

MODÈLES FIABILISTES POUR LA PRÉVISION DE LA DURÉE DE VIE DES TABLIERS DE PONTS EN BÉTON

Zoubir Lounis

Conseil National de Recherches Canada
Ottawa, Ontario

RÉSUMÉ

Cet article présente deux différents types de modèles fiabilistes pour la prévision de la durée de vie des tabliers de ponts en béton qui permettent une gestion efficace de la maintenance des ouvrages d'art. Le premier modèle est de type mécano fiabiliste où la performance physique de la dalle est décrite par une fonction appelée marge de sécurité, qui mesure la différence entre la résistance de la dalle et les effets des charges mécaniques et/ou environnementales sur la dalle. Ce type de modèle est utilisé pour prédire la variation avec le temps de la probabilité de défaillance de la dalle. Les différents temps pour atteindre les différents états de défaillance correspondant à différents états limites peuvent être prédis incluant les états de corrosion des armatures, fissuration, délaminage, éclatement du béton d'enrobage, et rupture. Un autre type de modèle qui prédit l'accumulation de l'endommagement de la dalle comme un processus stochastique a été développé. Dans ce modèle, la durée de vie de la dalle est prédite comme le temps ou l'état absorbant est atteint. L'intégration de ces deux modèles permettra une gestion optimale des tabliers de ponts.

INTRODUCTION

Les ouvrages d'art constituent un lien critique dans le réseau routier et un investissement considérable en infrastructure qui devrait être maintenue en bonne condition pour faciliter le trafic routier, supporter le commerce, la croissance économique et la mobilité personnelle. Cependant, en Amérique du Nord, un grand nombre de ces ouvrages d'art ont plus de 40 années et exhibent une détérioration étendue qui affecte leur sécurité et utilité, qui a comme conséquence la rupture du trafic et des coûts élevés aux usagers de la route. Les coûts de réparation et remplacement des ponts varient de 500 à 900 (\$/m²)¹. Aux Etats-Unis, environ 24% des ponts sont classifiés comme structurellement déficients et 18% comme fonctionnellement déficients, avec des coûts d'entretien estimés à \$90 milliards². Au Canada, il est estimé en moyenne que 40% des ponts ont plus de 40 années avec des coûts de réhabilitation estimés à \$10 milliards¹. Au Québec, environ 37% des ponts sont classifiés comme structurellement déficients et 2% seulement comme fonctionnellement déficients³.

Les dalles sont identifiées comme les éléments de ponts ayant le pourcentage le plus élevé de déficience en termes d'état et fonctionnalité⁴. Aux Etats-Unis, on estime qu'un tiers à la moitié des budgets d'entretien des ponts est alloué aux dalles. Les causes principales de la détérioration et de la rupture des dalles de pont en béton armé incluent la corrosion des armatures induite par les chlorures provenant des sels de déglacage, cycle gel dégel, trafic excessif, conception, protection et construction insatisfaisantes, en plus d'inspection et d'entretien inadéquats. Les sels

¹ Lounis, Z. (2000). 'Reliability-based life prediction of aging concrete bridge decks.' Rilem Publication

² Aktan, A.E., et al. (1996). 'Condition assessment for bridge management.' ASCE J. Infrast Systems, 2(3), 108-177

³ Richard, G. (1999). Etat des ouvrages d'art du réseau routier québécois. Workshop on Corrosion in Civil Engrg.

⁴ Weyers, R.E., et al. (1993). Concrete bridge protection, repair, and rehabilitation relative to reinforcement corrosion: a methods application manual, SHRP-S-360.

de déglacement appliqués aux chaussées et aux ponts pendant l'hiver en Amérique du Nord sont la source primaire des chlorures.

Les coûts élevés associés à la préservation des ouvrages d'art vieillissant et les budgets limités assignés pour leur entretien posent des défis techniques et économiques significatifs qui exigent le développement et l'implémentation de nouvelles approches systématiques pour la gestion des ouvrages d'art. De telles approches devraient fournir un support effectif à la prise de décision dans la planification de l'inspection, l'entretien et la réhabilitation durant tout le cycle vie d'un réseau de structures ou d'ouvrages. L'implémentation d'un tel système va assurer la sécurité et la fiabilité du réseau de ponts, une durée de vie prolongée des structures et des coûts de cycle de vie réduits. Un système efficace de gestion de ponts devrait inclure les modèles ou outils suivant : (i) techniques pour l'évaluation de l'état des structures de ponts en utilisant l'inspection visuelle et les méthodes d'évaluation non destructive; (ii) modèles pour la prévision de la détérioration et la durée de vie des structures; et (iii) modèles pour l'optimisation de l'entretien.

