



CAMPUS PRINCIPAL DE SHERBROOKE



CAMPUS DE LA SANTÉ DE SHERBROOKE



CAMPUS DE LONGUEUIL

INFLUENCE DE L'INTERACTION SOL- STRUCTURE SUR LA RÉPONSE SISMIQUE DES PONTS ROUTIERS

Mélissa Barrière, ing. jr.

Pr. Nathalie Roy

Pr. Jean Proulx

9 mai 2018, Québec

PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. Introduction
2. Pont de Magog
3. Conclusions des travaux antérieurs (F. Dallaire & X. Robert-Veillette)
4. Modélisation dans OpenSees
5. Résultats
6. Conclusions

PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. **Introduction**
2. Pont de Magog
3. Conclusions des travaux antérieurs (F. Dallaire & X. Robert-Veillette)
4. Modélisation dans OpenSees
5. Résultats
6. Conclusions

INTRODUCTION

- Le présent projet de recherche est la continuité de deux projets de recherche effectués à l'Université de Sherbrooke
 - Ce projet consiste en l'étude du comportement sismique de ponts de la région de l'Estrie :
 - Volet expérimental : Essais dynamiques *in situ*
 - Volet numérique : Calibration des modèles numériques
 - Volet numérique : Modélisation des fondations (Présent projet)
- Travaux antérieurs
- Les modèles numériques 3D sont soumis à des accélérogrammes sélectionnés à l'aide de la méthode proposée dans le CNBC 2015

PROBLÉMATIQUE

- L'absence d'étude sur l'effet de différents modèles de fondations
- Les structures courantes sont souvent modélisées en considérant une **fondation rigide**
- La dernière édition de la norme CSA S6-14 propose un modèle numérique linéaire afin de considérer l'interaction sol-structure à l'aide d'un système de ressorts, sans l'ajout d'amortissement

Introduction

Pont à l'étude

Travaux antérieurs

Modélisation

Résultats

Conclusions

OBJECTIFS

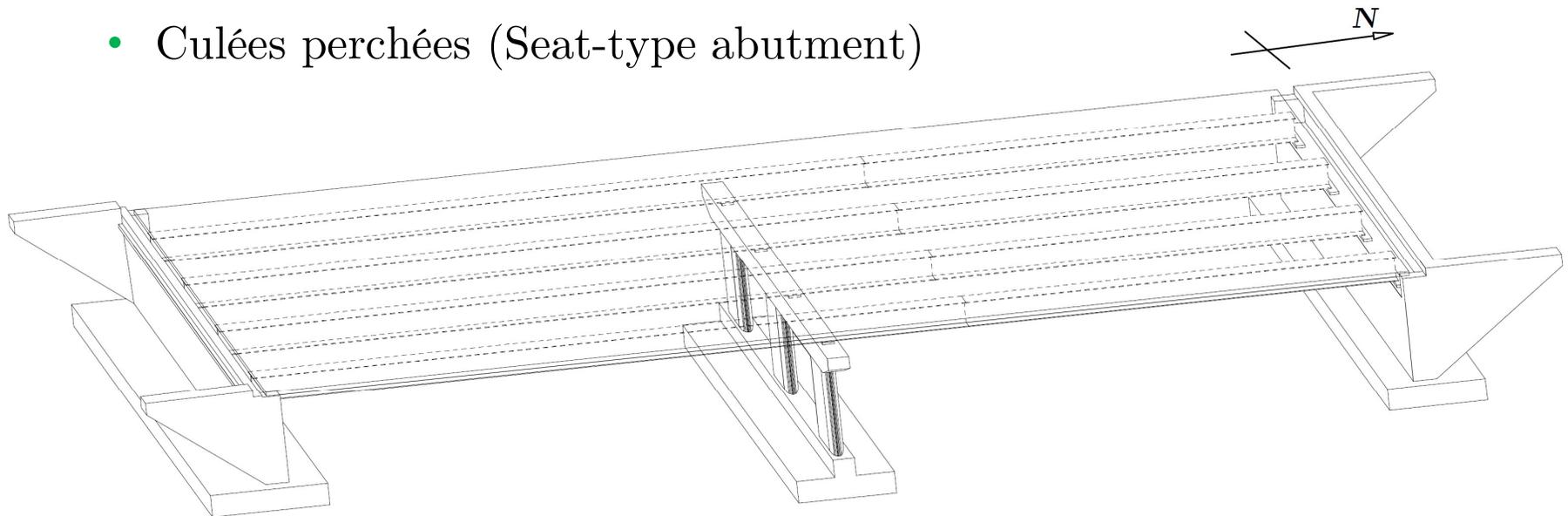
- Évaluer l'influence de l'interaction sol-structure sur les déplacements du tablier
- Comparer la performance de quatre modèles de fondation
- Évaluer la pertinence d'utiliser des modèles de fondation avec différents niveaux de complexité

