

ÉTUDE DE LA FIABILITÉ STRUCTURALE DE PONTS EN BÉTON ARMÉ

Anne-Marie Langlois
Étudiante

Josée Bastien
Professeure titulaire

Marc Jolin
Professeur agrégé

CRIB - Université Laval, Département de génie civil, Québec, Canada

RÉSUMÉ: Un outil informatique, appelé « Laval Reliability Toolbox 2 » (LRT2), a été développé pour permettre d'évaluer dans le temps l'indice de fiabilité d'un pont en béton armé selon divers paramètres d'utilisation et d'endommagement. L'outil présenté innove en considérant la fiabilité des états limites ultimes de flexion et de cisaillement des poutres. Les différents éléments structuraux forment un système afin de représenter le mode de défaillance du pont. Un modèle d'endommagement permet de simuler dans le temps les propriétés d'une structure soumise à la corrosion causée par l'application de sels déglaçants : la corrosion cause une diminution du diamètre des barres d'armatures touchées et la délamination du béton d'enrobage. L'outil développé a été utilisé pour étudier la fiabilité de ponts à deux, trois, cinq et six poutres soumis à différents scénarios d'endommagement. Des cycles de performance ont été définis afin de déterminer la durée de vie d'un pont, c'est-à-dire de déterminer le moment où il atteindra son indice de fiabilité cible et de déterminer les moments où certains endommagements surviendront. Les cycles de performances permettent aussi de comparer le comportement de différents ponts situés sur un même réseau, qu'ils soient soumis ou non à un même type d'endommagement. Ce type de méthodologie pourrait, à long terme, constituer une aide à la gestion des structures.

INTRODUCTION

La majeure partie des infrastructures routières en Amérique du Nord, construites entre les années cinquante à soixante-dix, sont maintenant endommagées et font l'objet d'inspections et d'évaluations afin de déterminer leur capacité portante. Au Canada, l'évaluation des structures routières est effectuée selon le Code canadien sur le calcul des ponts routiers, CAN/CSA-S6-06.

La norme canadienne définit un indice de fiabilité cible pour chaque élément d'un ouvrage selon trois paramètres : le comportement des éléments structuraux, le comportement de l'ouvrage global et le niveau d'inspection. Toutefois, cette règle déterministe peut difficilement représenter adéquatement les résistances et sollicitations variant dans le temps et l'espace. De plus, cette méthode ne considère pas explicitement l'interaction entre les divers éléments structuraux car c'est l'élément structural le plus critique qui déterminera le facteur de capacité de surcharge F de la structure.

La théorie de la fiabilité permet d'utiliser une approche probabiliste pour étudier statistiquement l'ensemble des paramètres influençant l'état limite (endommagement, géométrie de la structure, sollicitations, etc.) en considérant leur variabilité et leur fonction de probabilité. Des études ont permis d'estimer l'évolution de l'indice de fiabilité de structures soumises à différents types d'endommagement (Hong 2000, Akgül et Frangopol 2005a et 2005b, Liang et Lan, 2005).

Un outil numérique a été développé pour déterminer l'évolution dans le temps de l'indice de fiabilité de ponts typiques en béton armé. Cet outil se nomme « Laval Reliability Toolbox 2 » (LRT2) et fonctionne dans l'environnement MATLAB. L'originalité du projet réside dans l'analyse fiabiliste détaillée des composantes structurales du pont : les états limites ultimes de flexion et de cisaillement des poutres sont évalués le long de l'axe longitudinal de chacune des poutres principales du pont.

Les facteurs faisant varier les indices de fiabilité des éléments structuraux, dans le cas où les poutres sont endommagées par la corrosion des armatures, sont examinés en simulant des scénarios d'endommagement influençant à différents degrés la résistance à la flexion et à l'effort tranchant. Ce projet est la continuité des recherches effectuées par Plamondon (2008). Les résultats de l'ensemble de l'étude sont disponibles dans Langlois (2010).

