

# Comportement des piles rectangulaires de ponts sous l'effet des mouvements sismiques multidirectionnels

Amar Khaled, ing, M.Sc.A.

Département de génie civil, École polytechnique de Montréal

Robert Tremblay, ing., Ph.D., Professeur,

Département de génie civil, École polytechnique de Montréal

Bruno Massicotte, ing., Ph.D., Professeur

Département de génie civil, École polytechnique de Montréal

## Résumé

Pour tenir compte des effets multidirectionnels des séismes, les codes parasismiques des ponts préconisent de calculer les effets dues à chaque composante prise séparément à l'aide d'une analyse spectrale élastique et de les combiner à l'aide de la règle des 30% pour déterminer les réponses maximales dues à l'action simultanée des composantes du mouvement sismique. La règle des 30% est une méthode approximative et n'a pas encore été validée à ce jour, notamment pour les éléments structuraux soumis à de la flexion biaxiale tels que les piles de ponts. Cet article présente les résultats des analyses effectuées sur un ensemble de 25 modèles de ponts soumis aux composantes horizontales de 7 séismes de l'est et 9 séismes de l'ouest du Canada. Les résultats obtenus montrent, d'une part, que la règle de combinaison des 30% permet de prédire avec une précision acceptable les moments de flexion dans les piles de ponts soumis à l'action simultanée des composantes horizontales des mouvements sismiques et, d'autre part, que l'erreur effectuée sur la quantité d'armature requise selon les règles de combinaison dépend principalement de l'angle de biais du pont et du contenu fréquentiel des séismes. Par ailleurs, la différence entre la quantité d'armature de flexion déterminée à l'aide de la règle de combinaison des 30% et celle déterminée à l'aide des analyses transitoires multiples peut atteindre, dans le cas des piles rectangulaires en biais 15% pour les séismes de l'est du Canada et 17% pour les séismes de l'ouest du Canada.

## 1. Introduction

De par leur particularité, les ponts sont des structures qui présentent peu, voire pas de redondance pour la résistance aux charges latérales. De ce fait, leur intégrité structurale lors d'événements sismiques majeurs repose essentiellement sur la bonne tenue des colonnes ou des piles qui constituent généralement le principal système de résistance aux charges horizontales. Les tremblements de terre passés ont mis en évidence la vulnérabilité de ces structures modernes [1]. Les constats effectués sur les sites après ces événements montrent, entre autres, que les dommages subis par les piles et les colonnes de ponts sont en partie attribuables aux effets multidirectionnels des mouvements sismiques [1]. Les mouvements du sol générés par les séismes sont des mouvements qui se propagent dans les trois directions de l'espace et les

structures sont donc soumises à un mouvement de translation à trois composantes : deux composantes horizontales perpendiculaires et une composante verticale. Les composantes horizontales du mouvement sismique sont statistiquement corrélées et leur direction varient continuellement avec le temps [2]. Penzien et Watabe [3] ont cependant établi qu'il existe un système d'axes principaux selon lequel ces composantes peuvent être considérées comme pratiquement non corrélées.

Les codes parasismiques des ponts préconisent de considérer le caractère multidirectionnel du mouvement sismique dans l'évaluation de la réponse critique des colonnes et des piles soumises à l'action sismique. Lorsque l'évaluation de la réponse est conduite par une analyse dynamique transitoire, la multiplicité des directions du mouvement sismique est directement prise en compte en appliquant simultanément les accélérogrammes correspondant aux directions orthogonales du mouvement sismique. L'analyse dynamique transitoire est une analyse détaillée qui permet, à partir d'accélérogrammes réels ou artificiels, d'obtenir l'évolution de la réponse structurale exacte et complète dans le temps. Cette méthode nécessite cependant des analyses temporelles multiples, ce qui en fait non seulement une méthode d'analyse complexe mais aussi coûteuse en regard au dépouillement des nombreux résultats devant être analysés. L'analyse dynamique spectrale permet de calculer les effets maximums d'un séisme sur une structure, tels que décrits par un spectre de réponse. Cette méthode est une alternative fiable aux analyses dynamiques transitoires multiples et sa simplicité et ses coûts d'analyse abordables en font la méthode d'analyse dynamique la plus utilisée par les ingénieurs. Dans le contexte d'une analyse dynamique spectrale tenant compte de l'effet multidirectionnel du mouvement sismique, la structure est analysée séparément dans chaque direction orthogonale sous l'effet d'un spectre de conception unique. Pour estimer la réponse critique due à l'action simultanée des composantes du mouvement sismique, les effets maximums ainsi obtenus dans chaque direction sont combinés à l'aide de la règle des 30% [4], la règle des 40% [5], la méthode SRSS [6], ou la méthode CQC [7]. En général, les codes parasismiques préconisent de combiner les effets selon la règle du pourcentage (30% ou 40%).

