont été regroupés dans trois axes d'étude principaux :

- l'étude déterministe et probabiliste de l'incubation de la corrosion
- l'étude déterministe et probabiliste de la propagation de la corrosion et de son contrôle,
- le traitement électrochimique des ouvrages en béton.

3.1. Axe 1 : Etude de l'incubation de la corrosion

L'étude de la phase relative au transport des espèces potentiellement agressives dans le béton et des interactions avec la matrice a été longuement étudiée durant ces dernières années au LCPC. De nombreux problèmes restent encore à traiter et les premiers modèles mathématiques se sont révélés très prometteurs. Face aux incertitudes sur les paramètres, il est apparu aujourd'hui incontournable de les analyser dans un cadre probabiliste, de les étendre à deux dimensions et de distinguer les cas de bétons sains, fissurés et saturés ou non.

Cet axe devrait également permettre de formuler une mise en pratique de l'approche performantielle. Elle sera illustrée en particulier par le suivi de corps d'épreuve et d'ouvrages réels situés dans des environnements différents par mesures sur prélèvements et éventuellement mesures non destructives.

3.2. Axe 2 : Etude de la propagation de la corrosion

Durant toute la phase d'incubation, les caractéristiques mécaniques des structures en béton armé ne sont pas affectées. Lorsque la corrosion s'amorce, elle va se traduire par des effets divers qui vont entamer la capacité portante :

- la corrosion des aciers modifie la performance en augmentant les flèches et la fissuration à l'état limite de service, et en réduisant la capacité portante à l'état limite ultime ;
- la corrosion des armatures modifie également le mode de défaillance pour les ratios de renforcement habituels. Alors que des poutres intègres seront

défaillantes en flexion, des poutres dégradées par corrosion présenteront un risque accru de défaillance par cisaillement ;

- la dégradation du béton comprimé par fissuration induite par les armatures comprimées corrodées a une influence sur le comportement structural ;
- la corrosion peut modifier les propriétés mécaniques des aciers ;
- la détérioration des conditions d'adhérence, différentes suivant la nature de la corrosion (piqûres ou uniforme), conduit à modifier la capacité portante.

L'objectif de cet axe est donc d'une part de mieux prendre en compte le processus de corrosion des armatures de béton armé en tenant compte notamment des capacités de mesure des courants de corrosion, d'autre part de dépasser le niveau actuel de vérification par section en travaillant à l'échelle de l'élément de structure. Les études récentes menées sur le projet RGC&U « Benchmark des poutres de la Rance », ont montré combien il était important d'appréhender la variabilité spatiale de la dégradation, et les modes de défaillance d'éléments en béton armé dégradé.

3.3. Axe 3 : Traitement électrochimique des ouvrages en béton

Le traitement électrochimique de déchloruration des bétons armés qui consiste en une extraction des chlorures de la zone d'enrobage, semble être une solution de réhabilitation intéressante afin de stopper ou du moins réduire la corrosion. En parallèle, les aciers initialement introduits dans un béton "sain" avec un pH voisin de 13 sont passivés. Lors de la vie de l'ouvrage, le gaz carbonique réagit avec la portlandite du béton pour former du carbonate de calcium. La consommation de portlandite conduit à une diminution du pH du béton pour lequel les aciers ne sont plus passivés et la corrosion démarre. Le traitement de réalcalinisation met en jeu deux mécanismes réactionnels afin de redonner au béton un pH suffisamment basique qui permettra la re-passivation des aciers. Dans le premier mécanisme, il y a formation d'ions hydroxyles au niveau des aciers suite à la polarisation. Dans le second mécanisme, les composants alcalins contenus dans l'électrolyte sont amenés depuis le parement béton vers les armatures à l'aide du courant. Ces différents traitements posent de nombreuses questions sans explications ou réponses évidentes sur les mécanismes mis en jeu et l'efficacité des traitements. Ainsi pour le traitement de réalcalinisation, au centre des études, l'objectif sera de tenter de préciser les conditions de mise en œuvre menant à l'efficacité souhaitée, les essais à mettre en œuvre pour évaluer cette efficacité (délai avant toute mesure électrochimique, niveau de pH à maintenir...), la mise en évidence d'une éventuelle évolution du béton et les effets secondaires, et la vérification de la pérennité du traitement.