MÉTHODOLOGIE

Notions de base de la théorie de la fiabilité

La théorie de la fiabilité permet d'évaluer une probabilité de défaillance et de considérer les incertitudes associées aux différentes variables. L'approche probabiliste consiste à comparer, pour un élément de structure, la sollicitation appliquée S avec la variable de résistance R . La sécurité de l'élément est assurée lorsque la résistance est supérieure à la sollicitation. La probabilité de dépassement de cette limite est appelée la probabilité de défaillance P_f et s'exprime comme suit (Melchers, 1999):

$$P_f = P(R < S) \quad (1)$$

La probabilité de défaillance peut être reliée à l'indice de fiabilité β par l'équation suivante (Melchers, 1999):

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (2)$$

Plus la valeur de β est élevée, plus grande est la sécurité et plus petite est la probabilité de défaillance. À titre de référence, la norme CAN/CSA-S6-06 requiert qu'une structure nouvellement conçue ait un indice de fiabilité minimal de 3.75 ce qui correspond à une probabilité de défaillance de 8.8×10^{-5} .

Lorsque plusieurs variables sont requises pour déterminer la résistance et la sollicitation d'un élément, des méthodes de calculs numériques doivent être utilisées pour déterminer β . Dans cette étude, une méthode d'approximation de premier ordre de type « First Order Reliability Method » (FORM) est utilisée. Plus de détails à ce sujet sont disponibles dans Melchers (1999).

Fiabilité d'une poutre

Afin de déterminer l'indice de fiabilité d'une structure entière, un indice de fiabilité est calculé pour chacune des composantes de la structure et pour chaque fonction d'état limite décrivant un mode de défaillance. Ces modes sont ensuite organisés en système, soit en série, en parallèle ou par une combinaison des deux afin de représenter le comportement de la structure.

La fiabilité d'une poutre peut être modélisée par un système en série. La poutre est ainsi divisée en plusieurs sections selon les changements de géométrie. La poutre est considérée défaillante dès qu'une de ses sections atteint la rupture. Dans cette étude, chaque section de poutre comporte deux états limites ultimes : la flexion (M) et le cisaillement (V). La

figure 1 illustre la modélisation pour une poutre divisée en n sections.

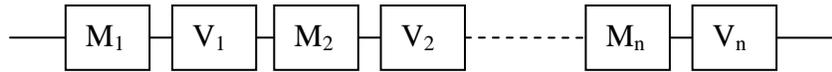


Figure 1 : Système en série représentant la défaillance d'une poutre

Les états-limites de flexion et de cisaillement sont évalués selon la norme CAN/CSA-S6-06. Les sollicitations des différents éléments structuraux ont été déterminées à partir d'une analyse par grillage. Pour la résistance en cisaillement, la méthode simplifiée a été utilisée. Toutes les variables considérées dans les calculs des états limites de flexion et de cisaillement sont décrites par une fonction de densité de probabilité. Toutes les variables sont considérées indépendantes. Les paramètres statistiques des variables pour chacun des ponts étudiés sont disponibles dans Langlois (2010).

Fiabilité d'un pont

Les poutres sont agencées pour former un système afin de simuler le mode de rupture d'un pont. Le premier mode, illustré à la figure 2 consiste à placer les poutres pour former un système en série. La rupture du pont survient dès qu'une poutre est défaillante.



Figure 2 : Pont modélisé par un système de n poutres en série

Le deuxième système, illustré par la figure 3 consiste à placer les poutres pour former un système mixte : deux poutres adjacentes forment un sous-système en parallèle, ceux-ci sont ensuite placés en série. La rupture du pont survient si deux poutres adjacentes sont défaillantes.

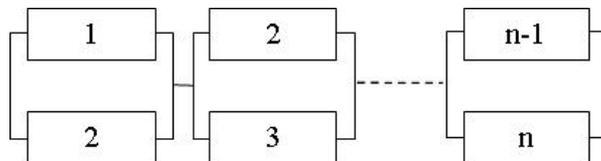


Figure 3: Pont modélisé par un système mixte de n poutres

Le coefficient de corrélation entre les poutres influence la fiabilité du système, sa valeur varie entre -1 et 1. Un système en série aura une plus grande fiabilité si la corrélation entre ses éléments est forte. À l'inverse, un système en parallèle aura une plus faible fiabilité si la corrélation entre ses éléments est forte. Dans ce cas-ci, deux coefficients de corrélation ont été utilisés : 0.5 et 0.8.