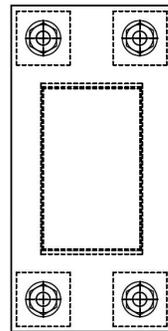
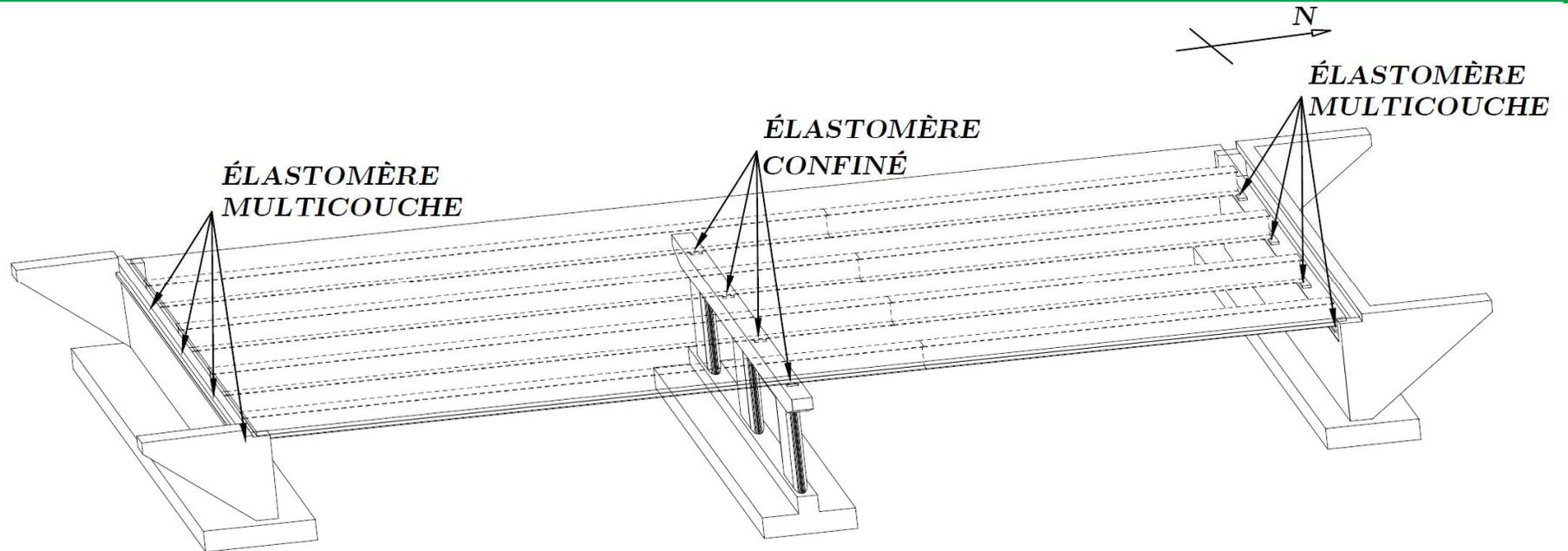
PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. Introduction
- 2. Pont de Magog**
3. Conclusions des travaux antérieurs (F. Dallaire & X. Robert-Veillette)
4. Modélisation dans OpenSees
5. Résultats
6. Conclusions

