

## **Approche probabiliste pour évaluer la fiabilité des ponts isolés à la base, sous l'effet simultané des séismes et de la température en régions froides**

M. Nassar<sup>1</sup>, L. Guizani<sup>2</sup>, M.-J. Nollet<sup>2</sup> and A. Tahan<sup>3</sup>

### **RÉSUMÉ**

Au cours des dernières décennies, l'isolation sismique à la base a gagné un intérêt croissant au Québec et s'est imposée comme l'un des moyens le plus efficaces pour protéger les ponts contre les tremblements de terre. Les propriétés hystérétiques des systèmes d'isolation sismique, notamment la résistance caractéristique  $Q_d$ , et la rigidité post-élastique  $K_d$ , sont d'une importance primordiale, car elles régissent la performance sismique des ponts isolés à la base. Cependant, ces propriétés varient sous l'effet de différentes conditions y compris la température. En l'absence d'une approche fondée sur la fiabilité pour tenir compte de la variabilité de ces propriétés et des aléas sismiques, les codes spécifient une méthode d'analyse aux bornes limites dans laquelle les limites supérieures et inférieures possibles de  $Q_d$  et de  $K_d$  sont utilisées pour évaluer la performance et le comportement des ponts isolés à la base sous l'effet d'un tremblement de terre. Cette approche est incohérente avec les approches de conception basées sur la fiabilité, telle que l'approche *Load and Resistance Factor Design (LRFD)*, utilisées par les mêmes codes pour les autres combinaisons de charge et de résistance.

Cet article présente les grandes lignes d'une approche fondée sur la probabilité pour évaluer la fiabilité des ponts isolés à la base en tenant compte de la variabilité des propriétés d'hystérésis du système d'isolation en fonction de différentes conditions et de leurs probabilités d'occurrence en même temps que le séisme. Les différents paramètres, y compris les conditions affectant les propriétés hystérétiques du système d'isolation ainsi que l'aléa sismique sont modélisés comme des variables aléatoires. La méthode Monte-Carlo est employée pour générer un ensemble de réalisations selon leurs distributions probabilistes prédéfinies. Pour chaque réalisation, les états limites régissant différents critères de performance de la structure sont évalués pour calculer la probabilité de défaillance.

Un pont en béton armé de deux travées, avec une pile-colonne simple, isolé à la base par un système d'isolation en élastomère avec noyau de plomb est présenté comme une étude de cas élémentaire pour illustrer l'application de l'approche proposée. Le pont a été conçu selon le code CSA-S6-14 en considérant l'effet du séisme et une température concomitante égale à la

---

<sup>1</sup>Candidat au doctorat, Dépt. de génie de la construction, ÉTS, Montréal, (e-mail:mohamad.nassar.1@ens.etsml.ca)

<sup>2</sup>Professeur, Dépt. de génie de la construction, École de technologie supérieure, Montréal, Canada

<sup>3</sup>Professeur, Dépt. de génie mécanique, École de technologie supérieure, Montréal, Canada

Nassar M, Guizani L, Nollet MJ, Tahan A. **Approche probabiliste pour évaluer la fiabilité des ponts isolés à la base, sous l'effet simultané des séismes et de la température en régions froides.**

température quotidienne moyenne minimale, selon l'approche d'analyse aux bornes limites. Pour évaluer sa fiabilité, le pont isolé à la base a été modélisé comme un système linéaire viscoélastique équivalent à un degré de liberté au moyen d'un modèle générique. La température, l'aléa sismique, les dimensions de la pile et les résistances des matériaux sont considérés comme variables aléatoires et leurs distributions sont prédéfinies. Les propriétés hystérétiques intrinsèques du système d'isolation sont reliées à la température par des fonctions basées sur des études empiriques. La différence entre la capacité nominale en flexion de la pile (résistance) et la demande sismique à la base (solicitation) définit l'unique fonction d'état limite du problème évaluée.

Dix (10) millions de réalisations ont été générés. Le modèle générique a été ajusté pour représenter chaque réalisation et soumis à une analyse spectrale. Un indice de fiabilité de 4,45 a été obtenu. Ce niveau de fiabilité correspond approximativement à une probabilité annuelle de défaillance de  $5,4 \times 10^{-6}$ . L'indice estimé par la méthode présentée est nettement supérieur à l'indice de fiabilité cible de 3.75 du code pour lequel la probabilité annuelle de défaillance visée est  $88,4 \times 10^{-6}$ . Ainsi, les premiers résultats préliminaires indiquent que la conception sismique des ponts isolés à la base selon l'approche de calcul aux bornes limites avec l'hypothèse que la température concomitante au séisme de calcul égale à la température quotidienne moyenne minimal est trop conservatrice.