Cependant, la prévision de la durée de vie ou du temps pour la réhabilitation ou remplacement d'un tablier de pont en béton armé n'est pas une tâche facile car elle implique la considération de plusieurs critères, incluant :

- (i) Conditions spécifiées pour l'endommagement maximum acceptable qui assure la sécurité et l'utilité ;
- (ii) L'économie en évaluant les coûts de cycle de vie de toutes les stratégies possibles d'inspection, de maintenance et de réhabilitation, y compris l'option ' ne rien faire' ;
- (iii) Les coûts d'usagers associés à la fermeture d'une ou plusieurs voies dues aux activités d'entretien sur le pont, incluant les coûts dus aux délais, les coûts d'opération de véhicules, les coûts engendrés par les accidents, les coûts pour la société (p. ex. pollution);
- (iv) Décision au niveau réseau versus la décision au niveau projet, c.-à-d. la décision sur la stratégie de durée de vie et d'entretien a été prise en considérant simultanément les éléments principaux (dalle, poutres, piliers, etc.) de tous les ponts qui constituent le réseau et prioriser les projets en se basant non seulement sur leur état mais également sur leur importance et leur risque de défaillance.

En plus des critères ci-dessus, le modèle de prévision de durée de vie devrait également tenir compte de l'incertitude dans les paramètres qui contrôlent l'endommagement cumulatif de la structure, à savoir la performance du béton, la résistance de l'acier à la corrosion, les conditions environnementales, les conditions initiales, etc. Les sources d'incertitude incluent l'incertitude physique ou inhérente liée à la variabilité des propriétés du béton et de l'acier (coefficient de diffusion, résistance du béton à la traction, résistance de l'acier aux chlorures), variabilité de l'épaisseur du béton d'enrobage, de la concentration en chlorures à la surface, en plus de l'incertitude dans la détection de l'endommagement (p. ex. corrosion, fissuration intérieure, délaminage). Les méthodes fiabilistes pour la prévision de l'état et la durée de vie des structures en béton ont été utilisées dans différents types de structures.

Dans cet article, deux différents types de modèles fiabilistes pour la prévision de la durée de vie des tabliers de ponts en béton sont présentés. Le premier modèle est de type mécano fiabiliste où la performance physique de la dalle est décrite par une fonction appelée marge de sécurité, qui

mesure la différence entre la résistance de la dalle et les effets des charges mécaniques et/ou environnementales sur la dalle. Ce type de modèle est utilisé pour prédire la variation avec le temps de la probabilité de défaillance de la dalle. Les différents temps pour atteindre les différents états de défaillance correspondant à différents états limites peuvent être prédits incluant les états de corrosion des armatures, fissuration, délaminage, éclatement du béton d'enrobage, et rupture. L'autre type de modèle est basé sur le modèle d'endommagement de Bogdanoff qui prédit la détérioration stochastique de la dalle avec le temps. Dans ce modèle, la durée de vie de la dalle est prédite comme le temps ou l'état absorbant est atteint. L'intégration de ces deux modèles permettra une gestion optimale des tabliers de ponts. Les modèles présentés peuvent modéliser explicitement toutes les sources d'incertitude associées avec la détérioration des dalles de ponts en béton armé.

