

SIMULATIONS HYBRIDES EN TEMPS RÉEL SUR PONTS ÉQUIPÉS DE SYSTÈMES DE PROTECTION SISMIQUE FABRIQUÉS AU QUÉBEC

Robert Tremblay, Najib Bouaanani, Cassandra Dion, Charles-Philippe Lamarche et Martin Leclerc

Résumé

L'article traite de la modélisation numérique de trois systèmes fabriqués au Québec pour la protection sismique des structures de pont : isolateurs sismiques, amortisseurs visqueux et transmetteurs de chocs sismiques. Des modèles numériques simples sont proposés pour prédire le comportement dans la direction longitudinale de ponts équipés de ces systèmes lorsque soumis à des mouvements sismiques du sol. Ces modèles ont été développés à l'aide d'un logiciel d'analyse structurale couramment utilisé dans la pratique. Des simulations hybrides en temps réel ont été réalisées à l'École Polytechnique de Montréal pour valider ces modèles. Les résultats montrent que de simples modèles numériques peuvent prédire adéquatement les déplacements subis par des structures de ponts équipés des trois systèmes de protection parasismique étudiés. L'étude a également démontré que les propriétés mécaniques des systèmes de protection parasismique doivent être connues avec précision pour obtenir des prédictions numériques fiables. En particulier, les coefficients de frottement des isolateurs sismiques avec interface de glissement et la relation entre la vitesse et la résistance pour les amortisseurs visqueux et les transmetteurs de chocs sismiques doivent être bien caractérisés pour les plages d'utilisation prévues.

Introduction

Un grand nombre de ponts du Québec ont été construits avant l'introduction des normes de conception parasismique et une partie des infrastructures plus récentes, construites avant les années 2000, ne rencontrent pas les exigences parasismiques que l'on retrouve aujourd'hui dans le code CSA S6 (CSA 2006). Dans ce contexte, il devient primordial de développer et maîtriser des techniques de réhabilitation parasismiques efficaces en termes de performance et de coûts. Une des stratégies possibles de réhabilitation consiste à augmenter la résistance latérale de la structure du pont de manière à rencontrer les exigences minimales de résistance spécifiées dans le code CSA S6. Malheureusement, cette approche est souvent impraticable en raison des déficiences importantes des éléments de fondation et du niveau de complexité et coûts élevés de l'intervention requise.

D'autres options peuvent être considérées pour limiter les interventions aux éléments de fondation. Par exemple, on peut dissocier la superstructure des éléments de fondation et introduire entre ces deux composantes des systèmes qui permettent de contrôler les déplacements de la superstructure tout en limitant les forces imposées aux fondations. Plusieurs dispositifs d'isolation sismique comprenant des interfaces de glissement, mécanismes de dissipation de l'énergie sismique et dispositifs de recentrage ont été développés au fil des ans pour obtenir ce comportement (Calvi et al. 2007). Les mécanismes de dissipation d'énergie peuvent prendre diverses formes comme le frottement ou l'amortissement visqueux. Pour améliorer la résistance des ponts dans la direction longitudinale on peut utiliser une autre approche qui consiste à placer, en parallèle aux appuis mobiles, des appareils dont la fonction est de bloquer sous des sollicitations horizontales dynamiques comme les forces de freinage ou les forces sismiques. Les transmetteurs de chocs sismiques sont des appareils qui ont été spécialement développés pour offrir une faible

résistance aux mouvements caractérisés par un faible taux, ou vitesse de déplacement, comme les mouvements induits par les dilatations thermiques de la structure. En contrepartie, ils offrent une résistance et une rigidité très élevées sous un chargement dynamique. L'usage de tels appareils permet d'exploiter la résistance horizontale de tous les éléments de fondation présents pour reprendre les forces sismiques, réduisant l'ampleur des travaux de renforcement requis.

Diverses méthodes peuvent être utilisées pour la conception de ces systèmes de protection sismique mais, dans la majorité des cas, on doit procéder à une validation finale du concept par le biais d'analyses dynamiques temporelles où on soumet un modèle numérique de la structure à un ensemble de mouvements sismiques du sol représentatifs pour le site à l'étude. On vérifie alors les déplacements de la superstructure de même que les forces qui sont imposées aux éléments de fondation. Pour ce faire, l'ingénieur doit disposer de techniques de simulation numérique qui permettent de prédire avec précision le comportement des équipements de protection sismique qui sont utilisés. L'usage de modèles numériques simples et de logiciels d'analyse couramment utilisés en pratique est évidemment souhaitable car les résultats peuvent être obtenus plus rapidement et à un moindre coût, tout en minimisant les risques d'erreur.

Un projet de recherche a récemment été complété à l'École Polytechnique de Montréal afin de valider des modèles numériques simples qui sont proposés pour prédire le comportement sismique dynamique d'équipements fabriqués au Québec pour la protection sismique des structures de ponts. Ces appareils comprennent les isolateurs sismiques développés et fabriqués par la société Goodco Z-Tech de Laval (Goodco Z-Tech 2009), et les amortisseurs visqueux et transmetteurs de chocs sismiques développés et fabriqués par Produits Technologiques LCL-Ponts (LCL 2009). Les modèles proposés sont développés sur le logiciel d'analyse structurale SAP2000 (CSI 2008), un logiciel couramment utilisé dans les firmes de génie-conseils. Ces modèles numériques ont été validés en comparant les résultats des analyses sismiques dynamiques de ponts équipés des équipements de protection sismique aux résultats obtenus de simulations hybrides réalisées en temps réel sur les mêmes structures. La simulation hybride en temps réel est une technique expérimentale qui permet d'imposer à des composantes critiques d'une structure la sollicitation dynamique résultant du comportement sismique de l'ensemble de la structure. La structure est modélisée numériquement alors que les composantes critiques, ici les équipements de protection sismique étudiés, sont testés en laboratoire. Des ponts différents ont été considérés pour chacun des trois types d'appareils étudiés. Dans chaque cas, le comportement sismique a été examiné dans la direction longitudinale des ponts. Dans cet article, on présente d'abord la technique de simulation hybride qui a été employée pour la partie expérimentale du projet, de même que les mouvements sismiques du sol qui ont été considérés dans les essais et les analyses. Pour chacun des types d'appareils de protection sismique, on décrit ensuite les ponts étudiés, les modèles numériques des structures et des résultats obtenus des essais et des analyses. L'article se termine sur les conclusions et recommandations découlant de l'étude.