La règle des 30%, retenue notamment par le code canadien des ponts routiers et autoroutiers [8], présente l'avantage d'être simple d'application en plus de pouvoir être utilisée conjointement avec la méthode statique équivalente. On reconnaît cependant que la règle des 30% est une méthode approximative, basée sur une approche probabiliste et que la valeur du pourcentage (30%) ne tient pas compte des caractéristiques du mouvement sismique et des propriétés des structures [4]. Dans ce contexte, il est nécessaire de démontrer la validité de la procédure et de déterminer le champ d'application pour laquelle elle donne des résultats satisfaisants. Dans cet article, la vérification de la validité et de la fiabilité de la règle des 30% préconisée par le code canadien des ponts est menée par l'entremise d'analyses dynamiques spectrales et d'analyses transitoires multiples sur des modèles de ponts génériques soumis à des ensembles de séismes historiques et artificielles représentatifs de l'est et de l'ouest du Canada.

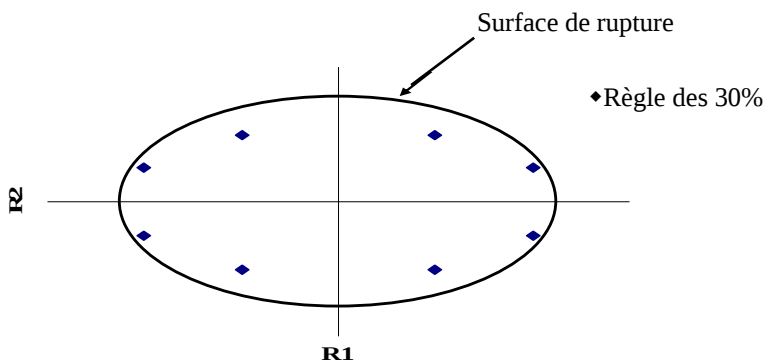
## **2. La règle de combinaison des 30%**

L'effet multidirectionnel du mouvement sismique produit des efforts de flexion simultanés autour des deux directions (flexion biaxiale) dans les piles et les colonnes des ponts. Pour ces éléments, le dimensionnement doit tenir compte de l'interaction de ces deux efforts. La combinaison la plus critique des efforts pour un élément structural donné ne fait pas

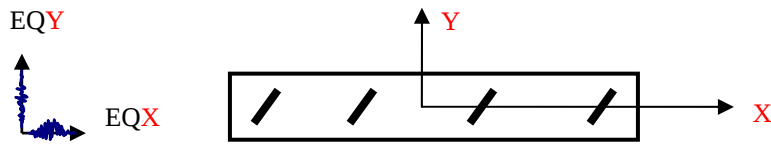
nécessairement intervenir les valeurs maximales, et elle ne peut être déterminée qu'avec une connaissance suffisante de la surface de rupture (diagramme d'interaction) de cet élément. Rosenblueth et Contreras [4] ont montré que l'ensemble des combinaisons d'efforts probables due à l'action simultanée des composantes orthogonales du mouvement sismique décrit une ellipse dans l'espace réponse. La détermination de cette ellipse pour les besoins du dimensionnement est une tâche très ardue. La règle des 30% est une méthode simple qui permet d'approximer la réponse elliptique exacte par un ensemble de vecteurs définis dans l'espace réponse par :

$$\begin{aligned}
 R &= R_1 + 0.3R_2 & R &= R_1 - 0.3R_2 & R &= -R_1 + 0.3R_2 & R &= -R_1 - 0.3R_2 \\
 R &= 0.3R_1 + R_2 & R &= 0.3R_1 - R_2 & R &= -0.3R_1 + R_2 & R &= -0.3R_1 - R_2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