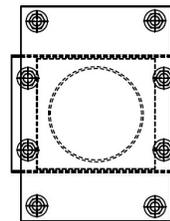
PONT À L'ÉTUDE

- Pont du chemin Roy reliant les municipalités Magog-Orford :
 - Construit en 2009
 - Deux travées avec un biais de 6 degrés
 - Quatre poutres en acier de 1,2 m de hauteur
 - Dimensions : 59,4 m de longueur et 11,4 m de largeur
 - Fondation superficielle
 - Culées perchées (Seat-type abutment)

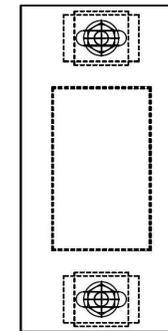
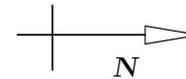




CULÉE SUD
ÉLASTOMÈRE
MULTICOUCHE



APPUI CENTRAL
ÉLASTOMÈRE
CONFINÉ



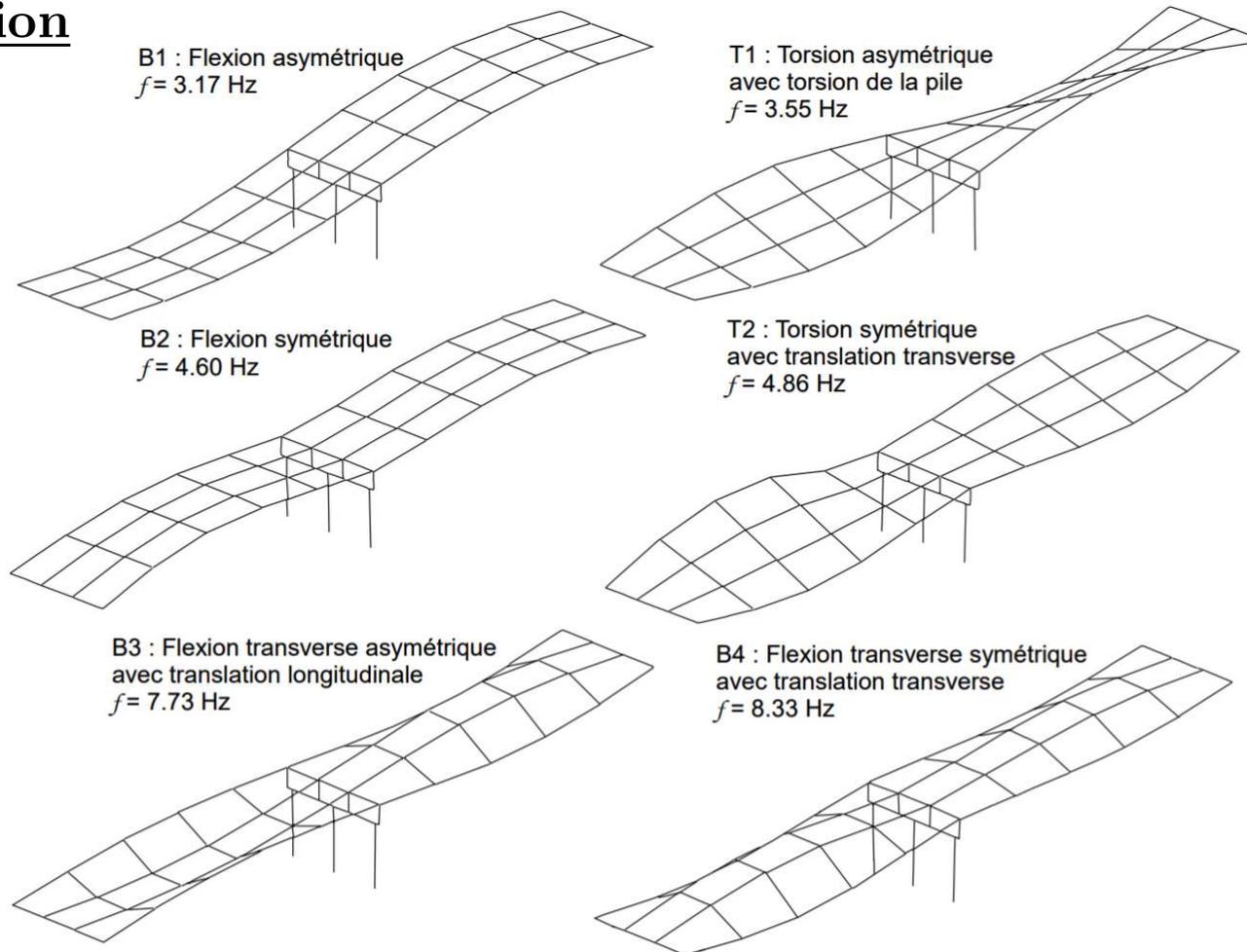
CULÉE NORD
ÉLASTOMÈRE
MULTICOUCHE

PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. Introduction
2. Pont de Magog
- 3. Conclusions des travaux antérieurs (F. Dallaire & X. Robert-Veillette)**
4. Modélisation dans OpenSees
5. Résultats
6. Conclusions

ESSAIS DYNAMIQUES IN SITU

- Les essais *in situ* sous **vibrations ambiantes** réalisés sur trois ponts de la région de l'Estrie permettent d'identifier les **modes de vibration**



ESSAIS DYNAMIQUES IN SITU

- Les essais *in situ* sous **vibrations forcées** permettent de confirmer les fréquences des ouvrages et d'obtenir une meilleure estimation de l'amortissement visqueux élastique