MODÈLE MÉCANO-FIABILISTE

La performance et la durée de vie des structures en béton exposées aux chlorures peuvent être idéalisées par la version modifiée du modèle à deux périodes de Tuutti⁵ illustré sur la Figure 1, à savoir :

- (i) Période d'initiation durant laquelle les chlorures pénètrent le béton d'enrobage, atteignent les armatures supérieures, et s'accumulent jusqu'à ce que leurs concentrations atteignent le "niveau de seuil" qui initie la corrosion. La durée de cette période dépend de plusieurs paramètres, y compris l'épaisseur du béton d'enrobage, la concentration en chlorures à la surface de la dalle (fonction de la quantité de sels de déglacage utilisée), la qualité du béton d'enrobage (perméabilité, diffusivité), du type d'armature utilisée (acier conventionnel, acier époxy, acier inoxydable, acier galvanisé, etc.);
- (ii) Période de propagation durant laquelle les effets mécaniques sur le béton (contraintes de traction) induits par l'expansion des produits de corrosion mènent à l'endommagement cumulatif du béton (fissuration, délaminage, éclatement), la réduction de la résistance ultime, la perte de l'adhérence entre l'acier et le béton et finalement la rupture. La durée de cette période dépend principalement du taux de corrosion, des propriétés de rupture de béton, épaisseur du béton d'enrobage, type de produits de corrosion, espacement et diamètre des barres.

La définition de la défaillance ou de la durée de vie des structures en béton arme endommagées par la corrosion n'est pas simple. La durée de vie peut être définie comme le temps où un des états limite suivants est atteint : initiation de la corrosion, fissuration, délaminage, éclatement, endommagement excessif atteignant une certaine quantité indiquée. Une définition appropriée de la défaillance ou rupture, et par conséquent de la durée de vie devraient considérer le risque de défaillance acceptable, qui dépend des conséquences associées avec les différents états limites (p. ex. risque de perte de vie et de blessure, délais ou interruption de la circulation, coûts de réparation, etc.). La figure 1 illustre les différentes possibles définitions de la durée de vie d'une structure en béton armé construite en un milieu corrosif.

⁵ Tuutti, K. (1982). "Corrosion of steel in concrete." CBI Report F 482, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.

Dans cet article, l'application des méthodes fiabilistes sera illustrée pour le cas où l'état limite de corrosion est considéré comme l'état correspondant à la fin de vie de la structure. En supposant que la pénétration des chlorures dans le béton est modélisée comme un processus Fickien de diffusion et que la résistance des armatures à la corrosion induite par les chlorures est définie par le seuil de concentration des chlorures, alors le temps pour l'initiation de la corrosion (T_i) est donné par l'équation suivante :

$$T_i = f(C_s, C_{th}, D, d_c) = \frac{d_c^2}{4D[\text{erf}^{-1}(1 - \frac{C_{th}}{C_s})]^2} \quad (1)$$

où C_s = concentration de chlorures en surface; C_{th} = seuil de concentration des chlorures pour l'initiation de la corrosion; D = coefficient de diffusion; et d_c = épaisseur du béton d'enrobage.

Les paramètres C_s , C_{th} , D , d_c et T_i exhibent une incertitude assez considérable due à une combinaison de variabilités d'ordre physique (inhérente), statistique ou de modélisation. Les coefficients de variation de certains de ces paramètres peuvent varier de 5% jusqu'à plus de 50%, ce qui rend l'utilisation de modèles déterministes totalement injustifiable. Ainsi, tous ces paramètres doivent être modélisés comme variables aléatoires ou champs aléatoires.

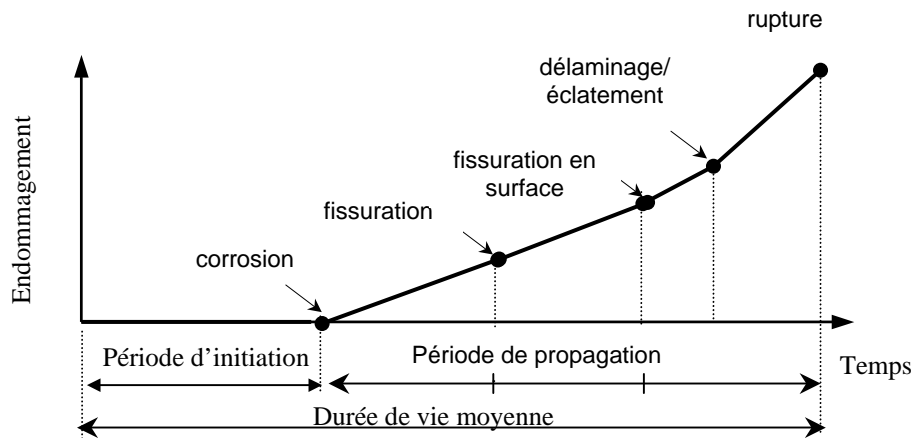


Figure 1 - *Détérioration et durée de vie des structures en béton armé en milieux corrosifs*