Les travaux de recherche dans le cadre de ce projet se poursuivent et visent à étendre et généraliser l'approche proposée en vue de l'appliquer de manière efficace à des situations plus complexes.

## **Introduction**

La réponse sismique des ponts isolés à la base est fortement régie par les propriétés hystérétiques des Systèmes d'Isolation Sismique (SIS). Pour la plupart des SIS, le comportement hystérétique peut être modélisé par un modèle bilinéaire défini par deux propriétés principales : 1) la résistance caractéristique  $Q_d$  et, 2) la rigidité post-élastique  $K_d$ . Cependant, pour les systèmes couramment utilisés, ces propriétés sont affectées par la température et d'autres conditions externes telles que le vieillissement et la contamination. Pour tenir compte de cette variabilité, les codes nord-américains [1, 2] recommandent une méthode d'analyse aux bornes limites pour l'évaluation de la réponse lors de la conception des ponts isolés, tandis que les mêmes codes utilisent des combinaisons de charges et de résistance basées sur la fiabilité pour les autres états limites ultimes, à l'exclusion du séisme [3]. Les principaux inconvénients de l'approche de l'analyse aux bornes limites actuellement utilisée sont le manque de cohérence avec l'approche probabiliste des codes de conception basée sur un seuil minimal de fiabilité d'où un excès de conservatisme suspecté dans l'application des dits codes. En effet, cette approche surestimerait la variation des propriétés du système d'isolation qui peut se produire simultanément avec le séisme de conception, parce que leur probabilité d'occurrence simultanée n'est pas considérée.

L'objectif principal de l'étude est de développer une approche probabiliste pour considérer la variabilité des propriétés hystérétiques dans la conception sismique et l'évaluation de la performance des ponts isolés à la base. Pour illustrer la mise en œuvre de la méthodologie

proposée, ses principaux éléments sont présentés et appliqués pour évaluer la fiabilité sismique d'un pont en béton armé, situé à Montréal (QC, Canada).

### Concept d'analyse aux bornes limites

Le concept de l'analyse aux bornes limites consiste à analyser et concevoir le pont sous les bornes limites, maximales et minimales, des propriétés (ici les propriétés hystérétiques du SIS) affectées par un ensemble de conditions variables. Les valeurs maximales et minimales des propriétés hystérétiques du SIS sont obtenues au moyen de facteurs de modification et ce dans le but de prendre en compte leurs sensibilités à des conditions variables de température, vieillissement, etc[4, 5] Il s'agit d'appliquer des facteurs de modification appropriés aux valeurs nominales d'une propriété  $P_n$  du système d'isolation (ex.  $Q_d$  et  $K_d$ ) pour estimer ses valeurs maximales et minimales. Les valeurs maximale et minimale d'une propriété,  $P_{max}$  et  $P_{min}$  respectivement, sous l'effet de multiples conditions sont obtenues par le produit de la valeur nominale de la propriété  $P_n$  et les facteurs de modification de propriété  $\lambda_{max}$  et  $\lambda_{min}$  associés à l'effet de ces conditions. Ainsi, pour  $n$  conditions externes affectant une propriété donnée du SIS, les facteurs de modification sont obtenus comme suit:

$$\lambda_{max} = (\lambda_{max,1})(\lambda_{max,2}) \dots (\lambda_{max,n}) \text{ et } \lambda_{min} = (\lambda_{min,1})(\lambda_{min,2}) \dots (\lambda_{min,n}) \quad (1)$$

Chaque paire de facteurs de modification partielle  $\lambda_{max,i}$  et  $\lambda_{min,i}$  ( $1 \leq i \leq n$ ) est établie à partir des essais de laboratoire et des données de la littérature disponibles pour le SIS considéré. Le code canadien et l'AASHTO ainsi que la littérature du domaine donnent des valeurs typiques de ces facteurs partiels pour différents SIS communément utilisés. Les valeurs minimales sont généralement égales à l'unité [1, 5]. Enfin, un facteur d'ajustement global,  $\lambda_{adj}$ , qui vise à prendre en compte la probabilité d'occurrence simultanée des différents effets et la catégorie d'importance du pont, est appliqué pour obtenir les valeurs de conception des facteurs de modification,  $\lambda_{max,adj}$  et  $\lambda_{min,adj}$  [3]. Ces facteurs d'ajustement sont toutefois basés sur le jugement de l'ingénieur (subjectif en quelque sorte) et non sur des analyses probabilistes rigoureuses.