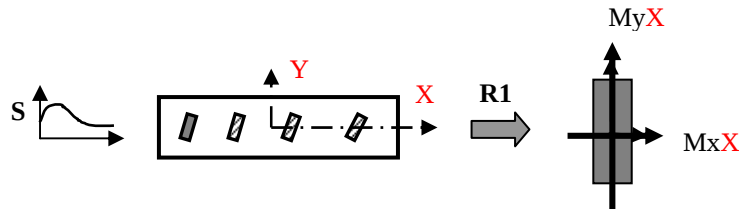
Dans ces expressions,  $R_1$  et  $R_2$  sont les réponses maximales dues à chaque composante du mouvement sismique appliquée séparément selon les directions principales 1 et 2, respectivement, et  $R$  est la réponse combinée due à l'action simultanée des deux composantes du mouvement sismique. La combinaison critique est déterminée en superposant l'ensemble des vecteurs donnés par l'Équation (1) à la surface de rupture de l'élément, tel qu'illustré à la Figure 1. La Figure 2 illustre l'application de la règle des 30% pour un spectre de conception unique dans le cas d'un pont en biais. On notera que le calcul illustré à la Figure 2 permet d'obtenir les deux points situés sur le quadrant positif de l'espace réponse. Les six autres points donnés par l'Équation 1 sont obtenus par symétrie par rapport aux axes  $R_1$  et  $R_2$  (voir Figure 1).



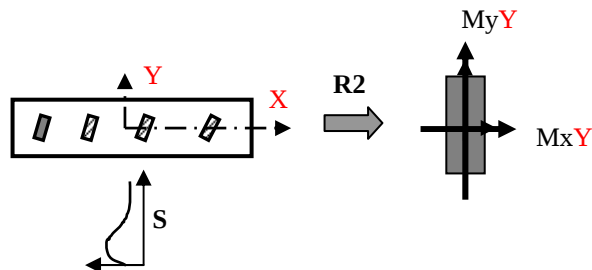
**Figure 1 :** Surface de rupture (diagramme d'interaction)



(2a) Pont en biais soumis à l'action simultanée des composantes X et Y du mouvement sismique

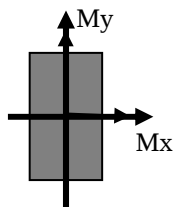


(2b) Calcul de la réponse R1 ( $M_{xX}$ ,  $M_{yX}$ ) pour S appliqué selon l'axe principal X du pont



(2c) Calcul de la réponse R2 ( $M_{xY}$ ,  $M_{yY}$ ) pour S appliqué selon l'axe principal Y du pont

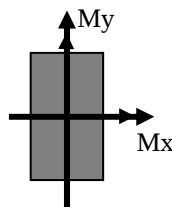
$$R = R1 + 0.3 R2$$



$$M_x = M_{xX} + 0.3 M_{xY}$$

$$M_y = M_{yX} + 0.3 M_{yY}$$

$$R = 0.3 R1 + R2$$



$$M_x = 0.3 M_{xX} + M_{xY}$$

$$M_y = 0.3 M_{yX} + M_{yY}$$

(2d) Réponses combinées R ( $M_x$ ,  $M_y$ ) agissant autour des axes locaux de la section de la colonne

**Figure 2** : Illustration de la règle de combinaison des 30%

### 3. Sélection et transformation des accélérographes

Les régions de l'est et de l'ouest du Canada sont des zones où l'aléa sismique est relativement élevé au Canada. Dans le cadre de ce projet, Montréal et Vancouver ont été choisies comme les deux villes représentatives de l'est et de l'ouest du Canada, respectivement. La sélection des séismes représentatifs de ces régions a été basée sur la déaggrégation de l'aléa sismique pour chaque site en termes de scénarios magnitude-distance hypocentrale (M-R) pour une probabilité de dépassement de 2% en 50 ans [9]. Les scénarios retenus pour les villes de Montréal et Vancouver sont présentés au tableau 1.