Simulation hybride en temps réel

Simulation hybride

La technique de simulation sismique hybride en temps réel, ou essai dynamique en temps réel par sous-structures, vise à étudier le comportement des composantes critiques d'une structure sous la sollicitation à laquelle elles seront soumises sous un séisme réel. Pour ces simulations, la structure est divisée en deux sous-structures : la sous-structure physique, qui comprend les composantes critiques testées en laboratoire, et la sous-structure numérique, qui comprend le reste de la structure. L'analyse dynamique de la structure sous le mouvement sismique est effectuée sur

l'ensemble de la structure, soit les sous-structures physique et numérique. L'analyse de la structure et l'essai en laboratoire se font donc simultanément. L'analyse est de type incrémentale dans le temps. À chaque pas de temps, on impose aux spécimens en laboratoire l'incrément de déplacement qui a été obtenu de l'analyse, et la contribution des spécimens d'essais à la rigidité de la structure globale est déterminée à partir de la mesure de l'incrément de force mesuré par les vérins hydrauliques lors de l'application de l'incrément de déplacement. La rigidité ainsi obtenue est utilisée pour déterminer, par intégration numérique des équations du mouvement, l'incrément de déplacement à imposer aux spécimens lors du pas de temps suivant. Cet incrément de déplacement dépend donc du comportement global de la structure émulée, incluant le comportement des spécimens d'essais eux-mêmes. La réalisation de ce type d'essais requiert une interface entre le logiciel d'analyse structurale et le système de contrôle des vérins hydrauliques. La simulation hybride peut être réalisée en temps réel si on dispose de vérins hydrauliques dynamiques à haute performance, d'un système pour le contrôle dynamique des vérins, d'un dispositif permettant un échange rapide des informations entre les différents modules, et d'un algorithme précis, stable et compatible en temps réel pour l'intégration numérique des équations du mouvement.

Simulation hybride pour les équipements de protection sismique

Dans cette étude, les composantes structurales critiques étaient les équipements de protection sismique et la sous-structure physique comprenait un spécimen d'isolateur sismique, d'amortisseur visqueux ou de transmetteur de chocs sismiques, selon la structure de pont examinée. Comme décrit plus bas, tous ces équipements étaient sollicités par le déplacement longitudinal relatif de la superstructure du pont par rapport aux éléments de fondation. Le spécimen en laboratoire était donc soumis à ce déplacement relatif. Comme les ponts comprenaient plusieurs appareils identiques travaillant en parallèle, la force mesurée par le vérin pendant les essais était multipliée par le nombre d'appareils présents dans la structure, en faisant l'hypothèse que tous les appareils avaient un comportement identique à celui du spécimen étudié. La sous-structure numérique comprenait les autres éléments de la structure dont les piles, les appuis mobiles, la masse du tablier, etc.

Le système de contrôle utilisé pour les simulations hybrides en temps réel est illustré à la Fig. 1. Le montage expérimental montré sur la figure est celui employé pour les simulations hybrides des ponts équipés d'amortisseurs visqueux ou de transmetteurs de chocs sismiques. La sous-structure numérique et le logiciel d'analyse structurale ont été développés sur un ordinateur hôte à l'aide de l'utilitaire Simulink de Matlab (Simulink 2007). L'application Simulink était compilée et lancée en temps réel sur un second ordinateur fonctionnant sous un environnement xPC Target Real-Time. Cet ordinateur et le contrôleur du vérin étaient reliés par des câbles à fibres optiques afin de partager une mémoire vive commune de type SCRAMNet permettant un transfert de données quasi-instantané entre les deux composantes. L'analyse dynamique et le contrôleur du vérin étaient synchronisés à un pas de temps de 1/1024 s. L'algorithme d'intégration numérique en temps réel qui a été utilisée est une variante de l'algorithme Rosenbrock-W développée par Lamarche et al. (2009). Un troisième ordinateur était utilisé pour définir les paramètres de contrôle du vérin. Pour l'essai illustré à la Fig. 1, on a employé un vérin dynamique de 1500 kN de capacité pour imposer le déplacement au spécimen. Le déplacement imposé était mesuré entre les parties mobile et fixe du spécimen afin d'exclure les déformations des pièces du montage. La résistance offerte par le spécimen était mesurée par la cellule de charge du vérin hydraulique, pour être ensuite introduite dans l'algorithme d'intégration numérique. Un montage similaire a été utilisé pour la simulation hybride du pont équipé d'isolateurs sismiques. Ce second montage comprenait en plus cependant un dispositif pour l'application de la charge verticale sur le spécimen d'isolateur sismique.