Alors la probabilité de corrosion au temps t , $P_f(t)$, est donnée par :

$$P_f(t) = P(T_i \leq t) = \int_0^t f_{T_i}(x) dx \quad (2)$$

où f_{T_i} est la densité de probabilité du temps d'initiation de la corrosion. La probabilité de corrosion peut être déterminée en utilisant différentes méthodes fiabilistes comme la méthode fiabiliste du premier ordre (FORM) ou du second ordre (SORM), ou la technique de simulation de

Monte Carlo⁶. En utilisant la technique de Monte Carlo, la probabilité de corrosion peut être calculée comme suit :

$$P_f = \int \dots \int I[g(\mathbf{x}) \leq 0] f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (3)$$

où \mathbf{x} est le vecteur des variables aléatoires et $g(\mathbf{x})$ est la fonction de performance ou marge de sécurité pour l'état limite considéré [$g(\mathbf{x}) = T_i - t$], et $I[]$ est une "fonction d'indicateur" qui est égale à 1 si $[]$ est "vraie" et 0 si $[]$ est "faux".

Si \mathbf{x}_j représente le j^{e} vecteur des observations aléatoires de $f_{\mathbf{x}}$, alors il suit directement de la théorie des statistiques que :

$$P_f \cong \sum_{j=1}^N I[g(\mathbf{x}_j) \leq 0] / N \quad (4)$$

Exemple

L'approche proposée ci-dessus est illustrée sur une dalle de pont en béton armé qui est exposée aux chlorures des sels de déglçage. Une évaluation non destructive et destructive étendue de la dalle a été entreprise. Les données d'un relevé sur le terrain ont montré un niveau considérable de variabilité de tous les paramètres mesurés avec des coefficients de variation s'étendant de 34% pour l'épaisseur du béton d'enrobage à 60% pour le coefficient de diffusion. La distribution du temps d'initiation de corrosion des armatures supérieures a été obtenue en utilisant la simulation de Monte Carlo comme illustré par la figure 2. Cette méthode fiabiliste prédit une probabilité de corrosion de 80% après 40 ans. Les résultats simulés étaient très près des données de terrain, qui illustrent les possibilités de prévision des méthodes fiabilistes par opposition aux méthodes déterministes.

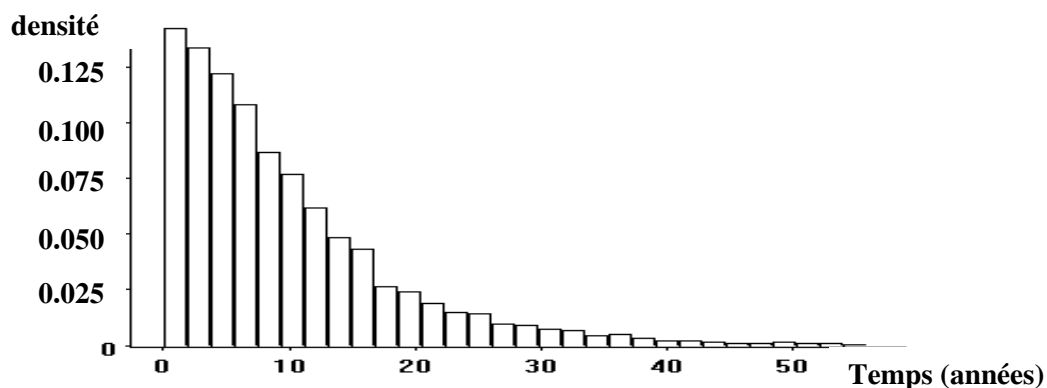


Figure 2 - Distribution du temps d'initiation de la corrosion

⁶ Melchers, R.E. (1999). "Structural reliability : analysis and prediction." John Wiley & Sons