**Tableau 1 :** Scénarios M-R utilisés pour la sélection des séismes

| Ville     | Probabilité de dépassement de 2% en 50 ans |        |
|-----------|--------------------------------------------|--------|
|           | M                                          | R (km) |
| Montréal  | 6.0                                        | 30     |
|           | 6.5                                        | 50     |
|           | 7.0                                        | 70     |
| Vancouver | 6.5                                        | 30     |
|           | 7.2                                        | 70     |

Deux ensembles d'enregistrements sismiques ont été sélectionnés, l'un constitué d'accélérographes historiques et l'autre de mouvements artificiels. Les accélérographes sélectionnés sont représentatifs d'un site de classe C ( $V_s$  moyen = 560 m/s) [10], à l'exception de ceux du Saguenay et de Nahanni qui ont été enregistrés sur du roc. Une transformation des enregistrements a été réalisée à l'aide du programme SHAKE [11] afin de les rendre représentatifs d'un site de classe C. Par ailleurs, les composantes horizontales des séismes utilisés ont été transformées selon leurs directions principales. Les séismes utilisés dans ce projet sont :

(a) Pour l'est du Canada (Montréal) :

1. Nov. 25, 1988 Saguenay (Chicoutimi Nord), M5.7 R43
2. Nov. 25, 1988 Saguenay (Saint-André), M5.7 R64
3. Nov. 25, 1988 Saguenay (Les Éboulements), M5.7 R90
4. Dec. 23, 1985 Nahanni (Bettlement Creek - S3), M6.5 R24
5. Montréal - SIM1 (Artificiel), M6.0 R30
6. Montréal - SIM2 (Artificiel), M6.5 R50
7. Montréal - SIM3 (Artificiel), M7.0 R70

(b) Pour l'ouest du Canada (Vancouver) :

1. Oct. 01, 1987 Whittier Narrows (Pacoima-Kagel Canyon), M6.1 R38
2. Avr. 13, 1949 Western Washington (Olympia, Wash. Hwy Test Lab.), M6.9 R26
3. Avr. 20, 1965 Puget Sound, Washington (Olympia, Wash. Hwy Test Lab.), M6.7 R61
4. Avr. 24, 1984 Morgan Hill (San Ysidro Gilroy Array #6), M6.2 R36
5. Jan. 17, 1994 Northridge (Castaic-Old Ridge Route), M6.7 R41
6. Jan. 17, 1994 Northridge (San Pedro-Palos Verdes), M6.7 R58
7. Sept. 17, 1989 Loma Prieta (San Francisco-Presidio), M7 R98
8. Vancouver - SIM1 (Artificiel), M6.5 R30
9. Vancouver - SIM2 (Artificiel), M7.2 R70

## **4. Évaluation de la règle de combinaison des 30 %**

### **4.1 Méthodologie**

La validation de la règle de combinaison des 30% a été réalisée en deux étapes. La première étape consiste à comparer les réponses ( $M_x$ ,  $M_y$ ) à la base des colonnes telles qu'obtenues d'analyses dynamiques transitoires multiples et d'analyses spectrales réalisées sur une série de modèles de ponts. Cette permet d'évaluer la précision des efforts obtenus de la règle des 30%. Dans la deuxième étape, l'évaluation est faite en comparant le pourcentage d'armature requis dans les colonnes à partir des efforts obtenus des deux séries d'analyses. Cette deuxième étape vise principalement à identifier les caractéristiques des ponts et des séismes qui ont une influence sur la règle de combinaison.