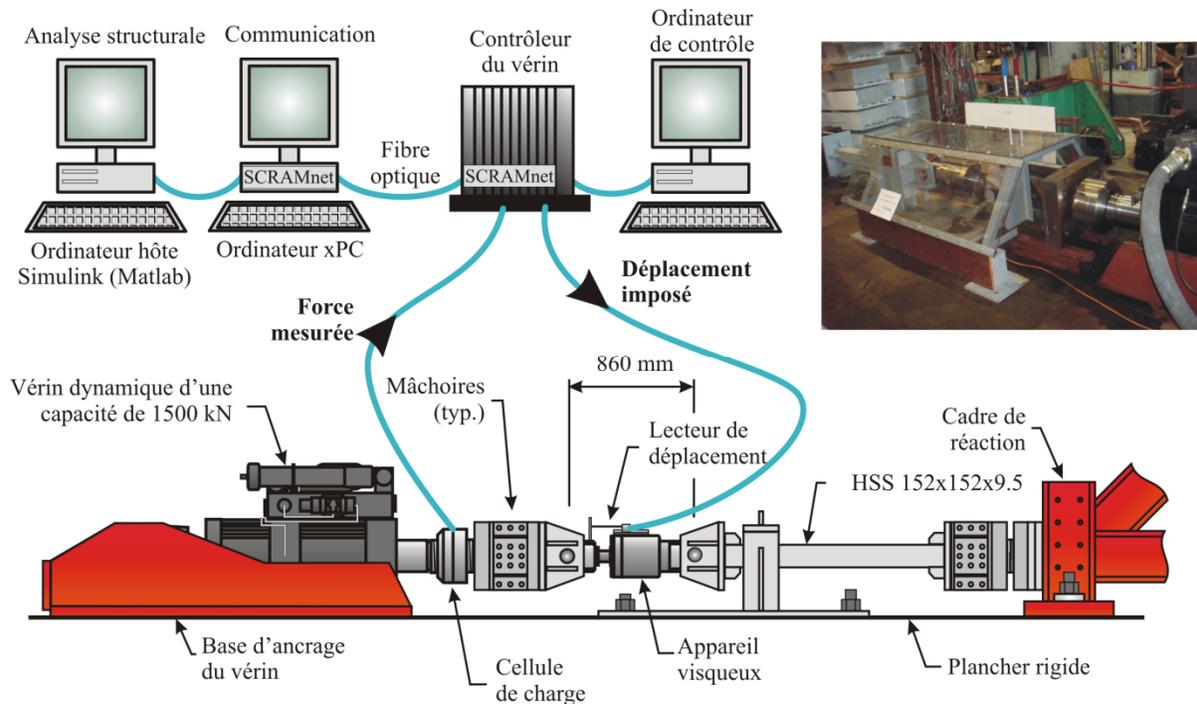


Figure 1. Montage utilisé pour les simulations hybrides pour le pont équipé d'amortisseurs visqueux ou de transmetteurs de chocs sismiques.

Sollicitations sismiques et autres sollicitations

Pour chaque structure, les simulations hybrides sismiques ont été réalisées sous 12 historiques de mouvements sismiques du sol qui ont été générés pour des scénarios magnitude (M_w)-distance (R) dominant l'aléa sismique pour la région de Montréal, QC, pour une probabilité de dépassement de 2% en 50 ans (Tremblay et Atkinson 2001). Ces mouvements du sol sont valables pour un site de type C, tel que défini dans le Code national du bâtiment du Canada (CNRC 2005). Leurs propriétés sont résumées au Tableau 1 (APH = accélération horizontale maximale). Pour ces mouvements sismiques, une forte proportion de l'énergie est comprise dans la plage des fréquences élevées, comme cela est prévu pour les séismes anticipés dans l'est de l'Amérique du Nord.

Tableau 1. Mouvements sismiques du sol pour les simulations hybrides sismiques.

Signal	M_w	R (km)	AHM (g)	Durée (s)
M6.0-R30-1	6.0	30	0.366	8.89
M6.0-R30-2	6.0	30	0.444	8.89
M6.0-R50-1	6.0	50	0.361	12.41
M6.0-R50-2	6.0	50	0.278	12.41
M7.0-R30-1	7.0	30	0.291	17.04
M7.0-R30-2	7.0	30	0.315	17.04
M7.0-R50-1	7.0	50	0.305	20.55
M7.0-R50-2	7.0	50	0.379	20.55
M7.0-R70-1	7.0	70	0.271	24.08
M7.0-R70-2	7.0	70	0.257	24.08
M7.0-R100-1	7.0	100	0.243	23.08
M7.0-R100-2	7.0	100	0.261	23.08

Le pont équipé de transmetteurs de chocs sismiques a aussi été soumis à des sollicitations dynamiques occasionnées par le freinage des véhicules. Avant la réalisation des simulations hybrides, des essais sous des historiques de déplacement harmoniques prédéfinis de formes triangulaire et sinusoïdale ont été réalisés pour caractériser les propriétés mécaniques des équipements de protection sismique.

Pont équipé d'isolateurs sismiques

Isolateur sismique

Le système d'isolation sismique considéré dans cette étude a été développé et fabriqué par Goodco Z-Tech, et le modèle d'isolateur qui a été utilisé est illustré à la Fig. 2f. Dans cet appareil, l'interface de glissement est composée d'une surface en acier inoxydable polie reposant sur un disque circulaire fait de polytétrafluoroéthylène (PTFE). Le frottement à l'interface permet de dissiper l'énergie sismique induite pour contrôler les déplacements du pont. Le disque de PTFE est monté sur un appareil d'appui à élastomère confiné qui permet la rotation des poutres de la superstructure. Des ressorts métalliques en boudin ayant un comportement bilinéaire élastique sont disposés horizontalement de part et d'autre de la partie mobile supérieure de l'isolateur, ce qui fournit une rigidité horizontale qui contribue aussi au contrôle des déformations et assure le recentrage de l'ouvrage après un séisme important. Les forces imposées aux fondations sont limitées par la force de frottement qui se développe à l'interface de glissement plus la résistance offerte par les ressorts à boudins. L'appareil peut être conçu pour agir comme isolateur sismique dans les deux directions principales. Le système a été appliqué en 2002 pour le pont sur la route 169, près d'Alma, QC, le premier pont à être muni d'isolateurs sismiques au Québec (Guizani 2003). On l'a aussi utilisé sur la rivière Bostonnais, près de La Tuque, QC, de même que sur le pont de la voie sud de l'autoroute 20 qui franchit la Rivière Nicolet près de St-Léonard d'Aston, QC (Guizani 2007). Cette dernière application a été retenue pour l'étude qui est présentée dans cet article.

