

CONCEPTION AVEC PRISE EN COMPTE DE LA CORROSION

David Conciatori, Jacques Marchand, Benoit Bissonnette, Marc Jolin

Université Laval, Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), Pavillon

Adrien-Pouliot, Québec (QC), Canada, G1K 7P4

Résumé

La corrosion des barres d'armature est la première cause des interventions de remise en état sur les ouvrages en béton armé. Dans le domaine des ouvrages d'art routiers, cette corrosion est initiée dans la majorité des cas par la présence de chlorures provenant des produits salants utilisés pour déneiger les routes en hiver. Alors que le phénomène de corrosion en présence d'ions chlorures est relativement bien connu, l'effet du microclimat et l'importance de l'exposition d'un élément en béton armé sur le transport des ions chlorures à travers le béton d'enrobage ne sont pas encore bien compris et modélisés.

Plusieurs modèles permettent aujourd'hui de décrire l'évolution physico-chimique d'agents agressifs dans le béton armé et leur interaction avec l'eau et la température, et donc de prédire l'évolution des détériorations. L'aspect non déterministe de la problématique de la corrosion peut également être pris en considération dans ces modèles complexes et donner une idée sur l'incertitude d'apparition de dégâts structuraux. Cette évaluation plus fine des risques de détérioration par corrosion permet de constituer une base objective de dimensionnement à la corrosion, de discussion et de concertation entre maîtres d'œuvre et spécialistes de la maintenance des ouvrages.

1. INTRODUCTION

L'évolution des détériorations dans les ouvrages routiers dépend de l'exposition de l'ouvrage à l'eau liquide ou sous forme de vapeur et à d'autres agents agressifs. Les bordures de ponts et les joints sont les zones les plus exposées aux agents agressifs, aux stagnations d'eau et aux détériorations précoces [8] [10]. Il a également été démontré que l'évolution des détériorations est plus rapide sur des zones en contact direct avec l'eau et les agents agressifs que sur d'autres zones plus protégées [7] [9] [16].

Le transport des ions dans le béton armé se modélise actuellement avec des méthodes numériques complexes et non linéaires [3] [8] [11] [14] [17], telles que la méthode des éléments finis, des différences finies, des transformations de Fourier, etc. [4]. Les paramètres de ces modèles s'obtiennent par des observations en laboratoire ou des mesures *in situ* et comportent des incertitudes, liées aux méthodes de mesures, à la modélisation, etc. Ces paramètres incertains peuvent définir des conditions de bord, des conditions aux limites et des coefficients constituant le modèle de transport [1] [2] [5] [7].

L'approche probabiliste permet l'évaluation de la probabilité d'initiation de la corrosion d'un élément d'ouvrage. Avec l'approche probabiliste, les simulations numériques sont mises en évidence à travers la variabilité de plusieurs paramètres, à savoir les paramètres de

transport, l'épaisseur d'enrobage et la teneur critique en ions chlorures. Pour effectuer l'évaluation de la probabilité d'initiation de la corrosion, un dénominateur commun est défini entre la sollicitation et la résistance, soit la concentration en ions chlorures au niveau de l'acier d'armature. La variabilité de l'épaisseur d'enrobage permet de rapporter une simulation se situant à un point discret de l'élément d'ouvrage à l'ensemble de l'élément d'ouvrage [2].

Cet article se propose de donner les définitions et les méthodes amenant aux considérations sous forme probabiliste de l'initiation de la corrosion. L'initiation de la corrosion sous forme probabiliste permet d'évaluer la fiabilité d'une structure existante et de définir des recommandations de dimensionnement.

2. EXPOSITION DES OUVRAGES

Les différentes zones d'un ouvrage routier sont étudiées en fonction de leur degré d'exposition au microclimat environnant. Les conditions climatiques provenant de stations météorologiques et la cinétique des véhicules permettent de définir des zones d'exposition aux produits salants et au climat. Une division judicieuse d'un ouvrage en éléments, par une approche *segmentielle*, permet de prendre en considération l'importante variabilité spatiale des conditions d'exposition (Figure 1).

