

UN EXEMPLE D'APPLICATION DES INDICATEURS DE DURABILITE : LE PONT VASCO DE GAMA A LISBONNE

H. Hornain⁽¹⁾, G. Martinet ⁽²⁾

⁽¹⁾ Sinamh, 1 rue Copernic, B.P. 12159, 13646 Arles Cedex,

⁽²⁾ LERM, 23 rue de la Madeleine, B.P. 136, 13631 Arles Cedex

Résumé

L'application du concept d'indicateurs de durabilité à la construction du pont Vasco de Gama sur le Tage à Lisbonne constitue une première expérience intéressante. Pour cet ouvrage de prestige situé en environnement marin et soumis principalement au risque de corrosion des aciers, une durée de vie de 120 ans définie comme une concentration limite en ions chlore au niveau des aciers, était demandée. Le choix d'indicateurs de durabilité ciblés, en particulier perméabilité et diffusivité, combiné à la mise en œuvre d'un modèle de diffusion des ions chlore ont permis la mise au point de bétons répondant aux critères exigés pour atteindre cet objectif. La présente communication fait le bilan de la démarche après maintenant presque dix ans de fonctionnement de l'ouvrage.

Mots-clés

Durée de vie - Indicateurs de durabilité – Diffusivité - Modélisation

1. INTRODUCTION

Le pont Vasco de Gama à Lisbonne, construit par le groupement d'entreprises Novaponte dont Campenon Bernard était leader, a été mis en service lors de la dernière Exposition Universelle en 1998. La démarche durabilité adoptée, qui faisait appel au concept **d'indicateurs de durabilité**, constituait en quelques sorte «une première», amorcée par Michel Salomon lors des études préalables [1, 2]. Il est intéressant d'en dresser un premier bilan après presque 10 ans de fonctionnement de l'ouvrage, dont le suivi est assuré par le LERM en collaboration avec Vinci Construction Grands Projets et le gestionnaire de l'ouvrage GestiPonte [3].

2. LA DEMARCHE PERFORMANTIELLE ADOPTEE

La démarche adoptée a suivi le déroulement proposé dans le document AFGC **«Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité»** [4]. Les données principales qui l'ont guidée

ont été détaillées dans différentes publications [1, 2, 3, 5]. Elles sont rappelées succinctement ci-après.

2.1. Définition de la catégorie d'ouvrage

Ouvrage d'art de prestige considéré comme l'un des plus grands jamais construit en Europe, le pont Vasco de Gama revêt une très grande importance économique et stratégique pour la ville de Lisbonne.

Pour cet ouvrage le cahier des charges exigeait une **durée de vie de 120 ans** définie comme une concentration limite en chlorures au niveau des armatures. Cette concentration, fixée à partir des données de la littérature [6], à 0,4% par rapport au poids de ciment, est sensée correspondre au seuil d'initiation de la corrosion des aciers. Les seules spécifications complémentaires accompagnant l'exigence de durée de vie concernaient la résistance mécanique des bétons (C32/40 pour les fondations et appuis des ouvrages terrestres, C35/45 pour les ouvrages maritimes et les tabliers des viaducs central et sud, C40/50 pour le tablier du pont à haubans) et le recouvrement des aciers (7 cm en zones de marnage et 5 cm en zones d'embruns)

D'une longueur totale de 17,2 kilomètres, l'ouvrage est construit en partie à terre et en partie sur l'estuaire du Tage à Lisbonne. Il se compose d'ouvrages d'architectures distinctes : viaducs, pont à haubans, échangeurs avec passages supérieurs et inférieurs, plate-forme autoroutière, pour la description desquels on pourra se reporter aux publications [3] et [5]. Une illustration partielle en est donnée par la figure 1.



Figure 1. Le pont sur le Tage à Lisbonne. Vue du pont à haubans. (Photo Vinci Construction extraite de [3])

2.2. Définition des conditions environnementales

Situé dans une région de climat tempéré, l'ouvrage est soumis globalement à un environnement marin en relation avec la composition de l'eau de la lagune, proche de celle de l'océan Atlantique. Cet environnement est plus ou moins agressif selon la

localisation des différentes parties de l'ouvrage : béton enterré, béton immergé, zones de marnage et d'aspersion, zones d'embruns, zones en élévation maritimes ou terrestres.

2.3. Définition des risques de dégradation

Le béton est soumis à deux types principaux de risques chimiques dont l'importance dépend des conditions locales d'exposition rappelées dans le tableau 1 :

- risques de corrosion des aciers : induits par les ions chlore contenus dans l'eau de mer, qui représente le risque principal, ou induits par la carbonatation
- risques de dégradation due à l'agressivité chimique de l'eau de mer.