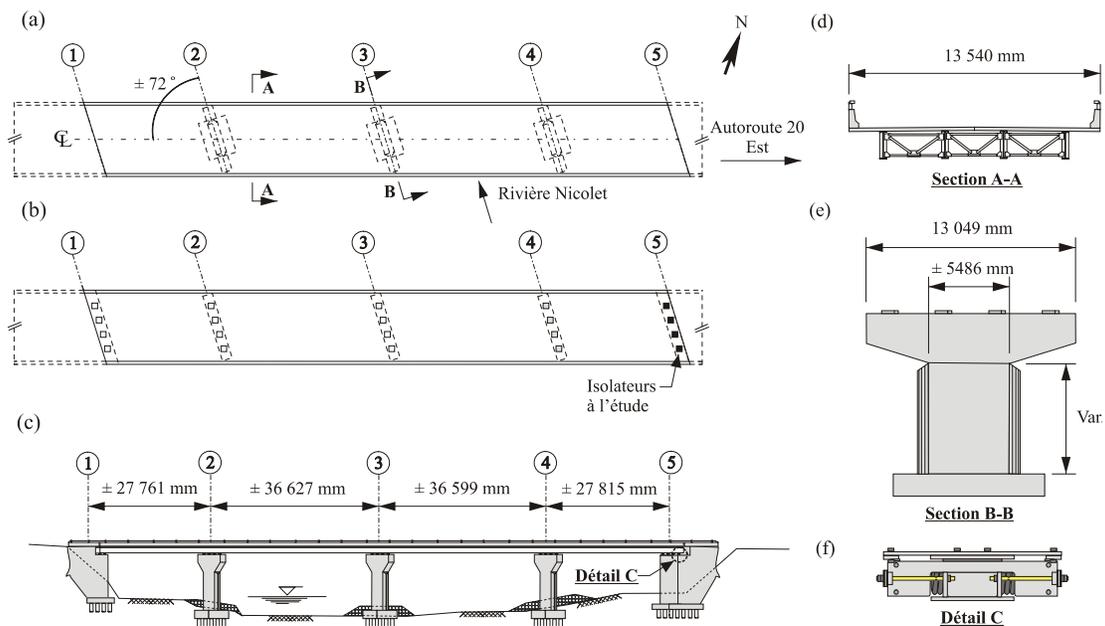


Figure 2. Pont équipé d'isolateurs sismiques : (a) Vue en plan; (b) Position des appareils d'appui mobiles et isolateurs sismiques; (c) Élévation de la structure; (d) Superstructure; (e) Pile; et (f) Isolateur sismique.

Pont étudié

Tel qu'illustré sur la Fig. 2, le pont étudié est en biais et comprend 4 travées. La superstructure est composée d'une dalle de béton reposant sur 4 poutres en acier. Le tablier est supporté par des piles-murs en béton armé. Comme mentionné, le comportement sismique du pont est étudié dans la direction longitudinale uniquement. La rigidité de flexion des piles dans cette direction a été calculée en fonction de leur géométrie et du biais du pont. Dans la direction longitudinale, les poutres s'appuient sur des appareils mobiles installés à la culée 1 et aux piles 2, 3, et 4, et sur des isolateurs sismiques à la culée 5. Les appuis mobiles à la culée 1 et aux piles 2 et 3 comprennent une interface de glissement faite d'acier inoxydable poli et de PTFE vierge et lubrifié, donnant lieu à un faible coefficient de frottement. Deux types de PTFE non lubrifiés et renforcés de fibres ont été utilisés pour les appuis mobiles à la pile 4 et pour les isolateurs sismiques à la culée 5 afin d'augmenter le frottement et ainsi obtenir le niveau souhaité de dissipation d'énergie sismique.

Modèle numérique

L'objectif du projet était de vérifier s'il est possible de prédire l'effet de systèmes de protection sismique sur le comportement de ponts soumis à des tremblements de terre. Dans ce contexte, des modèles numériques très simples ont été retenus pour les structures étudiées, permettant de se concentrer sur le comportement des appareils étudiés et leur influence sur le comportement de la structure. Des modèles plus élaborés devraient normalement être utilisés en pratique pour tenir d'autres effets pouvant affecter le comportement sismique de l'ouvrage. Les mêmes hypothèses de modélisation ont été appliquées pour les sous-structures numériques des simulations hybrides (application Simulink) et les modèles purement numériques (SAP2000).