Ponts étudiés

Avec l'aide du ministère des Transports du Québec, quatre ponts en béton armé ayant des géométries régulières ont été choisis pour être analysés. Les ponts étudiés sont de type 41 (dalle sur poutres en béton armé) et sont constitués d'une seule travée où les poutres sont simplement appuyées. Les ponts ont tous deux voies carrossables. Les structures ont été construites dans les années cinquante. Dans tous les cas, la géométrie de la dalle ainsi que la hauteur et la largeur des poutres sont constantes sur toute la longueur de la travée.

Pour chacun des ponts, les poutres longitudinales ont été divisées en plusieurs sections afin de procéder aux analyses fiabilistes. Les changements de géométrie ont dicté le choix et la division des sections : un changement d'espacement des étriers ainsi qu'un ajout ou un retrait de barres d'armature de flexion entraîne une division. La longueur des sections varie de 0,4 à 2,5 m, les plus courtes sections étant aux extrémités de la poutre et les plus longues au centre.

Le tableau 2 présente les caractéristiques des ponts étudiés ainsi que leur indice de fiabilité cible selon la norme CAN/CSA-S6-06, le système choisi pour l'étude fiabiliste, la corrélation entre les poutres et l'indice de fiabilité initial du pont.

Tableau 1: Descriptions des ponts étudiés

Nom du pont	Nombres de poutres	Largeur totale (m)	Longueur totale (m) (pi)	β cible S6-06	Paramètres analyse fiabiliste		
					Système	Corrélation	β initial
2p	2 poutres	6.93	21.34 (70)	3.75	Série	0.8	1.91
3p	3 poutres	8.64	19.81 (65)	3.25	Série	0.5	4.19
5p	5 poutres	13.11	21.34 (70)	3.00	Mixte	0.5	4.42
6p	6 poutres	13.82	15.24 (50)	3.00	Mixte	0.5	5.57

La corrélation entre les poutres des ponts à 3, 5 et 6 poutres est posée égale à 0.5. Il est peu probable que la corrélation entre les poutres soit nulle car elles partagent sûrement les mêmes matériaux (même fournisseur de béton et d'acier). Toutefois, la corrélation n'est probablement pas parfaite due aux différentes étapes de construction. Peu d'information est disponible à ce sujet; une corrélation de 0.5, soit à mi-chemin entre une corrélation nulle et parfaite, semble adéquate. Le coefficient de corrélation du pont à 2 poutres est posé égal à 0.8. Il est supposé que

le nombre réduit de poutres permet d'avoir une plus grande uniformité dans les matériaux et lors des travaux de construction.

Scénarios d'endommagement

Deux types d'endommagement sont considérés: la corrosion des barres d'armatures et la dégradation du béton. Il est supposé qu'aucune opération de réfection ne s'effectue durant la vie utile du pont. L'étude s'effectue sur une période de 100 ans.

Dans le cadre de cette étude, la corrosion des armatures est causée par la pénétration des ions chlorures dans le béton. La pénétration des ions chlorures dans le béton peut être modélisée selon la deuxième loi de diffusion de Fick en assumant que le béton est un milieu poreux et saturé (Silva, 2004). Le coefficient de diffusion des ions chlore dans le béton peut être modélisé par une variable aléatoire lognormale ayant une moyenne de $2.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ et un coefficient de variation de 0.2.

La corrosion est amorcée lorsque la concentration en chlorures au niveau des barres d'armature atteint une concentration dite critique qui représente la quantité requise d'ions pour dépasser l'acier d'armature et amorcer le processus de corrosion. La concentration critique peut être modélisée par une variable aléatoire lognormale de moyenne $0.9 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$ et ayant un coefficient de variation de 0.15 (Vu et Stewart, 2000 et Akgül et Frangopol, 2005b).

La présence d'ions chlore entraîne une corrosion locale très agressive qui cause une diminution de la section des barres d'armature. Le modèle de corrosion locale de Stewart (2004) est utilisé. La limite élastique des barres corrodées diminue selon le modèle de Du, Clark et al. (2005). Il est assumé que seules les barres situées en surface sont influencées par la corrosion (figure 4).