Tableau 1. Classes d'expositions selon la norme NF EN 206-1.

Environnement	Classes d'agressivité chimique induite par l'eau de mer	Classe de risque de corrosion induit par les chlorures
Béton enterré	XA1	-
Béton immergé	XA2	XS2
Zones de marnage et d'aspersion	XA3	XS3
Zones d'embruns	XA2	XS3
Zones maritimes en élévation (hors brouillard salin)	-	XS1
Zones terrestre en élévation	-	XS1

2.4. Choix des indicateurs de durabilité pour le béton

L'importance de l'ouvrage, les conditions environnementales et autres dispositions constructives (enrobage des aciers, classes de résistance des bétons), ont conduit à sélectionner les indicateurs de durabilité suivants :

- trois indicateurs généraux dont dépendent fortement les propriétés de transfert du béton : la perméabilité à l'oxygène mesurée suivant le mode opératoire AFREM [7], le coefficient de diffusion des ions chlore mesuré par un essai de migration sous champ électrique [8] et la porosité accessible à l'eau [9] ;
- un indicateur spécifique de la corrosion des aciers : la profondeur de carbonatation [10] ;
- un indicateur complémentaire : la résistance à la pénétration des ions chlore suivant le mode opératoire AASHTO T277-93 [11].

2.5. Sélection des spécifications relatives aux indicateurs de durabilité

Compte tenu de l'exigence de durée de vie et des risques de dégradation, les seuils retenus pour les indicateurs de durabilité sont les suivants (Tableau 2) :

Tableau 2. Seuils retenus pour les indicateurs de durabilité en fonction de l'exposition du béton

Exposition	Perméabilité (m^2)	Diffusivité ($m^2.s^{-1}$)	AASHTO 28 j (C)	AASHTO 6 mois (C)	Carbonatation (mm)
Enterré	10^{-17}	-	< 5000		≤ 10
Immergé	-	-			
Marnage	10^{-17}	$\leq 10^{-12}$	< 5000	< 1500	≤ 10
Embruns	10^{-17}	$\leq 10^{-12}$	< 5000	< 1500	≤ 10
Aérien marin	10^{-17}	-	< 5000		≤ 10
Terrestre	10^{-17}	-	< 5000		≤ 10

2.6. Formulation des bétons

Deux types de ciments ont été utilisés : un CEM I 42,5 PM d'une part et un CEM IV 32,5 PM contenant 22% de cendres volantes, d'autre part. Le choix de ces ciments permet de réduire les risques d'attaques chimiques par l'eau de mer.

Les gravillons sont des calcaires concassés. Les sables sont un mélange en proportions égales des mêmes calcaires et d'un sable alluvionnaire silico-calcaire. Ces granulats sont classés NR (Non Réactifs) vis-à-vis de l'alcali-réaction. Les dosages en ciments sont $\geq 400 \text{ kg/m}^3$ et les rapports E/C sont compris entre 0,33 et 0,42 suivant la classe d'exposition (tableau 3).

Tableau 3. Types de ciments, dosages en ciment et rapport E/C des bétons

Exposition	Type de ciment	Dosage en ciment	Rapport E/C
Enterré	CEM IV PM 32,5	≥ 400	0,42
Immergé	CEM IV PM 32,5	≥ 430	0,35
Marnage	CEM IV PM 32,5	≥ 430	0,33
Embruns	CEM IV PM 32,5	≥ 430	0,33
Aérien marin	CEM I PM 42,5	≥ 400	0,40
Terrestre	CEM I PM 42,5	≥ 400	0,42

2.7. Qualification des formules de béton

Le contrôle des indicateurs a d'abord été effectué en laboratoire lors des études préalables, puis sur des bétons prélevés en centrale avant coulage. Ces premiers contrôles ont ensuite été validés sur des carottes prélevées en différents points de l'ouvrage aux échéances de 6 mois et 30 mois.

Tels que formulés, tous les bétons de laboratoire respectaient les seuils sélectionnés :

- les valeurs de perméabilité à l'oxygène satisfont le seuil de 10^{-17} m^2 . Des valeurs de l'ordre de 10^{-19} m^2 , limite de validité de la méthode de mesure, ont été obtenues dans le cas des bétons prélevés sur l'ouvrage ;
- les coefficients de diffusion des ions chlore satisfont au critère de $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et atteignent des valeurs souvent très inférieures dans les bétons de l'ouvrage ;
- les mesures de porosité accessible à l'eau donnent des valeurs à 28 et 90 jours comprises entre 12 et 13% indicatives de béton compacts ;
- les profondeurs de carbonatation sont inférieures à 1 mm.