MODÈLE D'ENDOMMAGEMENT CUMULATIF STOCHASTIQUE

Comme cité précédemment, la fin de la durée de vie des tabliers de pont en béton est associé à l'accumulation de dommages irréversibles induits principalement par la corrosion des armatures, en plus des effets des cycles gel dégel, des charges routières et des dommages initiaux. En outre, sous les conditions de service, les rapports signal/bruit sont sensiblement inférieurs à ceux obtenus dans des conditions contrôlées de laboratoire. Les fluctuations autour de la performance moyenne et de la vie moyenne sont suffisamment grandes et ne peuvent pas être ignorées sans conséquences graves dû aux grandes fluctuations dans l'environnement en service, le comportement de la dalle, les dommages initiaux, etc. Par conséquent, une modélisation probabiliste de l'accumulation des dommages et de la durée de vie est exigée pour obtenir des résultats fiables.

Dans cet article, le modèle d'endommagement cumulatif de Bogdanoff est utilisé pour prédire la performance future et la durée de vie des dalles de pont en béton. Le modèle assume une structure évolutionnaire probabiliste du processus d'accumulation de dommages. L'état du pont est discrétisé dans un espace fini d'état avec sept états de dommages comme décrit dans la section précédente. L'élément de base du modèle est le concept du 'cycle d'utilisation', qui est définie comme une période répétitive d'opération durant le cycle de vie d'une structure où l'hypothèse d'accumulation de dommages est non négative est satisfaite.

Dans cet article, le cycle d'utilisation est défini comme une année durant laquelle la dalle est soumise aux effets des sels de déglçage pendant l'hiver, les cycles gel dégel, la charge routière et son propre poids. La distribution de probabilité des dommages après un cycle d'utilisation dépend seulement du cycle d'utilisation et des dommages accumulés au début du cycle d'utilisation ; ainsi elle est indépendante de la façon dont les dommages ont été accumulés au début du cycle d'utilisation. Ces hypothèses mènent au fait que le processus d'endommagement peut être modelé comme un processus Markovien à temps discret et espace d'états discrets. L'évolution probabiliste des dommages est complètement déterminée par la matrice stochastique appelée matrice de transition pour chaque cycle d'utilisation et état initial de dommages.

L'élément $P_{i,j}$ de la matrice de transition correspond à la probabilité conditionnelle de l'état de dommage j au temps $t+1$, qui dépend seulement de l'état de dommage i au temps t , comme suit:

$$P_{ij} = P(D_{t+1}=j \mid D_t=i) \quad (5)$$

De la théorie des chaînes de Markov, il suit que l'endommagement stochastique au temps t est donné par:

$$\mathbf{P}_t = \mathbf{p}_0 \mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2 \dots \mathbf{P}_t = [p_t(1) \quad p_t(2) \quad \dots \quad p_t(b)] \quad (6)$$

où $p_t(i)$ est la probabilité que la dalle soit à l'état i au temps t . Si tous les cycles d'utilisation ont une amplitude constante durant tout le cycle de vie de la dalle, alors la matrice de transition devient constante et égale à \mathbf{P} , ce qui mène a un processus stochastique stationnaire. Ainsi, l'équation 2 se simplifie comme suit :

$$\mathbf{P}_t = \mathbf{p}_0 \mathbf{P}^t \quad (7)$$

La durée de vie de la dalle peut être définie comme le temps correspondant à l'état dit absorbant ou ultime (b). Pour le cas où le vecteur de dommage initial est $P_0(1)$, la fonction de répartition de la durée de vie est donnée par :

$$F_T(t) = P(T \leq t) = p_t(b) \quad t=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

Pour le cas où le vecteur de dommage initial a plusieurs éléments différent de zéro, la fonction de répartition de la durée de vie est donnée par :

$$F_T(t) = P(T \leq t) = \sum_{k=1}^{b-1} p_0(k) F_{Tk}(t) \quad (9)$$

où $F_{Tk}(t)$ est la fonction de répartition du temps auquel l'état d'endommagement atteint l'état absorbant pour la première fois étant donné un état initial k . Si on suppose que la condition de la dalle peut être discrétisé en sept états ayant des cotes d'évaluation D variant de 1 pour état excellent, jusqu' à 7 pour état critique, le modèle stochastique développé prédit la variation avec le temps de l'endommagement de la dalle comme illustré en figure 3.