Le modèle du pont avec appareils mobiles et isolateurs sismiques est illustré à la Fig. 3. On a supposé une rigidité infinie dans la direction longitudinale pour le tablier du pont, permettant de considérer un même déplacement longitudinal du tablier au droit de chacun des appuis. Comme illustré, cela a permis de reproduire l'ensemble de la structure par un modèle à un seul degré de liberté. L'interaction sol-structure a été ignorée et les culées ont été considérées comme infiniment rigides. Pour les piles, on a posé une loi de comportement élastique compte tenu que les efforts dans les piles sont maintenus sous la résistance nominale de ces éléments (Fig. 3b). La rigidité des piles a été évaluée en supposant une section fissurée. Une loi hystérétique bilinéaire a été adoptée pour les appareils d'appui mobiles et les isolateurs sismiques. Pour les appareils mobiles (Fig. 3c), la rigidité initiale a été fixée égale à l'infinie, la limite élastique a été posée égale au coefficient de frottement de l'interface multipliée par la charge normale transmise par l'appui. Plusieurs valeurs du coefficient de frottement ont été considérées pour examiner l'influence de l'état (neuf ou vieilli) de l'appareil sur le comportement sismique du pont. La pente de la courbe d'hystérésis en régime inélastique a été posée égale à zéro. Dans les simulations hybrides, le comportement des isolateurs sismiques était obtenu du spécimen testé au laboratoire. Dans le modèle purement numérique du pont, les paramètres décrivant le comportement bilinéaire de la Fig. 3d ont été définis à partir des valeurs de la rigidité initiale, du coefficient de frottement et de la rigidité des ressorts à boudin qui ont été mesurées durant les essais sous sollicitations harmoniques. Les essais ont démontré que le coefficient de frottement augmentait avec le taux de déplacement (vitesse) et une valeur moyenne a été utilisée dans les analyses. Dans les modèles SAP2000, l'élément de type « Plastic Wen » avec un coefficient de transition très élevé (200) entre les phases élastique et inélastique a été utilisé pour reproduire le comportement hystérétique bilinéaire des appuis mobiles et des isolateurs sismiques. Un amortissement de Rayleigh proportionnel à la masse et égal à 5% de l'amortissement critique a été considéré dans les modèles numériques, tant dans les simulations hybrides que dans les simulations purement numériques avec le logiciel SAP2000.

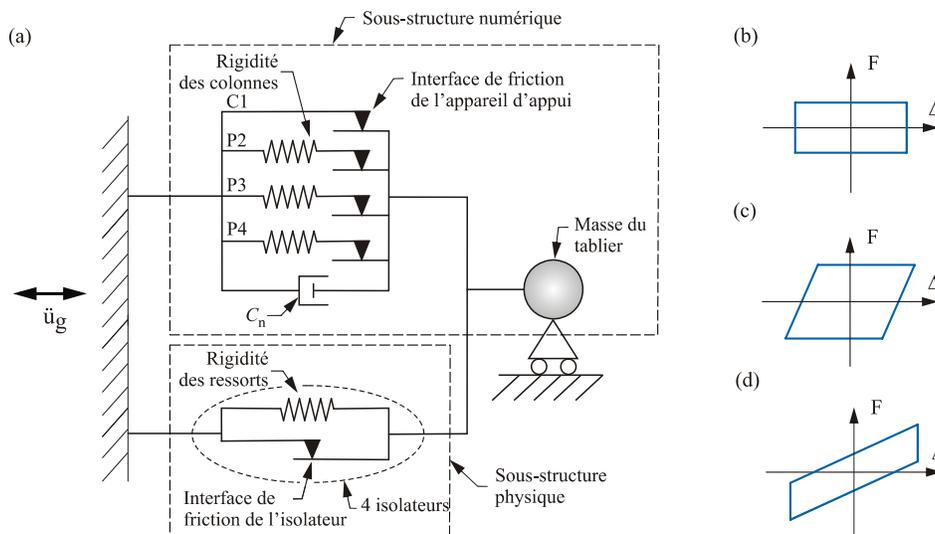


Figure 3. Modèle pour l'étude du comportement sismique longitudinal du pont avec appuis mobiles et isolateurs sismiques : (a) Modèle; (b) Hystérésis des appuis mobiles à la culée 1; (c) Hystérésis des appuis mobiles et des piles travaillant en série aux piles 2, 3 et 4; et (d) Hystérésis des isolateurs sismiques.

Résultats des simulations hybrides et numériques

On compare à la Fig. 4 les historiques du déplacement relatif longitudinal de la superstructure du pont obtenus de la simulation hybride et de l'analyse avec le logiciel SAP2000 pour un des mouvements sismiques du Tableau 1. Une très bonne corrélation a été obtenue entre les résultats numériques et expérimentaux, tant pour ce séisme que pour les autres mouvements sismiques considérés. Cette corrélation est cependant conditionnelle à une caractérisation adéquate des propriétés du spécimen. On a observé que les déplacements ont tendance à diminuer lorsqu'un coefficient de frottement plus élevé est considéré pour les interfaces de glissement, ce qui était anticipé en raison de la capacité accrue de dissiper l'énergie sismique lorsque le frottement est plus important. Par contre, les efforts imposés aux éléments de fondation augmentent en proportion du coefficient de frottement. Dans l'analyse sismique de ponts munis de ce type d'isolateurs, il est donc recommandé de couvrir la plage anticipée pour les coefficients de frottement afin de bien cerner les valeurs maximales possibles des déplacements et des forces.

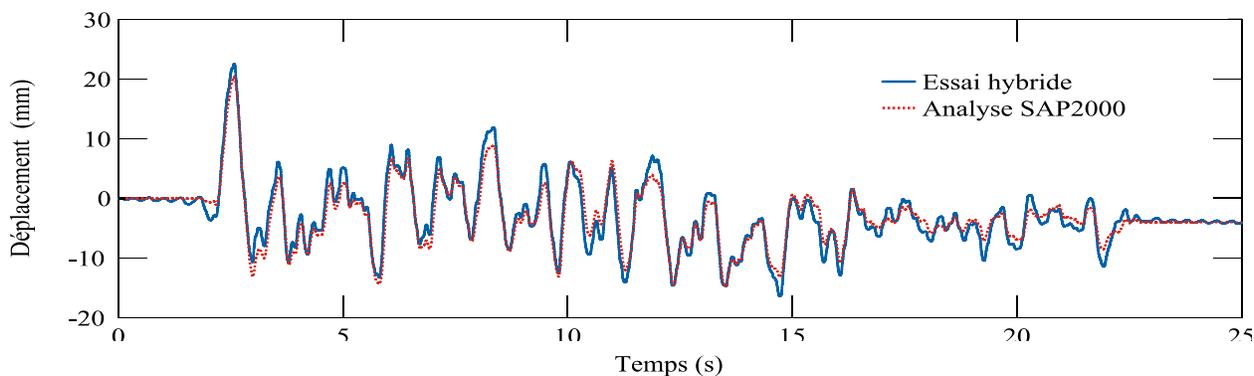


Figure 4. Historiques du déplacement longitudinal relatif de la superstructure du pont équipé d'isolateurs sismiques obtenus des simulations hybride et numérique sous le mouvement sismique M7.0-R70-1.