2.8. Choix d'un modèle prédictif de durée de vie

Le modèle de transport des ions développé au LERM par Houdusse [12] a été choisi. Ce modèle, qui fait appel à la méthode des éléments finis, permet de connaître l'évolution du profil de concentration des ions chlorures dans l'espace et dans le temps. Il tient compte des interactions entre les ions présents (Cl^- , OH^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-}) et entre les ions et la matrice cimentaire. Il tient compte également des variations du coefficient de diffusion au cours du temps.

Les simulations ont été effectuées à partir des mesures des coefficients de diffusion apparents à différentes échéances. Dans ces simulations a été faite l'hypothèse d'un coefficient de diffusion évolutif jusqu'à 36 mois et constant au-delà. Cette hypothèse corroborée par les mesures faites sur des carottes représentatives prélevées dans l'ouvrage à différentes échéances (Tableau 4) et par les examens microstructuraux qui montrent une densification importante du matériau au cours du temps, due en particulier à l'hydratation différée des cendres volantes. Les résistances en compression peuvent en effet dépasser 100 MPa à 1 an.

Tableau 4. Estimation des coefficients de diffusion (selon [3]).

Echéance	Avant 28 jours	28 jours à 6 mois	6 mois à 36 mois	Au-delà de 36 mois
Estimation du coefficient de diffusion	$6.10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$1.10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$0,7.10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$0,5.10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

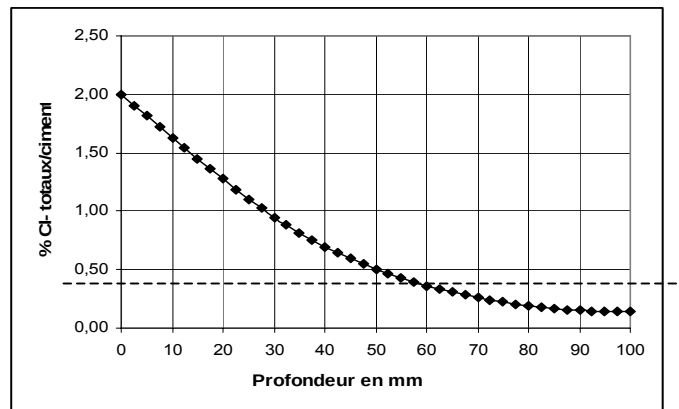


Figure 2. Simulations à 120 ans pour un coefficient de diffusion évolutif jusqu'à 36 mois puis constant et égal à $0,4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Une illustration des simulations est fournie par la figure 2 qui montre que pour un coefficient de diffusion voisin de $0,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, la concentration en chlorures au niveau d'une armature située à 70 mm de profondeur, reste inférieure au seuil d'initiation de la corrosion de 0,4%. La simulation est pessimiste dans la mesure où le calcul a pris en compte les chlorures totaux (chlorures liés + chlorures libres) alors que seuls les chlorures libres sont actifs. Bien que ne prenant pas en compte tous les paramètres pouvant intervenir sur le comportement du matériau (variations climatiques et des conditions aux limites, absorption capillaire, attaques chimiques...), le modèle, qui peut également intégrer les effets de la fissuration sur le coefficient de diffusion, permet une prédiction raisonnable de la pénétration des chlorures et par conséquent des risques de corrosion.

3. LA REALITE APRES 10 ANS DE FONCTIONNEMENT

Les campagnes d'essais réalisées par le LERM entre 1998 et 2004 et actuellement poursuivies ont mis en œuvre toute une «panoplie» de mesures complémentaires qui ont permis de constituer une base de donnée très importante : perméabilité, coefficient de diffusion, porosité, profils de concentration en chlorures, profondeur de carbonatation, réflectométrie radar, potentiel d'électrodes et vitesse de corrosion. Ces mesures ont été complétées par des examens microstructuraux. A titre d'exemple la campagne menée entre 2001 et 2004 concernait 67 zones représentant une surface de 1500 m^2 où 200 mesures non destructives et de profondeur de carbonatation ainsi que 1200 dosages en chlorures ont été effectués.