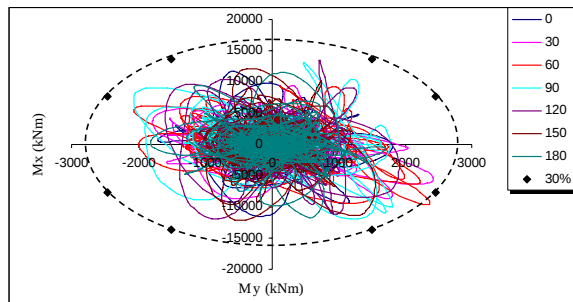
### **4.2 Comparaison des réponses ( $M_x$ , $M_y$ )**

Pour l'étude, on a utilisé un ensemble de 9 modèles de ponts à deux travées générés à partir de prototypes de ponts en béton armé fournis par le Ministère des transports du Québec (MTQ). . Pour cette première partie de l'étude, tous les ponts ont des colonnes encastrées à leur base qui font 8 m de hauteur. Le type de pont, la géométrie des piles et l'identification du cas considéré sont :

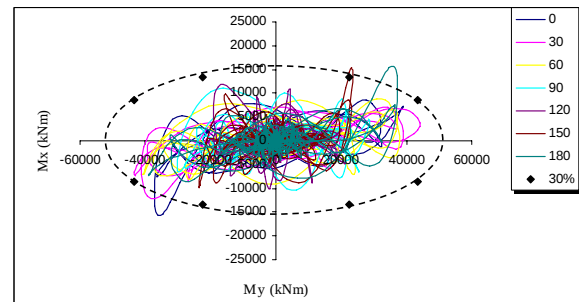
1. Pont droit avec pile circulaire unique de 2.2 m de diamètre (DPCU)
2. Pont droit avec pile rectangulaire unique de 1.4 m x 2.8 m (DPRU)
3. Pont droit avec pile mur de 0.8 m x 10 m (DPM)
4. Pont droit avec piles circulaires multiples de 1.2 m de diamètre (DPCM)
5. Pont droit avec piles rectangulaires multiples de 0.8 m x 1.6 m (DPRM)
6. Pont biais ( $22^\circ$ ) avec pile rectangulaire unique de 1.5 m x 3.0 m (BPRU)
7. Pont biais ( $22^\circ$ ) avec piles rectangulaires multiples de 0.9 m x 1.8 m (BPRM)
8. Pont courbe ( $R = 90$  m) avec pile rectangulaire unique de 1.6 m x 3.2 m (CPRU)
9. Pont courbe ( $R = 90$  m) avec piles rectangulaires multiples de 1.0 m x 2.0 m (CPRM)

Les valeurs exactes des moments  $M_x$  et  $M_y$  ont été calculées à l'aide d'analyses dynamiques transitoires en soumettant chaque modèle de pont à l'ensemble des séismes sélectionnés et en faisant varier l'angle d'incidence des composantes horizontales principales de  $0^\circ$  à  $180^\circ$ . Les analyses dynamiques spectrales ont été réalisées à l'aide des spectres d'accélération (amortissement de 5%) des séismes utilisés dans les analyses transitoires. Pour chaque séisme, le spectre d'accélération de chaque composante horizontale est appliqué séparément et la réponse combinée ( $M_x$ ,  $M_y$ ) est déterminée à l'aide de la règle des 30%, tel qu'illustré à la Figure 2. La Figure 3 présente un exemple des résultats obtenus et leur comparaison.

L'analyse des résultats obtenus montre que la règle de combinaison des 30% donne des réponses comparables à celles obtenues à l'aide des analyses transitoires multiples pour tous les ponts étudiés. L'erreur moyenne calculée pour l'ensemble des cas est de 5.2 %. L'erreur maximale est de 18 %, l'erreur minimale est de 0.2 % et l'écart-type est de 4.3 %.