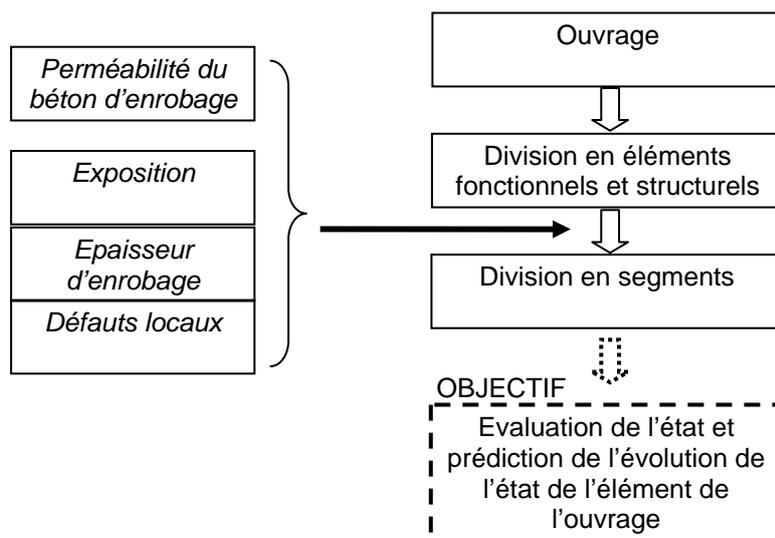


Figure 1 : Méthode de division en éléments et en segments [11].

L'analyse du microclimat proposé utilise un grand nombre de stations météorologiques sur le territoire suisse, un monitoring d'un ouvrage routier, des enquêtes auprès des autorités publiques, de mesures *in situ* et de recherches bibliographiques. Cette analyse a permis de connaître les zones éclaboussées par l'eau ou la saumure et d'élaborer un modèle simulant le microclimat de chaque zone d'exposition [2].

Il ressort de cette analyse trois zones d'exposition différentes des ouvrages,

- zone d'exposition au brouillard salin,
- zone d'exposition aux éclaboussures,

- et la zone d'exposition aux eaux stagnantes.

Le brouillard salin se forme principalement par le passage des véhicules où de fines particules sont projetées dans l'atmosphère, puis transportées par le vent sur de grande distance. Tous les ouvrages routiers en contact avec l'air extérieur sont exposés au brouillard salin. Les éclaboussures sont également émises par l'énergie cinétique des véhicules. Ainsi par le passage des véhicules, des gouttelettes d'eau sont projetées latéralement, ce qui restreint à une hauteur limitée cette zone d'exposition. Lorsque l'eau ne s'évacue pas par gravité, une accumulation d'eau peut se produire et former une zone d'exposition aux eaux stagnantes (Figure 2).

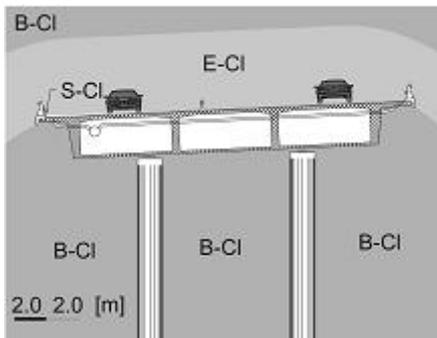


Figure 2 : Profil type d'un pont ou viaduc autoroutier avec les différentes zones d'exposition (vitesse des véhicules à 120 [km/h]), E exposition aux éclaboussures, S exposition aux eaux stagnantes, B exposition au brouillard salin, CI présence de chlore.

La quantité de produits salants est modélisée en définissant la quantité de produits salants épanchue lors du passage de la saleuse et l'instant de passage de la saleuse. L'instant de passage s'obtient en combinant les quantités de produits salants annuels épanchés au climat local, mesuré par une station météorologique.

3. TRANSPORT IONIQUE

Les mouvements ioniques se trouvent influencés par le mouvement de la solution interstitielle, par un processus de diffusion, par les réactions chimiques avec le squelette du béton et le niveau thermique. Ces mouvements ioniques sont modélisés à l'aide des équations de diffusion de Fick. Il existe également un couplage électrique entre les différents ions faisant apparaître un potentiel électrochimique. Ce potentiel électrochimique permet de garantir une solution interstitielle neutre, du point de vue de leur charge électrique. L'équation de Poisson permet de prendre en considération le couplage électrique. La dissolution ou la précipitation d'ions est prise en compte en considérant les relations d'équilibre de chaque phase solide de la pâte de ciment hydratée [15].