### Approche probabiliste proposée

L'approche probabiliste proposée pour étudier l'effet de différentes conditions sur la performance sismique des ponts isolés à la base peut être résumée par les étapes suivantes:

#### Étape 1: Formuler les critères de conception en termes d'états limites quantitatifs

Soit  $\mathbf{g} = \{g_1, \dots, g_m\}$  la fonction pour  $m$  états limites à évaluer. Chaque fonction d'état limite,  $g_i = g_i(X_1, \dots, X_n)$  définit le domaine de sécurité (lorsque  $g_i > 0$ ) et le domaine de défaillance ( $g_i \leq 0$ ). Où  $\mathbf{X} = \{X_1, \dots, X_n\}$  est le vecteur des  $n$  variables aléatoires de base régissant le problème. Ceci peut être appliqué dans les deux principales approches de conception des codes en vigueur [1] : ① L'approche basée sur la capacité et, ② l'approche basée sur la performance. Pour la première, les fonctions d'états limites peuvent être définies comme la différence entre les

capacités de résistance et les demandes en termes d'efforts (en flexion, en cisaillement, etc.). Pour l'approche basée sur la performance, les fonctions d'état limite peuvent être définies comme la différence entre les capacités en termes de forces et de déformations et les demandes en termes de forces et/ou de déformations élastiques et inélastiques;

## **Étape 2: Créer un modèle structural / mathématique générique pour le système de pont et des charges**

Selon la complexité du pont et les critères de conception, plusieurs modèles, allant des modèles élastiques à un seul degré de liberté (1 DDL) aux modèles tridimensionnels non linéaires complexes, peuvent être requis. Les résultats de l'analyse structurale du modèle développé doivent permettre, directement ou indirectement, l'évaluation des fonctions d'états limites définies à l'étape 1.

## **Étape 3: Définir l'ensemble des variables aléatoires d'entrée $X$ régissant le modèle du pont et des charges**

Ces variables incluent notamment les dimensions structurales, les propriétés des matériaux, les toutes les charges incluant les charges sismiques, la température effective (interne) du SIS ainsi que d'autres conditions affectant les propriétés du modèle. Pour chaque variable  $X_j$ , une distribution aléatoire paramétrée doit être déterminée (ex. normale, Weibull, etc.). La distribution peut être prédéfinie par des experts ou identifiée à partir des données disponibles avec l'algorithme de maximum de vraisemblance. Le test d'ajustement non paramétrique (*Goodness-to-fit*) de Kolmogorov-Smirnov (K-S) est utilisé pour valider le choix des distributions aléatoires.

En outre, les relations entre les propriétés hystérétiques du SIS et les variables d'entrée qui les affectent doivent être définies. Des données basées sur la revue bibliographique ainsi que des données exclusives sont requises à ces fins [6, 7].

## **Étape 4: Générer un nombre suffisant de réalisations (valeurs échantillonnées) des variables d'entrée**

Il s'agit de générer un nombre suffisamment élevé de combinaisons possibles et simultanées des valeurs des variables aléatoires d'entrée pour assurer la convergence de la méthode Monte-Carlo.

## **Étape 5: Analyser les réalisations et évaluer les fonctions d'états limites, $g$**

Pour chaque réalisation générée, faire une analyse structurale du modèle et extraire les efforts, déformations, déplacements et autres résultats requis pour évaluer les fonctions d'états limites  $g_i$ .

## Étape 6: Calculer la probabilité de défaillance

En utilisant les méthodes numériques (Monte-Carlo) ou analytiques (*First Order Reliability Method*: FORM ou *Second Order Reliability Method*: SORM), calculer la probabilité de défaillance  $P_{f,i}$  de chaque état limite  $g_i$  et son indice de fiabilité associé  $\beta_i$ .

Ces probabilités de défaillance et indices de fiabilité des fonctions d'états limites peuvent être traduites en probabilité de défaillance globale  $P_f$  du système de pont isolé à la base.  $P_f$  est la probabilité de défaillance de l'état limite le plus proche du point de conception [8, 9].