Les résultats de ces différentes campagnes d'essais, dont la suite est programmée jusqu'en...2043, tendent à conforter la démarche performantielle adoptée. Ils montrent que :

- dans son ensemble, l'ouvrage présente un bon état général ;
- aucune anomalie importante n'a été relevée ;
- les paramètres mesurés, en particulier les profils en chlorures, les coefficients de diffusion et les profondeurs de carbonatation, évoluent peu ;
- l'attaque chimique par l'eau de mer est généralement très faible ;
- la pénétration des chlorures reste très en deçà du seuil fixé ;
- aux échéances considérées, les mesures des profils réels, en accord avec les simulations, tendent à valider le modèle prédictif utilisé ;
- les simulations à 120 ans, qui pourront être optimisées grâce aux résultats accumulés lors des différentes campagnes d'essais, restent très vraisemblables.

Toutefois, les différentes campagnes d'auscultation par réflectométrie radar, par mesure de potentiels d'électrodes et de vitesse de corrosion, révèlent l'existence de zones sensibles en relation avec un enrobage des aciers localement insuffisant et avec des hétérogénéités de texture inhérentes aux aléas du chantier. Ces zones sensibles, qui constituent environ 15% de la surface auscultée sont bien identifiées. Elles pourront faire l'objet de réparations, de traitements préventifs et d'instrumentation suivant un plan de gestion intégrant les résultats du suivi particulier dont elles font l'objet.

4. CONCLUSION

L'exemple présenté montre tout l'intérêt de l'approche performantielle dans le cas de la construction d'ouvrages à durée de vie longue où la simple application des normes montre ses limites. Le suivi important qui l'accompagne devrait permettre de compléter et d'affiner le modèle prédictif mis en œuvre. Il devrait également fournir des informations très utiles sur la pertinence des seuils pris en compte pour les indicateurs de durabilité dont la mesure nécessite des méthodes fiables et harmonisées.

5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Monachon P. Durabilité du pont Vasco de Gama sur le Tage à Lisbonne. Durabilité des bétons. En hommage à Michel Salomon, juin 1997, Paris, CATED 1997, pp 27-34.
- [2] Hornain H., Monachon P., Martinet G., Duboin C., Durée de vie des ouvrages en béton. De la recherche aux applications. Du laboratoire au chantier. Science de Matériaux et Propriétés des Bétons, 1ères Rencontres Internationales, Toulouse, 5 et 6 mars 1998, LMDC, Institut National des Sciences Appliquées – Université Paul Sabatier, Toulouse, France, pp 309-316.
- [3] Linger L., Martinet G., Le pont Vasco de Gama à Lisbonne. Dix ans de démarche durabilité, GC' 2005, Paris 5 et 6 octobre.
- [4] AFGC, 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. Etat de l'art et Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité, Edité par l'AFGC, juillet 2004
- [5] Bernard M., La construction du pont Vasco de Gama, Travaux n° 743, 1998, pp.18-20
- [6] Glass G.K., Buenfeld N.R., Chloride threshold levels for corrosion induced deterioration of steel in concrete, International RILEM Workshop, Chloride penetration into concrete, Saint-Remy-Les-Chevreuse, France, 15-18 octobre 1995
- [7] AFREM, Durabilité des bétons, Mesure de la perméabilité aux gaz des bétons, Mode opératoire, 1997
- [8] Tang L., Nilsson L.O., Rapide determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field, ACI journal, n°89-M6, 1992
- [9] AFREM, Durabilité des bétons, Mesure de la porosité accessible à l'eau des bétons, Mode opératoire, 1997
- [10] AFREM, Durabilité des bétons, Mesure de la profondeur de carbonatation des bétons par la méthode de la phénolphthaléine, Mode opératoire, 1997
- [11] AASHTO T277-93, Standard test method of test for electrical indication of concrete ability to resist chloride, American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard specifications for transportation materials and method for sampling and testing, 16th edition, 1993, Part II,-Tests, Washington, DC, pp 876-881
- [12] Houdusse O., Marchand J., Hornain H., Prédiction de l'évolution de la concentration des ions présents dans les matériaux cimentaires : modélisation du transport ionique par la méthode des éléments finis, Science de Matériaux et Propriétés des Bétons, 1ères Rencontres Internationales, Toulouse, 5 et 6 mars 1998, LMDC, Institut National des Sciences Appliquées – Université Paul Sabatier, Toulouse, France, pp 151-158.
- [13] Houdusse O., Hornain H., Martinet G., Prediction of long term durability of Vasco de Gama bridge in Lisbon, 5th CANMET/ACI Conference on Durability of Concrete, Barcelone, 5-9 juin 2000, pp 1037-1051