(a) BPRU – Séismes de l'est



(b) BPRU – Séismes de l'ouest

**Figure 3 :** Comparaison des résultats des analyses transitoires multiples et spectrales

### 4.3 Comparaison des pourcentages d'armature des colonnes

Pour cette partie de l'étude, les colonnes de 9 modèles de pont ayant des caractéristiques différentes ont été analysées et dimensionnées conformément à la norme CSA-S6-00 [8] pour les quatre cas suivants : (i) sans combinaison (100%-0%), (ii) avec une combinaison 100%-30%, (iii) avec une combinaison 100%-100%, et (iv) à l'aide d'analyses transitoires multiples (TH). Des modèles de ponts différents ont été considérés pour cette deuxième partie de l'étude. Les modèles de ponts utilisés pour cette partie de l'étude sont :

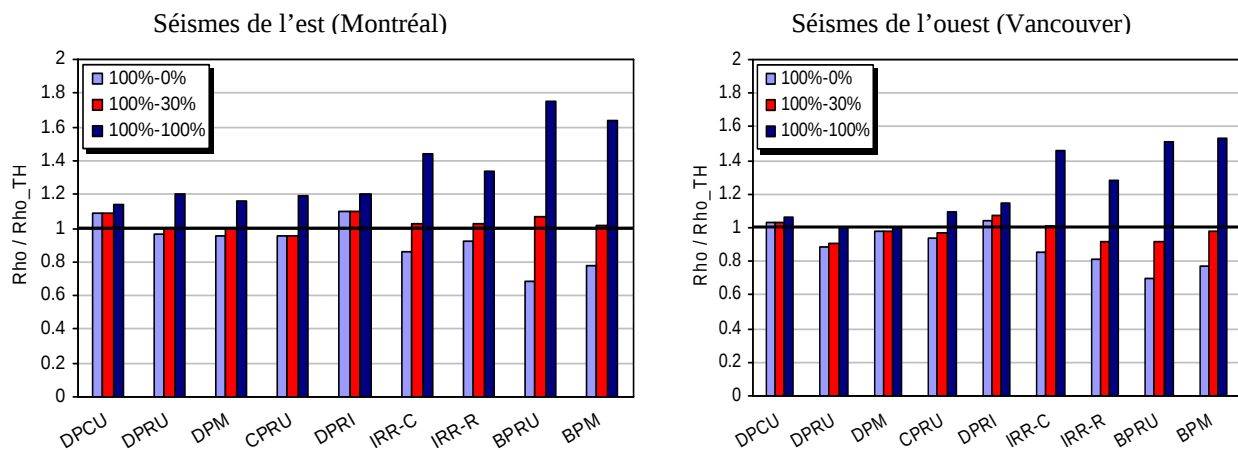
1. Pont droit de 2 travées égales avec pile circulaire unique de 1.2 m,  $H_{col} = 6.0$  m (DPCU)
2. Pont droit de 2 travées égales avec pile rectangulaire unique de 1.2 m x 2.4 m,  $H_{col} = 6.0$  m (DPRU)
3. Pont droit de 2 travées égales avec pile mur de 0.8 m x 6.0 m,  $H_{col} = 6.0$  m (DPM)
4. Pont biais ( $35^\circ$ ) de 2 travées égales avec pile rectangulaire unique de 1.2 m x 2.4 m,  $H_{col} = 6.0$  m (BPRU)
5. Pont biais ( $35^\circ$ ) de 2 travées égales avec pile mur de 0.8 m x 6.0 m,  $H_{col} = 6.0$  m (BPM)
6. Pont courbe ( $R = 90$  m) de 2 travées égales avec pile rectangulaire unique de 1.6 m x 2.8 m,  $H_{col} = 6.0$  m (CPRU)
7. Pont droit de 4 travées variables avec piles rectangulaires multiples et hauteurs des colonnes variables (DPRI)
8. Pont à double courbure de 5 travées variables avec piles circulaires et hauteurs des colonnes variables (IRR\_C)
9. Pont à double courbure de 5 travées variables avec piles rectangulaires et hauteur des colonnes variables (IRR\_R)

La Figure 4 montre les résultats obtenus. On constate que le pourcentage d'armature calculé sans combinaison des composantes (100%-0%) et avec la règle des 30% est pratiquement identique pour les ponts dont les colonnes n'ont pas de biais. De plus, on observe que la règle des 30% a tendance à surestimer le pourcentage d'armature pour les séismes de l'est du Canada et à le sous-estimer pour ceux de l'ouest du Canada.