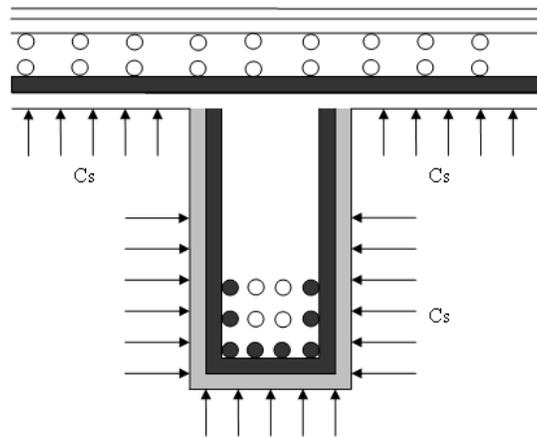


Figure 4: Schéma des armatures touchées par la corrosion due à la présence de sels déglçants en surface (C_s)

L'endommagement de la matrice de béton, délaminage ou fissuration très importante, est considéré en diminuant l'aire de la section de béton. Lorsque les pressions causées par la formation des produits de corrosion excèdent la résistance en traction du béton, une fissure se forme (Liu et Weyers, 1998). Le taux d'ouverture de la fissure est considéré proportionnel au taux de corrosion (Thoft-Christensen, 2000). Lorsque la fissure atteint une largeur de 1 mm, le

béton d'enrobage est considéré délaminé et donc, inefficace. Le courant de corrosion est un paramètre qui varie dans le temps puisqu'il est affecté par la présence de fissures : elles permettent d'augmenter la quantité d'oxygène et de sels déglaçants, accélérant ainsi le taux de corrosion des armatures. Le modèle d'évolution du courant de corrosion est basé sur Bastidas-Arteaga, Bressolette et al. (2009).

Trois types d'environnements sont considérés : peu agressif, agressif et très agressif. Le tableau 3 détaille les caractéristiques de ces environnements. Il est assumé que les environnements affectent uniformément l'ensemble des poutres de chacun des ponts. Des environnements non-homogènes ont aussi été utilisés dans Langlois (2010).

Tableau 2: Caractéristiques des environnements simulés

Variables	Distribution statistique	COV	Moyenne		
			Environnement peu agressif	Environnement agressif	Environnement très agressif
Concentration de chlorures en surface C_s (kg/cm^3)	lognormale	0.10	1.5×10^{-6}	2.5×10^{-6}	3.5×10^{-6}
Courant de corrosion initial i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	normale	0.30	1.0	2.0	5.0
Courant de corrosion final i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	normale	0.30	2.0	3.0	5.0

Afin de déterminer les concentrations de surface pour chacun des types d'environnements, des profils de concentrations de chlore prélevés sur 20 dalles de ponts situés au Québec par le ministère des Transports ont été utilisés. Les concentrations choisies en environnement peu agressif, agressif et très agressif correspondent au 17^e, 46^e et 57^e percentile des données recueillies. Les choix des taux de corrosion sont basés sur des données in-situ disponibles dans la littérature. Un résumé de ces données est disponible dans Langlois (2010).

RÉSULTATS

Comparaison de la fiabilité des ponts dans le temps

Les ponts ont été soumis à un endommagement homogène en milieu peu agressif, agressif et très agressif. L'analyse est effectuée sur 100 ans. Les résultats sont présentés aux figures 5 à 7. Évidemment, plus l'endommagement est agressif, plus la fiabilité des ponts diminuent rapidement dans le temps.