Mode de vibration	Vibrations ambiantes		Vibrations forcées		MAC
	Fréq. (Hz)	Amort. (%)	Fréq. (Hz)	Amort. (%)	
B1	3.17	1.01	3.19	0.80	0.97
T1	3.55	0.89	3.56	0.79	0.99
H1	N/A	N/A	4.25	1.80*	N/A
B2	4.60	1.22	4.59	0.88	0.99
T2	4.86	0.96	4.89	0.61	0.98
B3	7.73	1.18	7.91	1.14	0.97
H2	N/A	N/A	7.91	1.24	N/A
B4	8.33	1.02	8.47	1.09	0.97
H3	N/A	N/A	8.72	2.05*	N/A

Légende
 B = Flexion
 T = Torsion
 H = Horizontal

* Valeur maximale estimée

- Le taux d'amortissement élastique est normalement inférieur à la valeur de 2% proposée dans les normes ($\pm 1\%$)

CALIBRATION DU MODÈLE

- En supposant une fondation rigide, les modèles numériques sont calibrés afin de faire concorder les déformées modales du modèle numérique à celles obtenues expérimentalement

Mode	Fréquences		
	Essais (Hz)	Modèle (Hz)	Écart (%)
B1	3,19	3,05	-4,39
T1	3,56	3,56	-
H1	4,25	4,23	-0,47
B2	4,59	4,80	4,58
T2	4,89	5,09	4,09
B3	7,73	7,74	0,13
H2	7,91	7,84	-0,88
B4	8,47	8,43	-0,47
H3	8,72	8,63	-1,03

1^{ière} période (Trans.) → 0,24 s
1^{ière} période (Long.) → 0,13 s

PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. Introduction
2. Pont de Magog
3. Conclusions des travaux antérieurs (F. Dallaire & X. Robert-Veillette)
4. **Modélisation dans OpenSees**
5. Résultats
6. Conclusions