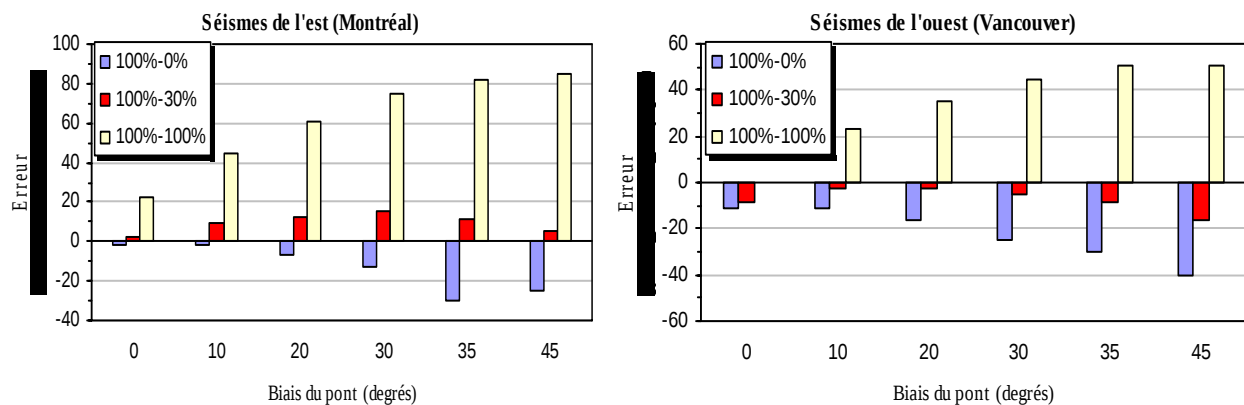
Afin d'analyser l'effet du biais sur la règle des 30%, le modèle de pont BPRU a été analysé et le pourcentage d'armature requis dans les colonnes déterminé en faisant varier l'angle du biais du pont de 0° à 45° et ce pour les quatre cas, soit : (i) sans combinaison (100%-0%), (ii) avec une combinaison 100%-30%, (iii) avec une combinaison 100%-100%, et (iv) à l'aide d'analyses transitoires multiples (TH). Une comparaison des résultats obtenus pour les quatre cas a été faite par le biais d'un calcul d'erreur exprimé par :

$$\left[ \left( \frac{rho - règle\%}{rho - TH} \right) - 1 \right] \times 100 \quad (2)$$

Les résultats obtenus en fonction du biais du pont sont présentés à la Figure 5.



**Figure 4 :** Comparaison du pourcentage d'armature requis par rapport au cas TH



**Figure 5 :** Erreur sur le pourcentage d'armature en fonction de l'angle du biais du modèle BPRU

Les résultats montrent que dans le cas des colonnes en biais, la règle des 30% surestime le pourcentage d'armature pour les séismes de l'est du Canada et le sous-estime pour ceux de l'ouest du Canada. Par ailleurs, on peut voir que la différence entre la quantité d'armature déterminée à l'aide de la règle des 30% et des analyses transitoires multiples varie de 2% pour un pont droit à 15% pour un pont avec un biais de 30° dans le cas des séismes de l'est, et de 3% pour un pont droit à 17% pour un pont avec un biais de 45° dans le cas des séismes de l'ouest. Les résultats obtenus indiquent clairement que la règle de combinaison dépend de l'angle du biais du pont.