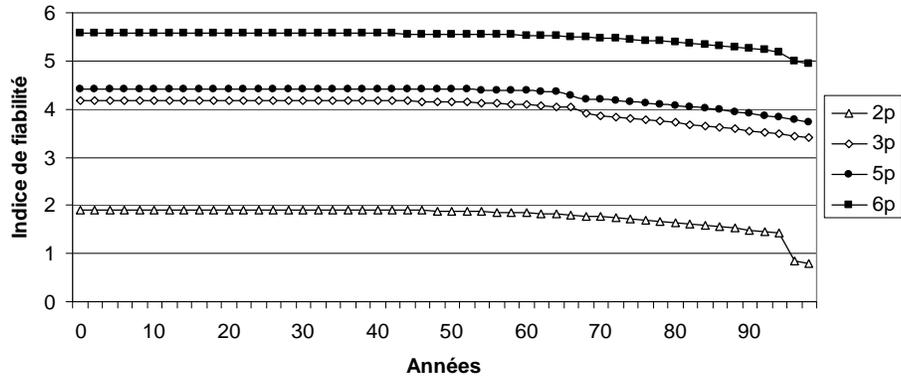


Figure 5: Indices de fiabilité des ponts à 2 poutres (2p), 3 poutres (3p), 5 poutres (5p) et 6 poutres (6p) soumis à un endommagement homogène peu agressif

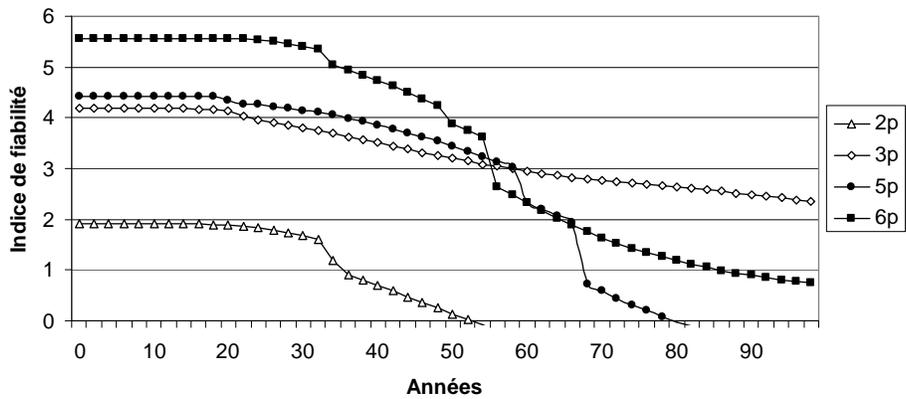


Figure 6: Indices de fiabilité des ponts à 2 poutres (2p), 3 poutres (3p), 5 poutres (5p) et 6 poutres (6p) soumis à un endommagement homogène agressif

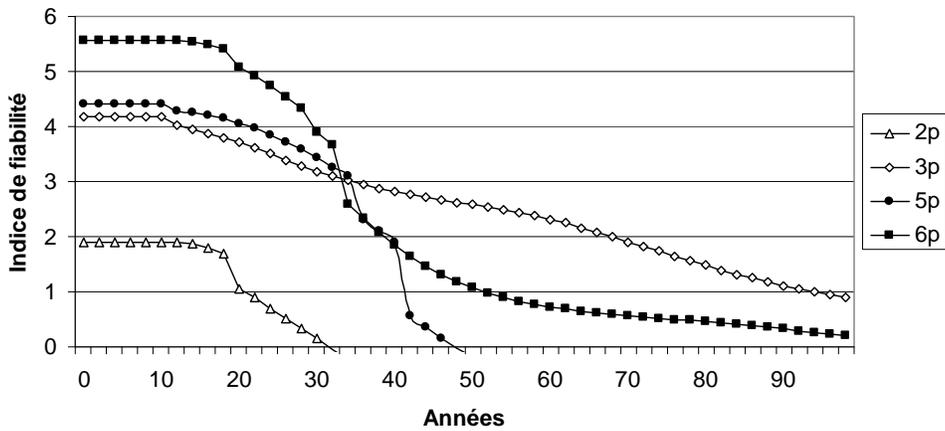


Figure 7: Indices de fiabilité des ponts à 2 poutres (2p), 3 poutres (3p), 5 poutres (5p) et 6 poutres (6p) soumis à un endommagement homogène très agressif