## Étude de cas et résultats

Pour illustrer l'application de l'approche proposée, un pont à deux travées en béton armé et isolé à la base est considéré comme un cas d'étude. Il est situé dans la ville de Montréal et fondé sur un sol appartenant à la catégorie d'emplacement sismique C. La hauteur de la pile centrale du pont est de 7,5 m. La pile du pont supportant un poids tributaire de 15 000 kN, est isolée dans sa direction longitudinale avec huit isolateurs sismiques en élastomère à noyau de plomb et ayant des valeurs nominales globales de leurs propriétés hystérétiques  $Q_d$  et  $K_d$  égales à 496 kN et 7,2 kN / mm respectivement.

La demande en flexion pondérée  $M_{r,requis}$  à la base de la pile est établie avec une analyse spectrale à 7600 kN.m. Ceci a été obtenu avec des facteurs de modification maximum pour l'effet de température  $\lambda_{max,t} = 1.5$  pour  $Q_d$  et 1.3 pour  $K_d$ . Ces valeurs maximales du facteur de modification,  $\lambda_{max,t}$ , sont établies pour une température quotidienne minimale  $T_{min} = -34$  °C (pour Montréal) [1, 10]. Les valeurs minimales des facteurs de modification sont égales à l'unité. La pile a été conçue pour une capacité de flexion pondérée pourvue  $M_{r,pourvu}$  est de 7700 kN.m. La méthodologie proposée est appliquée comme suit:

**Étape 1:** Le pont étudié est un pont essentiel. Selon la performance sismique exigée par le code CSA-S6-14, sous le séisme de conception, le pont doit rester fonctionnel et dans le domaine élastique. Nous supposons que la défaillance des deux culées n'est pas préoccupante et que celles-ci possèdent suffisamment de marge résistance. Il est également considéré que la pile est détaillée pour écarter tous les modes de rupture fragile, tels que le cisaillement, de sorte que le seul mode de défaillance de la pile est le mode de flexion à la base de la pile. Il en résulte que la seule fonction limite du problème considérée est  $g = R - S$ , où  $R$  est la capacité (résistance) en flexion de la base de la pile et  $S$  est la demande (solicitation) sismique maximale en termes de moment de flexion sollicitant la base de la pile.

**Étape 2:** Le système est modélisé comme un système linéaire équivalent élastique à 1 DDL. La force sismique sollicitant le système représente le cisaillement à la base de la pile. Ce cisaillement multiplié par la hauteur permet d'obtenir le moment de flexion à la base de la pile, requis pour évaluer la fonction d'état limite.

**Étape 3:** Les variables aléatoires d'entrée du problème sont : 1) La température horaire moyenne de Montréal, disponible sur la plateforme d'Environnement Canada [www.climat.meteo.gc.ca](http://www.climat.meteo.gc.ca) et représentée par une distribution normale mixte à deux modes. À cause de l'effet de l'inertie

thermique de l'isolateur et le mécanisme de transfert de chaleur, la température interne de l'isolateur n'est pas la température ambiante. L'isolateur sismique est modélisé comme un système dynamique d'ordre 1. La fonction de transfert de l'isolateur [11] dépend d'une constante de temps  $\tau$ . Cette dernière est identifiée par une simulation de la réponse thermique suite à un échelon de température par la méthode des éléments finis. Dans le cas étudié, le système possède une constante de temps égale à environ  $\tau = 6$  heures. La fonction de transfert ainsi modélisée est employée pour prédire la température effective (interne) à partir de la température ambiante (externe) qui représente la fonction excitatrice. 2) Les dimensions de la pile du pont et les propriétés des matériaux avec leurs incertitudes sont modélisées selon les distributions données par l'étude de (Nowak et al., 2017) [7, 12]. Ces variables d'entrée permettent de calculer la résistance à la flexion  $R$ ; 3) L'aléa sismique à savoir le séisme maximum ayant une période de retour d'un an. Ceci est modélisé en tant que spectre d'accélération d'entrée selon le modèle de l'aléa sismique avec les incertitudes associées obtenues à partir de [13].