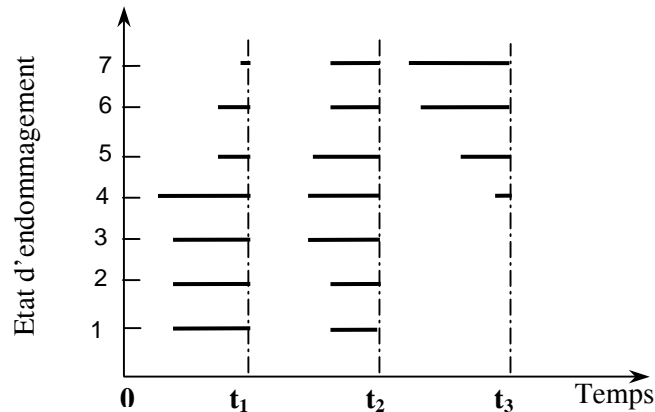


Figure 3 - Evolution stochastique de l'endommagement de la dalle de pont

Exemple

Le modèle présenté ci-dessus est utilisé pour prédire l'accumulation des dommages dans une dalle en béton armé. Un cycle d'utilisation constant est considéré durant tout le cycle de vie de la dalle. En plus, un modèle de Bogdanoff à saut unitaire est considéré avec une matrice de transition stationnaire dont les éléments sont les suivants : $p_{11}=0.70$, $p_{22}=0.75$, $p_{33}=0.85$, $p_{44}=0.90$, $p_{55}=0.98$, $p_{66}=0.98$, et $p_{77}=1.0$. La probabilité de la condition actuelle de la dalle est illustrée en figure 4(a) et elle est décrite par le vecteur suivant :

$$P_0 = [0.06 \quad 0.34 \quad 0.31 \quad 0.19 \quad 0.08 \quad 0.01 \quad 0.01] \quad (10)$$

En utilisant l'équation (7), l'état de la dalle après 10, 30, et 50 années est illustré en figure 4(b).

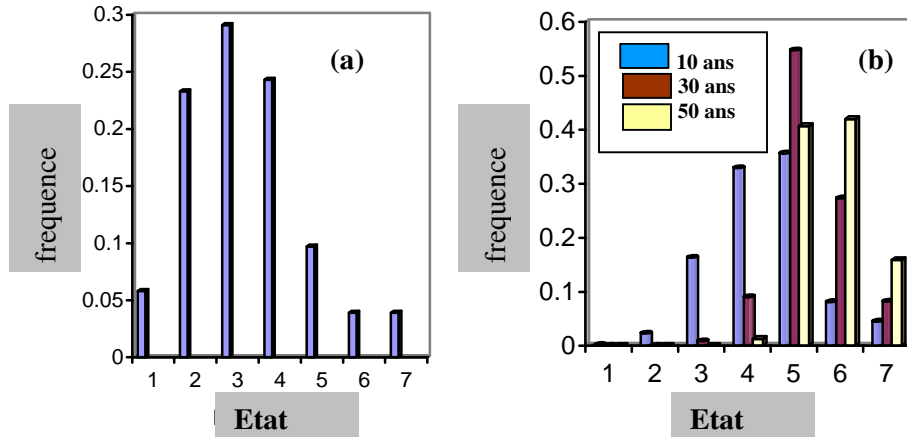


Figure 4 - Probabilité d'endommagement de la dalle : (a)Etat présent ; (b) Etats futurs

CONCLUSIONS

L'incertitude considérable associée avec les modélisations mathématiques des phénomènes physiques décrivant le comportement des structures en béton en milieux corrosifs dicte l'utilisation de modèles probabilistes ou fiabilistes. Deux types de modèles ont été présentés dans cet article qui ont différentes capacités de prévision et d'utilisation. Le modèle mécano fiabiliste est utilisé pour prédire la variation avec le temps de la probabilité de défaillance de la dalle. Les différents temps pour atteindre les différents états de défaillance correspondant à différents états limites peuvent être prédits. Le modèle d'endommagement cumulatif prédit l'accumulation de dommages dans la dalle comme un processus stochastique. L'intégration de ces deux modèles permettra une gestion optimale des structures de ponts.