Les environnements agressifs et très agressifs influencent grandement la fiabilité des ponts et c'est dans ces cas seulement que les ponts à 3, 5 et 6 poutres atteignent leur indice de fiabilité cible de 3.25, 3.00 et 3.00 respectivement. Le pont à 2 poutres est problématique car sa fiabilité

initiale est inférieure à l'indice cible de 3.75 tel qu'exigé par la norme, ce pont ne sera donc pas comparé à son indice cible. Il est pertinent de mentionner que les poutres de rive du pont à 5 poutres ont un indice de fiabilité initial inférieur à l'indice cible du pont. Toutefois, puisque ce pont est considéré comme un système mixte, la fiabilité du système est plus élevée que celle de ses composantes individuelles. Ainsi, à l'état non-endommagé, la fiabilité globale du pont est supérieure à l'indice cible.

La fiabilité des ponts est peu influencée lorsque ceux-ci sont soumis à un environnement peu agressif car la corrosion des étriers est initiée très tardivement. En prenant l'exemple du pont à 6 poutres, la corrosion est initiée à 72 ans. En environnement agressif et très agressif, la corrosion des étriers débute respectivement vers 15 ans et 9 ans. Même si dans ces deux derniers cas la corrosion débute à l'intérieure d'une période restreinte, la durée de vie du pont soumis à un environnement très agressif est réduite significativement. Le pont atteint son indice cible à 56 ans en environnement agressif et à 34 ans en environnement très agressif, ceci est principalement dû à un taux de corrosion deux fois plus élevé. Si le même taux de corrosion avait été appliqué dans ces deux types d'environnement, la courbe de la fiabilité du pont en environnement agressif aurait été identique à celle de l'environnement très agressif mais décalée de 6 ans, soit la différence entre les temps d'initiation à la corrosion. Ces résultats démontrent que le temps d'initiation de la corrosion est un paramètre utile pour évaluer la durée de vie d'une structure mais que la vitesse de propagation de la corrosion est le paramètre le plus significatif. Cette conclusion est valide pour tous les ponts étudiés et rejoint celles émises par Sun et Hong (2002).

L'observation des résultats des figures 5 à 7 permet de caractériser et de comparer le comportement de plusieurs ponts soumis à un endommagement. Par exemple, à la figure 7, le comportement du pont à 3 poutres en environnement homogène très agressif présente une fiabilité qui diminue de manière progressive dans le temps. Les comportements des ponts à 2, 5 et 6 poutres, en regard de la fiabilité, sont beaucoup plus critiques puisque lorsqu'un certain niveau d'endommagement est atteint, leur fiabilité diminue soudainement, offrant peu de marge de manœuvre en matière de gestion. Ce type de structures devrait donc être priorisé pour les opérations de réfection puisqu'un report de celles-ci de quelques années pourrait être très pénalisant.

L'évolution de l'indice de fiabilité dans le temps est fortement liée aux aspects de durabilité de la structure. En environnement agressif et très agressif, les ponts à 2, 5 et 6 poutres voient leur fiabilité diminuer soudainement à un certain moment. Les ponts à 2, 5 et 6 poutres possèdent des étriers simples alors que le pont à 3 poutres possède des étriers doubles. Les étriers doubles consistent en une paire d'étriers extérieurs et une paire d'étriers placée à l'intérieur de la section. Puisque dans le cadre de cette étude, seuls les étriers situés en surface corrodent, les ponts ayant des étriers doubles respecteront toujours la quantité d'acier minimale alors que les ponts ayant des étriers simples pourront voir leurs étriers corroder totalement. La résistance du béton n'étant pas suffisante pour reprendre les efforts de cisaillement, les ponts à étriers simples verront leur fiabilité en cisaillement diminuer rapidement influençant ainsi la fiabilité de la structure entière. La disposition des étriers est ici un facteur déterminant sur l'évolution de la fiabilité des ponts dans le temps.