La description du mouvement et des équilibres chimiques des ions dans la solution interstitielle montre déjà la complexité de la modélisation. Les méthodes empiriques ne peuvent pas être utilisées et la résolution de ces systèmes demande des outils mathématiques évolués (méthode des éléments finis, des différences finies, Newton-Raphson, etc.), se situant dans le domaine du non linéaire. Connaissant les conditions de bord du modèle (l'exposition de l'ouvrage à l'eau et aux produits salants), il est possible de prédire l'évolution temporelle

et spatiale de la concentration d'ions dans la solution interstitielle dans les pores du béton [15].

4. APPROCHE PROBABILISTE

L'insertion de paramètres, modélisés par une distribution probabiliste dans un modèle numérique de transport complexe, exclut toutes solutions analytiques par des méthodes d'intégration directe, par la méthode de Monte Carlo ou autres. Si les solutions analytiques sont plus précises, dans le cas présent, elles demandent également des temps de calcul gigantesques [6] [18]. La méthode de Rosenblueth [12] [13], ou la méthode des estimations ponctuelles, peut être vu comme un cas particulier de Monte Carlo en utilisant soit l'échantillonnage stratifié, soit la méthode des variables antithétiques [2].

Les résultats de la simulation (concentration des différents ions), évoluant avec le temps dans le béton, représentent une sollicitation au niveau des barres d'armature. Le produit de convolution, entre la sollicitation et la capacité de résister aux agressions ioniques, fournit la probabilité d'amorçage par corrosion d'une détérioration des barres d'armature (Figure 3).

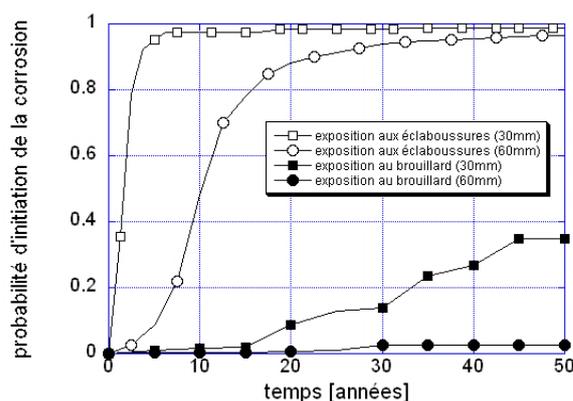


Figure 3 : Exemple d'analyse d'un ouvrage dans le cas d'un climat suisse de plaine pour un béton $E/C=0.42$, pour deux zones d'exposition et pour deux épaisseurs d'enrobage du béton.

Une analyse de risque peut être approchée par une concertation du maître d'ouvrage et l'ingénieur des structures en considérant respectivement la valeur d'utilisation de l'ouvrage et la fonction structurale de l'élément considéré. La fonction structurale de l'élément considéré doit être prise en considération selon sa fonction statique dans la structure. Cette évaluation utilise le concept développé dans l'approche *segmentielle* (Figure 1) [2] [11]. La distinction se porte sur les éléments porteurs ayant un rôle primordial, secondaire voire non porteur de l'ouvrage étudié (Figure 4).

La «valeur d'utilisation» de l'ouvrage prend en considération l'importance de l'ouvrage dans un réseau routier et sa durée de service restante prévue. L'importance de l'ouvrage est souvent reliée au niveau de trafic et au type de desserte, comme les routes à grand débit, les routes principales, les routes de liaison, les routes collectrices et les routes de desserte. La durée de service de l'ouvrage est un second paramètre planifié par le maître d'œuvre, fixé par la demande de la société et du maître d'ouvrage et en fonction de la durabilité d'éléments

d'ouvrage. Par l'intermédiaire de la durée de service de l'ouvrage, la planification d'inspections, de remises en état, de remplacements ou de reconstructions d'une structure peut influencer la valeur d'utilisation de l'ouvrage (Figure 4).

Valeur d'utilisation de l'ouvrage	grand	50 %	20 %	20 %
	moyen	80 %	50 %	20 %
	faible	80 %	80 %	50 %
		faible	moyen	grand
		Importance en tant qu'élément structural		

Figure 4 : Matrice mettant en relation l'ouvrage et l'élément d'ouvrage pour évaluer une valeur cible requise.