**Étapes 4 & 5 & 6:**  $N = 10^7$  simulations sont générées. Pour chaque réalisation, la force sismique est calculée par une analyse spectrale élastique permettant d'obtenir le moment de flexion à la base de la pile [1]. Ce moment est ensuite comparé à la résistance à la flexion calculée pour le set de valeurs générées aléatoirement de dimensions et de propriété mécanique des matériaux donnant une évaluation de la fonction d'état limite ( $g = R - S$ ). Chaque fois que  $g \leq 0$ , on a un cas de défaillance. Le nombre total des cas défaillants divisé par le nombre total de réalisations de l'échantillon représente la probabilité annuelle de défaillance. Dans notre cas d'étude, une probabilité annuelle de défaillance de  $P_f = 5,4 \times 10^{-6}$  et un indice de fiabilité  $\beta = 4.45$  ont été obtenus.

On note que  $\beta$  obtenu pour ce cas élémentaire est significativement plus élevé que l'indice de fiabilité annuel cible du code  $\beta_{cible} = 3,75$ , pour la durée de vie nominale de 75 ans [1]. Ce résultat indique que considérer la température quotidienne moyenne minimale comme température concomitante au séisme de calcul (2% en 50 ans) dans l'approche de conception actuelle basée sur l'analyse aux bornes limites conduirait à une conception trop conservatrice. En faisant varier la température concomitante au séisme de calcul, des valeurs d'indice de fiabilité correspondantes peuvent être déterminées selon la même procédure. La température concomitante la plus appropriée serait celle ayant un indice de fiabilité proche de l'indice cible du code, à savoir 3.75. Enfin, il convient de noter que la technique de Monte-Carlo n'est pas pratique lorsque l'événement de défaillance est trop rare et/ou l'analyse structurale exige un temps de calcul plus long. Un travail supplémentaire d'optimisation en vue des applications plus complexes est requis. Le recours à une approximation *FORM* (ou *SORM*) pour l'estimation de la probabilité de défaillance est envisagé [8].

## Conclusion

Un schéma général d'une approche probabiliste pour évaluer et concevoir des ponts isolés à la base en tenant compte des conditions qui affectent les propriétés hystérétiques du système d'isolation sismique, tel que la basse température, est présenté. Cette approche est appliquée sur un cas simple de pont à 1 DDL, représentant un pont essentiel isolé à sa base sous des charges sismiques combinées à la température. La généralisation de l'approche inclura des systèmes de

ponts isolés à la base plus complexes avec différents états limites pour représenter les principes de conception basés sur la capacité et/ou sur la performance et des techniques d'optimisation de l'échantillonnage pour réduire le temps de calcul.

## Références

- [1] CAN/CSA-S6-14, "CSA-S6-14," in *Canadian Highway Bridge Design Code, Canadian Standards Association: Missisauga* ed, 2014.
- [2] A. Lrfd, "AASHTO LRFD bridge design specifications," ed: Washington DC: American Association of State Highway Transportation Officials, 2004.
- [3] A. A. o. S. Highway, T. Officials, S. o. Bridges, S. Staff, A. A. o. S. Highway, and T. O. S. o. Bridges, *Guide Specifications for Seismic Isolation Design: AASHTO*, 2010.
- [4] M. C. Constantinou, A. Whittaker, Y. Kalpakidis, D. Fenz, and G. P. Warn, "Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading," Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research 2007.
- [5] M. C. Constantinou, P. Tsopelas, A. Kasalanati, and E. D. Wolff, "Property modification factors for seismic isolation bearings," in *Technical Report MCEER*. vol. 99, ed: US Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), 1999.
- [6] A. S. Nowak and H. N. Grouni, "Calibration of the Ontario highway bridge design code 1991 edition," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 21, pp. 25-35, 1994.
- [7] A. S. Nowak and O. Iatsko, "Revised load and resistance factors for the AASHTO LRFD Bridge Design Specifications," *PCI Journal*, 2017.
- [8] A. Der Kiureghian and P.-L. Liu, "Structural reliability under incomplete probability information," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 112, pp. 85-104, 1986.
- [9] P. Thoft-Cristensen and M. J. Baker, *Structural reliability theory and its applications*: Springer Science & Business Media, 2012.
- [10] I. G. Buckle, M. C. Constantinou, M. Diceli, and H. Ghasemi, "Seismic isolation of highway bridges," 2006.
- [11] I. Nagrath, *Control systems engineering*: New Age International, 2006.
- [12] A. S. Nowak, A. S. Yamani, and S. W. Tabsh, "Probabilistic models for resistance of concrete bridge girders," *Structural Journal*, vol. 91, pp. 269-276, 1994.
- [13] G. M. Atkinson and J. Adams, "Ground motion prediction equations for application to the 2015 Canadian national seismic hazard maps," *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 40, pp. 988-998, 2013.