Détermination des cycles de performance des ponts

La méthodologie utilisée dans cette étude permet de déterminer le moment où différentes étapes d'endommagements surviennent. Ces étapes ont été identifiées « cycles de performance » par Silva (2004). La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**figure 8 illustre ce concept de cycle de performance pour le pont à 3 poutres en environnement homogène très agressif. Différents cycles de performance ont été choisis : initiation à la corrosion des étriers T_{iniAv} , délaminage de la poutre T_{wspal} , corrosion de 20% de l'aire des étriers sur la section $T_{20\%Av}$, corrosion de 20% de l'aire des aciers de flexion sur la section $T_{20\%As}$ et atteinte de l'indice de fiabilité cible $T_{\beta cible}$. Ceci permet de suivre l'évolution de la performance du pont tout au long de sa vie utile.

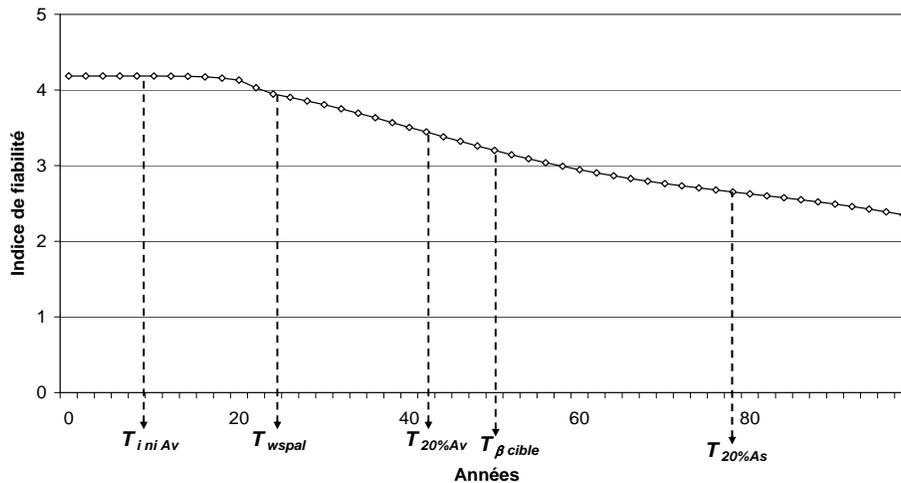


Figure 8: Cycles de performance pour le pont à 3 poutres soumis à un endommagement homogène très agressif

Les cycles de performance d'une structure peuvent servir de base de comparaison entre des structures d'un même réseau et soumises à des environnements similaires ou non. Cette façon de faire peut aider à identifier les structures à prioriser pour des types d'interventions définis. Les cycles de performance du pont sont évidemment liés aux aspects de durabilité du pont. Par exemple, le pont à 3 poutres est celui ayant le plus faible recouvrement des armatures et par conséquent le premier à corroder lorsque comparé avec des ponts ayant des recouvrements plus importants soumis à des environnements similaires.

Les cycles de performance permettent de suivre le comportement d'un pont dans le temps en évaluant la fiabilité globale de l'ouvrage. Le choix des cycles de performance peut porter sur l'atteinte d'états limites ultimes mais également sur des états limites de service. En fait, un choix judicieux des cycles de performance doit être adapté aux caractéristiques de la structure tout en permettant la comparaison avec d'autres structures. Ce type de méthodologie constitue une aide à la gestion des structures visant à faciliter le choix des interventions prioritaires. L'analyse des cycles de performance d'un pont peut aussi permettre de justifier certains choix de conception tels que l'épaisseur des recouvrements des armatures et la disposition des étriers en fonction du type d'environnement auquel la structure est soumise.

CONCLUSION

Un outil numérique, appelé « Laval Reliability Toolbox 2 » (LRT2) et fonctionnant avec le logiciel MATLAB, a été développé afin d'étudier l'évolution de l'indice de fiabilité de ponts en béton armé dans le temps. Cet outil intègre un modèle d'endommagement à une analyse fiabiliste où les variabilités spatiales et temporelles des paramètres sont considérées. L'analyse fiabiliste est basée sur une méthode d'approximation du premier ordre de type FORM. Il a été démontré que la méthodologie développée permet de suivre dans le temps l'indice de fiabilité de ponts et de caractériser leur comportement dans le temps lorsque soumis à un endommagement. Les résultats démontrent que la vitesse de propagation de la corrosion semble être un facteur déterminant pour évaluer la durée de vie d'une structure.