5. CONCLUSION

1. La conception d'ouvrages en béton armé peut être étudiée en incorporant des caractéristiques de durabilité du matériau qui sont fonction des conditions climatiques et de l'exposition à des produits salants.
2. Une prédiction de la détérioration des structures tenant compte du climat et de la présence de produits salants permet de définir des zones d'exposition et d'intégrer les inspections dans une approche *segmentielle*.
3. La fiabilité d'une structure peut être évaluée par une approche probabiliste. L'approche proposée permet d'intégrer des paramètres probabilistes dans un modèle complexe où par exemple le transport des ions dans la solution interstitielle des pores du béton est prédit sur la base de processus de diffusion, de dissolution de la pâte cimentaire et de précipitation.
4. L'analyse de risque peut être pondérée pour tenir compte de la valeur d'utilisation de l'ouvrage et de la fonction structurale de l'élément considéré.

REFERENCES

- [1] Conciatori, D., Denarié, E., Brühwiler, E., Influence of microclimate on the probability of initiation of chloride induced corrosion in reinforced concrete, in P. Schiessl (ed.), 4th International Ph.D. Symposium in Civil Engineering, Springer-VDI, Munich Germany, September 2002.
- [2] Conciatori, D., Effect of microclimate on the corrosion initiation of steel reinforcement in reinforced concrete structures, Doctoral thesis n° 3408, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland, 2005 (in French).

- [3] Ishida, T., Maekawa, K., A Computational Method for Performance Evaluation of Cementitious Materials and Structures under Various Environmental Actions, Integrated Life-Cycle Design of Materials and Structures -ILCDES2000-, Helsinki,, 2000.
- [4] Jaun A., Numerical Methods for partial and differential equations, Swedish Netuniversity, 92 p., Stockholm, Sweden, 2003.
- [5] Kirkpatrick T. J., Weyers R. E., Anderson-Cook C. M., Sprinkel M. M., Probabilistic model for the chloride-induced corrosion service life of bridge decks, cement and concrete research, 1 - 18, June, 2002.
- [6] Kong J. S., Ababneh A. N., Frangopol D. M., Xi Y., Reliability analysis of chloride penetration in saturated concrete, Probabilistic Engineering Mechanics, 17, pp 305 - 315, 2002.
- [7] Lindvall, A., Environmental Actions and Response, Reinforced Concrete Structures Exposed in Road and Marine Environments, Göteborg, Chalmers University of Technology, 2001.
- [8] Marchand, J., Samson, E., Burke, D., Tourney, P., Thaulow, N., Sahu, S., Predicting the Microstructural Degradation of Concrete in Marine Environment, in V. M. Malhotra (ed.), SP-212 Sixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Thessaloniki, Greece, 2003.
- [9] Masuda M. Y., Condition survey of salt damage to reinforced concrete buildings in Japan, Thomas Telford Publications, Concrete for extreme conditions, proceedings of the international conference held at the university of Dundee, pp 823 - 836, Scotland, England, September, 2002.
- [10] Paulsson-Tralla J., Silfwerbrand J., Estimation of chloride ingress in uncracked ancracked concrete using surface measured concentrations, ACI Materials Journal, V.99, N°1, pp 27-36, January - February, 2002.
- [11] Roelfstra, G., Hajdin, R., Adey, B., Brühwiler, E.: Condition evolution in bridge management systems and corrosion induced deterioration, ASCE Journal of Bridge Engineering, Vol. 9, No.3, pp.268-277, 2004.
- [12] Rosenblueth E., Point estimates for probability moments, Proceedings of the National Academy of Sciences of USA, 72(10), 3812-3814, 1975.
- [13] Rosenblueth E., Two-point estimates in probabilities, Applied Mathematical Modelling, vol 5, pp 329-335, Mexique, Mexique, 1981.
- [14] Saetta, A. V., Scotta, R. V., Vitaliani, R. V., Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete, ACI Materials Journal, 90 (5), pp 441 - 451, 1993.
- [15] Samson, E., Marchand, J., Snyder, K. A., Beaudoin, J. J., Modelling ion and fluid transport in unsaturated cement systems for isothermal conditions, Cement and Concrete Research 35 141–153, 2005.
- [16] Schiegg, Y., Böhni, H., Hunkeler, F., Online-Monitoring of Corrosion in Reinforced Concrete Structures, FIB, Proceedings of the 1st fib Congress, pp 49 - 58, Zurich, Switzerland, 2002.
- [17] Tang, L., Chloride transport in concrete - Measurements and Prediction, PhD thesis, Building Materials, Chalmers, Göteborg, Sweden, 1996.
- [18] Val D. V., Stewart M. G., Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments, Structural Safety 25, pp 343 - 362, 2003.