MODÉLISATION DANS OPENSEES

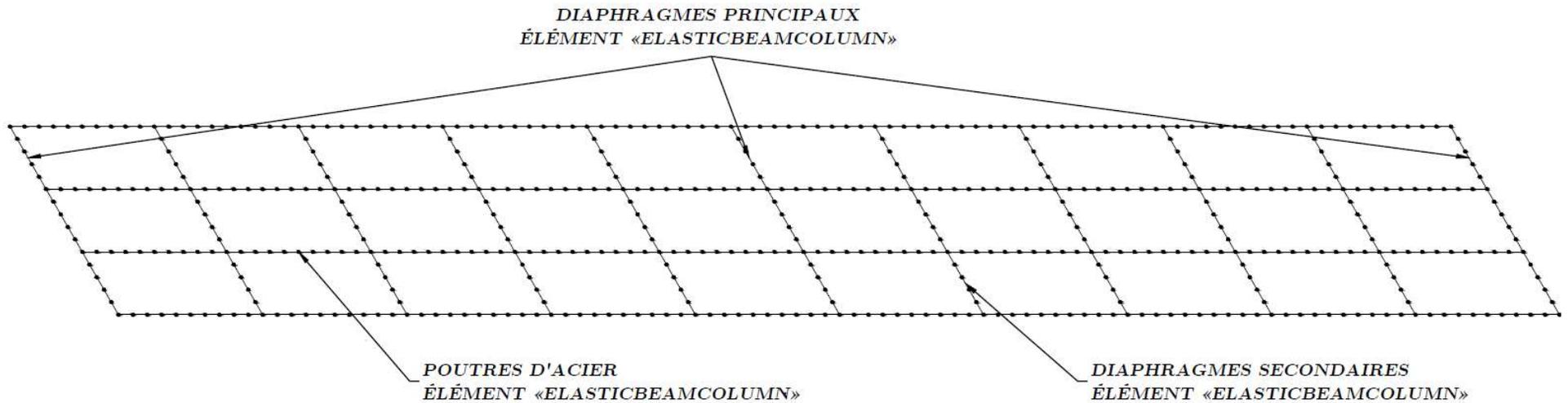
- 1. Modélisation de la structure
 - Tablier
 - Élastomère
 - Piles
- 2. Modélisation des fondations (4 approches)
 1. Fondation rigide (encastrement)
 2. Méthode du CSA S6-14 (Ressort – Sans amortissement)
 3. Méthode du guide NEHRP (Ressort – Avec amortissement)
 4. Méthode Beam-on-Nonlinear-Winkler-Foundation (en cours)
- 2.1. Deux types de sol (C – D)
- 3. Modélisation des culées
 - Méthode du CSA S6-14 (élément gap)

MODÉLISATION DANS OPENSEES

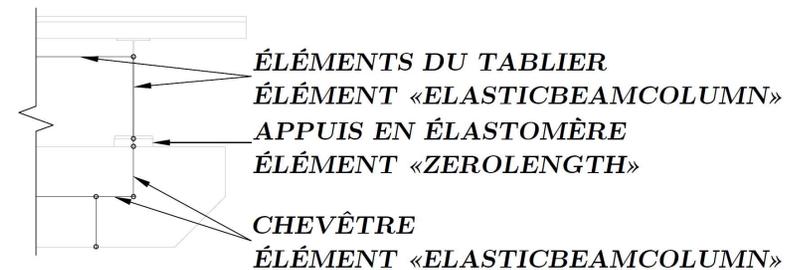
- Amortissement de type Rayleigh avec des coefficients actualisés selon la rigidité du pas de temps précédent (Charney, 2008)
 - Taux d'amortissement visqueux élastique de 2% utilisé
- Séismes synthétiques d'Atkinson pour les analyses temporelles non-linéaires :
 - 11 séismes synthétiques choisis par classe de sol :
 - Classe de sol du pont de Magog (type C)
 - Classe de sol pour comparaison (type D)
 - Valeur moyenne des réponses

1. MODÉLISATION DE LA STRUCTURE

- Tablier : éléments « ElasticBeamColumn »



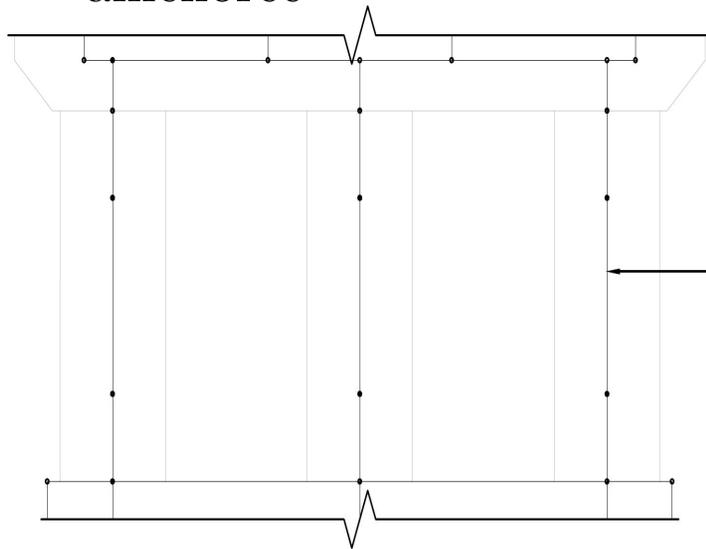
- Élastomère : éléments « ZeroLength »