Pont équipé de systèmes visqueux

Systèmes visqueux

Les amortisseurs visqueux et transmetteurs de chocs sismiques examinés dans cette étude ont été développés et sont fabriqués par Produits Technologiques LCL-Ponts. Les deux produits sont similaires puisqu'ils ont la même apparence extérieure et comprennent tous les deux un piston à double action qui se déplace longitudinalement à l'intérieur d'un cylindre métallique rempli d'un fluide (voir Fig. 5c). La différence entre les deux types d'appareils tient principalement aux caractéristiques des ouvertures permettant l'écoulement du fluide d'un côté à l'autre du piston lorsque celui-ci se déplace. Le premier système est conçu pour dissiper de l'énergie sous sollicitation cyclique. Pour le transmetteur de chocs sismiques, on cherche à limiter la résistance de l'appareil lorsque le taux de déplacement (vitesse) est faible, comme dans le cas des mouvements induits par les variations de température, et à offrir une résistance et une rigidité élevées sous une sollicitation dynamique (hautes vitesses). Pour les deux appareils, la résistance augmente de façon non-linéaire lorsque l'on augmente la vitesse de déformation, jusqu'à atteindre une valeur maximum à grande vitesse. Cette caractéristique permet de contrôler la force maximum pouvant être imposée aux éléments de fondation, peu importe le taux de déformation de l'appareil. Au Québec, les amortisseurs visqueux et les transmetteurs de chocs sismiques de LCL-Ponts ont tous deux été utilisés pour la première fois en 2003, dans le cadre de la réfection parasismique du pont du boulevard Henri-Bourassa au-dessus de l'autoroute 440, à Québec, QC (Loulou et al. 2003).

Pont étudié

Un même pont fictif a été considéré pour étudier le comportement sismique des amortisseurs visqueux et des transmetteurs de chocs sismiques. Il s'agit d'un pont droit à deux travées égales que l'on suppose être construit dans la région de Montréal, QC (Fig 5). Le tablier est composé de quatre poutres en « T » en béton armé et l'appui central est fait de deux pile-murs.

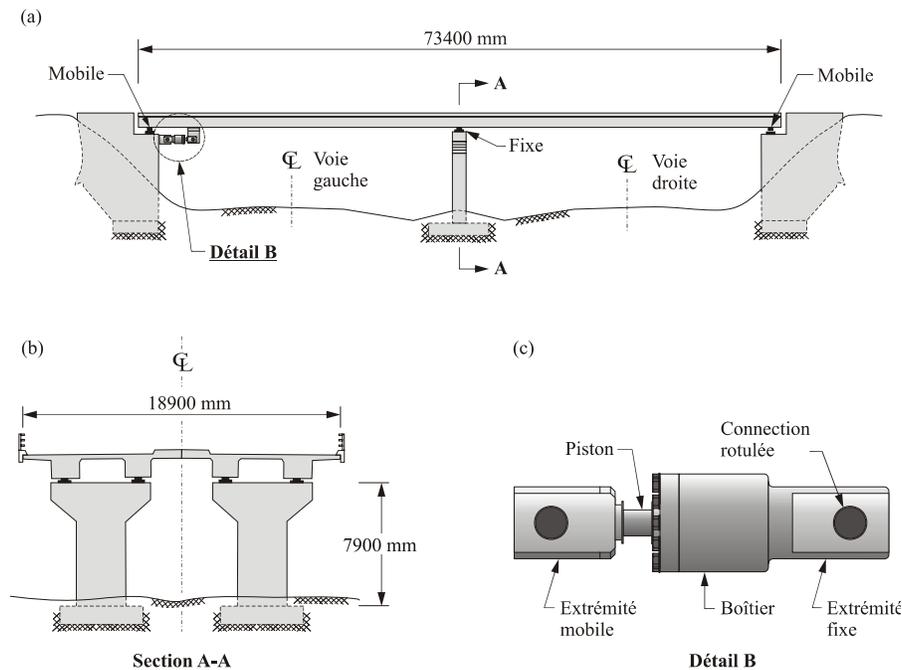


Figure 5. Pont fictif équipé de systèmes visqueux: (a) Élévation; (b) Pile centrale et superstructure; et (c) Amortisseur visqueux ou transmetteur de chocs sismiques.

Dans la direction longitudinale, on a un appui fixe au pilier central alors que les appuis aux culées sont des appuis mobiles avec une interface de glissement PTFE-acier inoxydable avec faible coefficient de frottement. Pour chacun des deux types d'appareils, un scénario hypothétique particulier a été considéré au niveau de la résistance sismique de la pile centrale dans la direction longitudinale du pont. Dans le cas de l'amortisseur sismique, les appareils ont été placés entre une des deux culées et le tablier du pont pour limiter le déplacement longitudinal de la superstructure de façon à ce que la pile demeure élastique, cela en minimisant les efforts horizontaux imposés à la culée. Dans le cas des transmetteurs de chocs sismiques, le scénario hypothétique considéré est celui où la pile n'offre qu'une résistance très faible par rapport à la sollicitation sismique anticipée et ne peut reprendre la charge de freinage prescrite par le code. Des transmetteurs de chocs sismiques ont été placés entre une des culées et la superstructure pour obtenir une résistance suffisante à la charge de freinage et limiter les déformations inélastiques sismiques dans la pile.