## **5. Conclusions**

Cet article présente les résultats des travaux entrepris dans le cadre d'un projet de recherche visant à établir d'une part la validité de la règle de combinaison des 30% dans le cas des piles de ponts et, d'autre part, à étudier l'influence des caractéristiques des séismes de l'est et de l'ouest du Canada et des caractéristiques des ponts sur la méthode de combinaison. Les résultats obtenus montrent, d'une part, que la règle de combinaison des 30% permet de prédire avec une précision acceptable les moments de flexion dans les piles de ponts soumis à l'action simultanée des composantes horizontales des mouvements sismiques et, d'autre part, que l'erreur effectuée sur la quantité d'armature requise selon les règles de combinaison dépend principalement de l'angle de biais du pont et du contenu fréquentiel des séismes.

La différence entre la quantité d'armature de flexion déterminée à l'aide de la règle de combinaison des 30% et celle déterminée à l'aide des analyses transitoires multiples peut atteindre, dans le cas des piles rectangulaires en biais (présentes dans les ponts en biais ou les ponts courbes) 15% pour les séismes de l'est et 17% pour les séismes de l'ouest. Ces différences sont jugées importantes et nécessitent une correction de la méthode de combinaison actuellement adoptée par le CSA/S6-00.

Sur la base des résultats obtenus dans cette partie de l'étude, une nouvelle méthode de combinaison qui prend en compte le type de pont et le contenu fréquentiel des séismes a été développée et sera présentée lors de la communication orale. Des analyses dynamiques nonlinéaires sont actuellement réalisées pour vérifier le comportement des piles dimensionnées avec la règle des 30% et la nouvelle méthode de combinaison proposée. Ces analyses seront appuyées par des essais en laboratoires sur des colonnes de ponts rectangulaires soumises à un chargement bi-directionnel.

## **Remerciements :**

Les auteurs remercient l'École de technologie supérieure pour l'appui financier et l'opportunité accordés à M. Amar Khaled pour la poursuite d'études doctorales.

## Références

1. Toma S., Problem in the Current Seismic Design and Questions Regarding the structural Damages by Earthquakes, *Advances in Structural engineering*, Vol. 4, No.1, 19-28.
2. Zaghlool S. B., Carr J. A., and Moss J. P., “Inelastic Behaviour of Three-Dimensional Structures under Concurrent Seismic Excitation”, 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, (Paper No. 2001) (2000) 1-8.
3. Penzien, J. and Watabe, M., “Characteristics of 3-Dimensional Earthquake Ground Motions”, *Earthquake Eng. and Struct. Dyn.* (3) (1975) 365-373.
4. Rosenblueth, E. and Contreras, H., “Approximate Design for Multicomponent Earthquakes”, *Journ. Eng. Mech. Div. ASCE*, EM5 (103) (1977) 895-911.
5. Newmark, N. M., “Seismic Design Criteria for Structures and Facilities”, *Trans-Alaska Pipeline System, Proceedings of First U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Ann Arbor, Michigan 1975, 94-103.
6. Rosenblueth, E., “A Basis for Aseismic Design”, *Doctoral Thesis*, University of Illinois, Urbana, Illinois, (1951).
7. Menum, C. and Der Kiureghian, A., “A Replacement for the 30%, 40%, and SRSS Rules for Multicomponent Seismic Analysis”, *Earthquake Spectra*, (14) (1) (1998) 153-163.
8. CAN/CSA-S6-00, “Canadian Highway Bridge Design Code”, Canadian Standard Association, Rexdale, Ontario, (2000).
9. Halchuk, S. and Adams, J., “Deaggregation of Seismic Hazard for Selected Canadian Cities”, 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, (Paper No. 2470) (2004).
10. NBCC2005, “National Building Code of Canada”, Canadian Commission on Building and Fire Codes, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Ottawa, Ont., (2005).
11. SHAKE2000, A Computer Program for 1-D Analysis of Geotechnical Earthquake Engineering Problems, User’s Manuel, (2004).