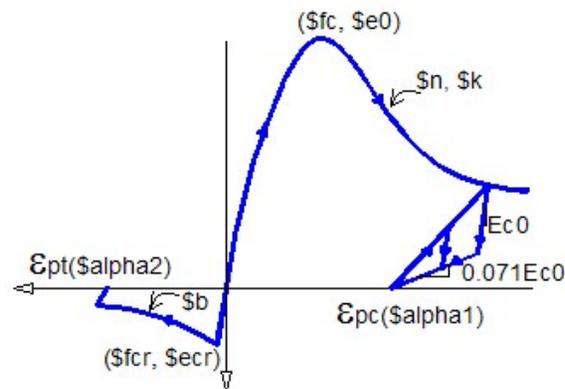
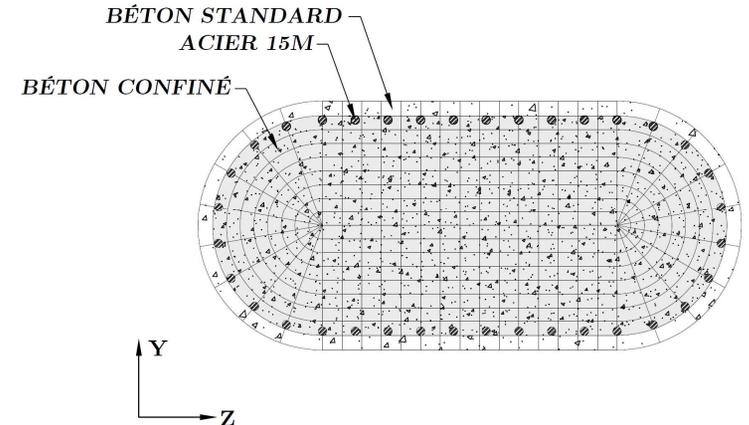
- Chevêtre : éléments « ElasticBeamColumn »

1. MODÉLISATION DE LA STRUCTURE

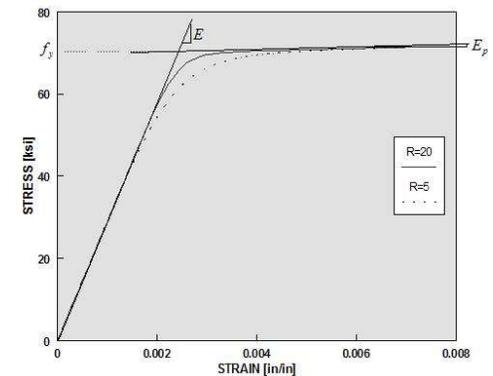
- Colonnes : éléments «ForceBeamColumn» avec la méthode de Gauss-Radau améliorée