Modèle numérique

En adoptant les mêmes hypothèses que celles posées pour le pont avec isolateurs sismiques, soit un tablier et des culées infiniment rigides dans la direction longitudinale, un modèle à un seul degré de liberté dynamique a été développé pour reproduire le comportement du pont sous les sollicitations sismiques et de freinage dans la direction longitudinale. Ce modèle est présenté à la Fig. 6. Pour la pile centrale, on a adopté un comportement hystérétique bilinéaire caractérisé par une rigidité initiale basée sur un moment d'inertie réduit de la pile pour tenir compte de la fissuration et par une limite élastique correspondant à la résistance nominale en flexion de la pile dans la direction longitudinale (Fig. 6b). Pour les deux scénarios, la rigidité de la pile dans le domaine inélastique a été posée égale à une fraction de la rigidité initiale. L'interaction sol-structure et le frottement des appareils d'appui mobiles aux culées ont été négligés dans les modèles numériques.

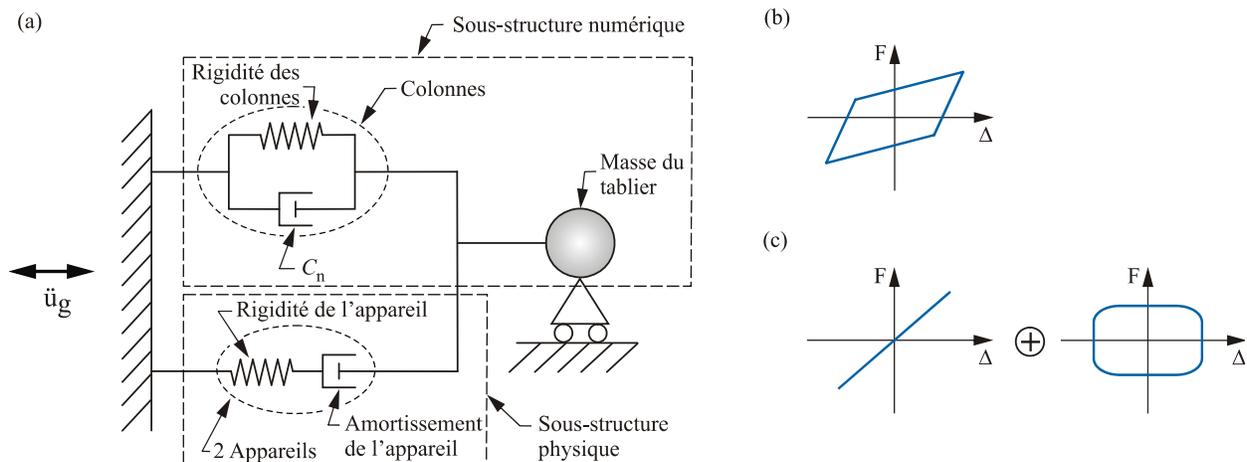


Figure 6. Modèle pour l'étude du pont équipé d'amortisseurs visqueux ou de transmetteurs de chocs sismiques : (a) Modèle; (b) Hystérésis de la pile; et (c) Hystérésis des amortisseurs visqueux et transmetteurs de chocs sismiques.

Dans les simulations hybrides, les appareils de protection sismique constituaient la sous-structure physique. Dans les simulations purement numériques, on a modélisé le comportement des deux appareils par une loi de comportement visqueux non-linéaire (Fig. 6c):

$$F = C_p V^\alpha \quad (1)$$

où C_p est le coefficient d'amortissement, V est la vitesse du déplacement du piston de l'appareil et α est un paramètre caractéristique de la viscosité du fluide. Les valeurs de ces paramètres ont été établies à partir des essais de caractérisation au cours desquels les spécimens étaient soumis à des sollicitations harmoniques imposées à différentes fréquences. Dans le logiciel SAP2000, on a utilisé l'élément « Damper », un élément qui comprend un amortisseur visqueux non-linéaire qui est défini par la loi de comportement donnée par l'équation (1) et qui agit en série avec un ressort à comportement linéaire et élastique (Fig. 6c). Le ressort permet de représenter la flexibilité des composants des appareils. La valeur de la rigidité spécifiée pour ce ressort a aussi été obtenue des essais de caractérisation des appareils.

Résultats des simulations hybrides et validation des modèles numériques

À la Fig. 7, on compare, pour chacun des deux appareils considérés, des historiques du déplacement longitudinal relatif de la superstructure qui ont été obtenus des analyses purement numériques conduites avec SAP2000 et des simulations hybrides en temps réel. Pour les deux systèmes, une très bonne concordance a été obtenue entre les résultats numériques et expérimentaux. Le même accord entre les deux types de simulation a été observé pour les autres mouvements sismiques du Tableau 1. Par contre, on a noté qu'une bonne prédiction dépend étroitement d'une caractérisation adéquate des propriétés des spécimens sur la plage des vitesses anticipées. Par exemple, pour les transmetteurs de chocs sismiques, deux séries différentes de paramètres expérimentaux ont été nécessaires pour bien prédire les forces imposées aux éléments du pont par les appareils soumis à des vitesses faibles et à des vitesses élevées.