Il est important de mentionner les limites actuelles du modèle d'endommagement. La plus importante est celle liée à l'endommagement de la matrice de béton qui n'est pas considéré. L'exercice ici a été poussé très loin avec une analyse sur 100 ans et des endommagements jugés parfois extrêmes en pratique. L'objectif était de démontrer qu'il est possible d'intégrer une analyse fiabiliste à une prédiction de l'endommagement pour estimer la performance d'un pont dans le temps. Il serait pertinent d'intégrer au modèle l'utilisation de statistiques bayésiennes afin de mettre à jour l'indice de fiabilité de la structure en considérant les données recueillies lors d'inspections.

Le concept de cycles de performance a été utilisé afin de déterminer la durée de vie d'un pont, c'est-à-dire de déterminer le moment où il atteindra son indice de fiabilité cible, et de déterminer les moments où certains endommagements surviendront. Cette méthodologie permet également de comparer les performances de plusieurs structures entre elles, qu'elles soient soumises ou non à un même type d'endommagement. Le choix des cycles de performance doit être adapté aux caractéristiques de la structure tout en permettant la comparaison avec d'autres structures de même type. De plus, ces choix doivent refléter les priorités du gestionnaire de l'ouvrage tout en maintenant un risque jugé acceptable. Ce type de méthodologie peut constituer une aide à la gestion des structures.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le ministère des Transports du Québec (MTQ) pour sa collaboration à la réalisation de ce projet. Les auteurs remercient également le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et le Fond québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) pour leur support financier.

RÉFÉRENCES

- Akgül, F. et D.M. Frangopol (2005a). "Lifetime performance analysis of existing reinforced concrete bridges I : Theory." Journal of Infrastructure Systems, **11**(2), 122-128.
- Akgül, F. et D.M. Frangopol (2005b). "Lifetime performance analysis of existing reinforced concrete bridges i i: Application." Journal of Infrastructure Systems, **11**(2), 129-141.
- Bastidas-Arteaga, E., P. Bressolette, A. Chateauneuf et M. Silva S. (2009). "Probabilistic lifetime assessment of rc structures under coupled corrosion-fatigue deterioration processes." Structural Safety, **31**, 84-96.
- Du, Y.G., L.A. Clark et A.H.C. Chan (2005). "Residual capacity of corroded reinforcing bars." Magazine of Concrete Research, **57**, 135-147.
- Hong, H. P. (2000). "Assessment of reliability of aging reinforced concrete structures." Journal of Structural Engineering-Asce, **126**(12), 1458-1465.
- Langlois, A.M. (2010). "Influence de l'endommagement sur la fiabilité structurale de ponts en béton armé: études de cas" M.Sc., Université Laval, 227 p.
- Liang, M.T. et J.J. Lan (2005). "Reliability analysis for the existing reinforced concrete pile corrosion of bridge substructure." Cement and Concrete Research, **35**, 540-550.
- Liu, Y. et R.E. Weyers (1998). "Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures." ACI Materials Journal, **95**(6), 675-681.
- Melchers, R.E (1999). Structural reliability, analysis and prediction. Toronto, John Wiley & Sons, 437 p.
- Plamondon, M. (2008). "Étude de l'influence de l'endommagement sur la fiabilité d'un pont existant en béton armé." M.Sc., Université Laval, 183 p.
- Silva, R.C. (2004). "Contribution à l'analyse probabiliste de la performance des ponts en béton armé." Ph.D., École Nationale des Ponts et Chaussées, 241 p.
- Stewart, M.G. (2004). "Spatial variability of pitting-corrosion and its influence on structural fragility and reliability of rc beams in flexure." Structural Safety, **26**, 453-470.
- Sun, J. et H.P. Hong (2002). "Effect of reinforcement corrosion on reliability of bridge girders." Civil Engineering and Environmental Systems, **19**(1), 67-85.
- Thoft-Christensen, P. (2000). Stochastic modeling of the crack initiation time for reinforced concrete structures. Elgaaly Mohamed, ASCE, 103, 157.
- Vu, K.A.T. et M.G. Stewart (2000). "Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models." Structural Safety, **22**(4), 313-333.