COLONNE
ÉLÉMENT «FORCEBEAMCOLUMN»
POINTS D'INTÉGRATION



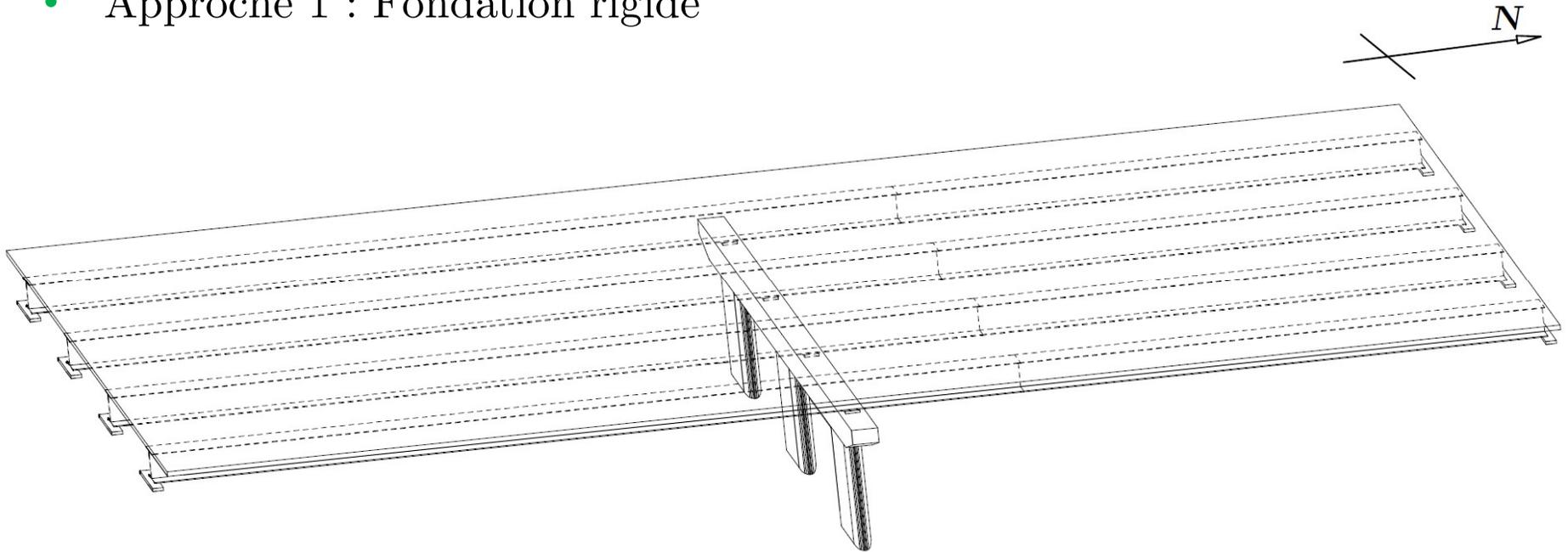
Béton



Acier

2. MODÉLISATION DES FONDATIONS

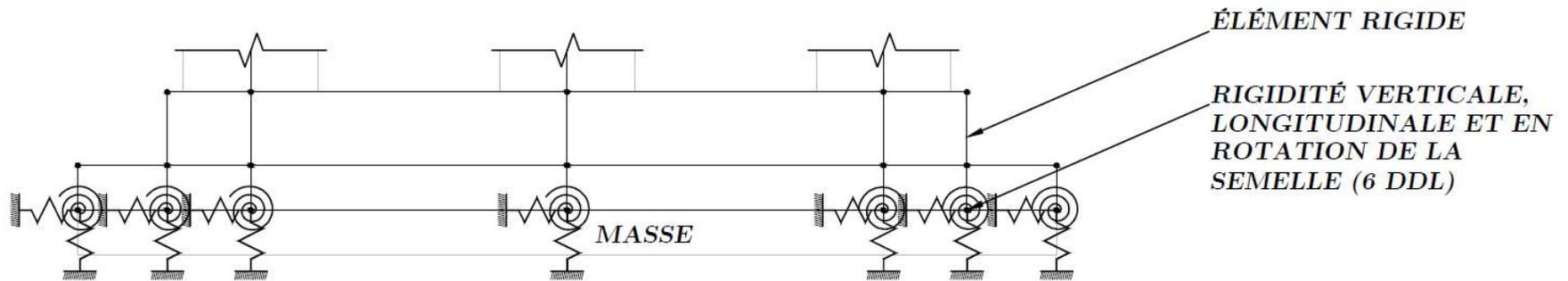
- Approche 1 : Fondation rigide



- Encastrement de la structure :
 - Base des colonnes
 - Sous les élastomères

2. MODÉLISATION DES FONDATIONS

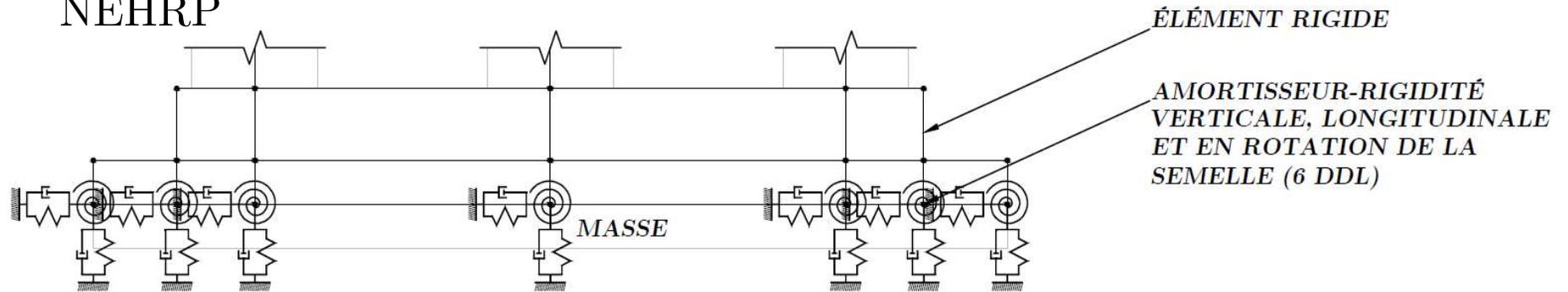
- Approche 2 : Comportement linéaire des fondations – Méthode de la norme CSA S6-14



- Avantages
 - Définition des rigidités aux six degrés de liberté
 - Définition de facteurs de correction de la rigidité en fonction de la profondeur de la semelle
- Inconvénients