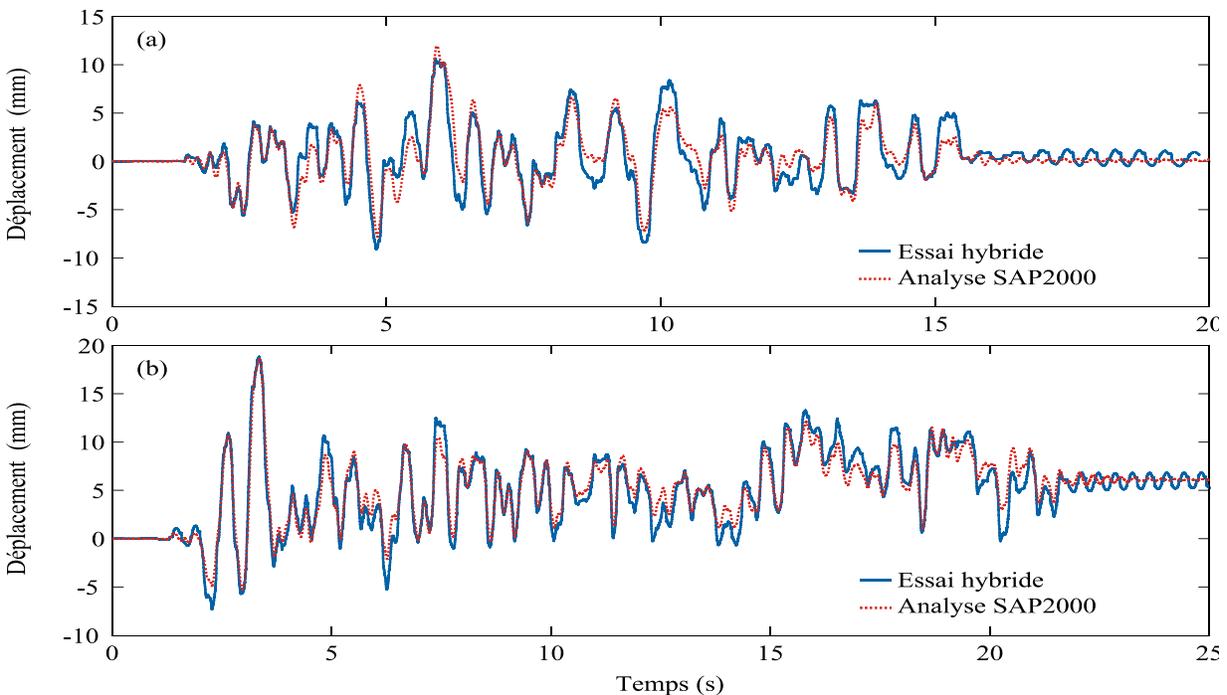


Figure 7. Historiques de déplacement longitudinal relatif de la superstructure obtenus des simulations hybrides et numériques pour le pont équipé : (a) d'amortisseurs visqueux sous le mouvement sismique M7.0-R30-1; et (b) de transmetteurs de chocs sismiques sous le mouvement sismique M7.0-R100-2.

Conclusions

Des simulations hybrides et des simulations purement numériques ont été réalisées sur des ponts simples équipés de trois types d'appareils de protection sismique. Le comportement des ponts dans la direction longitudinale a été examiné et l'emphase a été mise sur l'influence du comportement des appareils sur la réponse du pont. Plusieurs hypothèses ont été posées pour permettre de développer et valider des modèles numériques simples pouvant être traités avec des logiciels couramment utilisés dans la pratique.

La comparaison des résultats obtenus des analyses numériques et des simulations hybrides montre que la performance des trois types de systèmes de protection sismique étudiés et leur influence sur le comportement de structures de pont peuvent être prédits avec précision à la condition de bien connaître les propriétés des appareils.

Les modèles numériques simplifiés comme ceux décrits dans cet article peuvent être utilisés pour la conception parasismique préliminaire de structures de ponts. À l'étape finale de la conception, on doit utiliser des modèles plus élaborés prenant en compte d'autres paramètres pouvant influencer le comportement dynamique sismique de la structure, tels que l'interaction sol-structure ou les effets tridimensionnels.

Remerciements

Les auteurs remercient le Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) du Gouvernement du Québec, le Ministère des transports du Québec, le Fonds canadien pour l'innovation (FCI) et le Conseil de recherche en sciences naturelles et génies (CRSNG) du gouvernement du Canada pour le financement de ce projet. Goodco Z-Tech et Produits Technologiques LCL-Ponts ont fourni les spécimens utilisés pour les essais en laboratoire. Les auteurs soulignent la contribution du personnel technique du laboratoire de structures de l'École Polytechnique de Montréal au programme d'essais.

Références

- Calvi, G. M., Kawashima, K., Billings, I., Elnashai, A., Nuti, C., et Pecker, A. (2007). *FIB bulletin 39 : Seismic bridge desing and retrofit - structural solutions - Chapter 6 : Design for enhanced control of damage*: Fédération internationale du béton, Lausanne, Suisse.
- CNRC. (2005). *Code national du bâtiment - Canada 2005, 12^{ième} éd.* Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, ON.
- CSA. (2006). *Design of Highway Bridges, CSA Standard S6*. Canadian Standards Association, Toronto, ON.
- Goodco Z-Tech. (2009). <http://www.goodcoztech.ws/www/v4/eGoodco.ns>, Consulté en mai 2009.
- Guizani, L. (2003). Sur l'isolation sismique des ponts au Canada. *10e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art*, Québec, QC.
- Guizani, L. (2007). Isolation sismique et technologies parasismiques pour les ponts au Québec : Mise au point. *14e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art*, Québec, QC.

Lamarche, C. P., Bonelli, A., Bursi, O. S., et Tremblay, R. (2009). A Rosenbrock-W method for real time dynamic substructuring and pseudo-dynamic testing. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38(9), 1071-1092.

LCL. (2009). Web site: <http://www.lcl-bridge.com/lud.html>, Consulté en mai 2009

Loulou, R., Maillette, P., et Ladicani, K. (2003). Technologies parasismiques dans la réfection d'un pont à Québec, *10e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art 2003*, Québec, QC.

Simulink®. (2007). *The Mathworks, Inc., Natick, MA, USA*.

Tremblay, R., et Atkinson, G. M. (2001). Comparative Study of the Inelastic Seismic Demand of Eastern and Western Sites. *Earthquake Spectra*, 17(2), 333-358.