 - Ne représente pas le comportement réel du sol en présence d'un séisme de grande importance
 - Aucune définition de l'amortissement visqueux

2. MODÉLISATION DES FONDATIONS

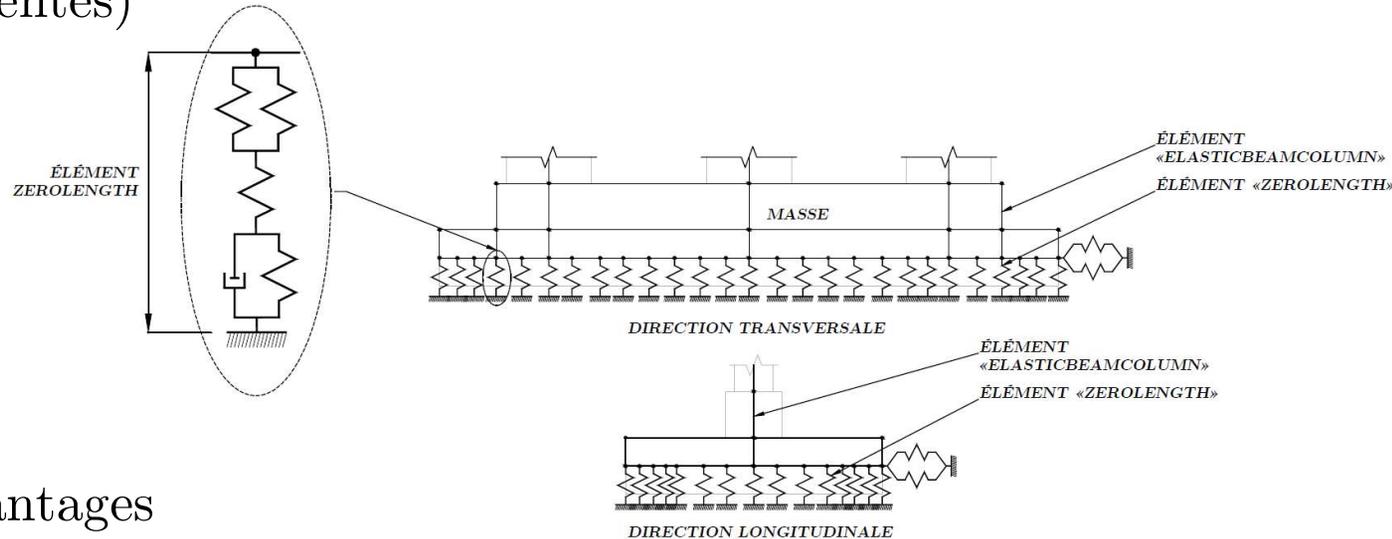
- Approche 3 : Comportement linéaire des fondations – Méthode du guide NEHRP



- Avantages
 - Définition des rigidités et des amortissements aux six degrés de liberté
 - Définition de facteurs de correction de la rigidité en fonction de la profondeur de la semelle, de la fréquence et d'un ratio de la rigidité sol-fondation
- Inconvénient
 - Ne représente pas le comportement réel du sol en présence d'un séisme de grande importance

2. MODÉLISATION DES FONDATIONS

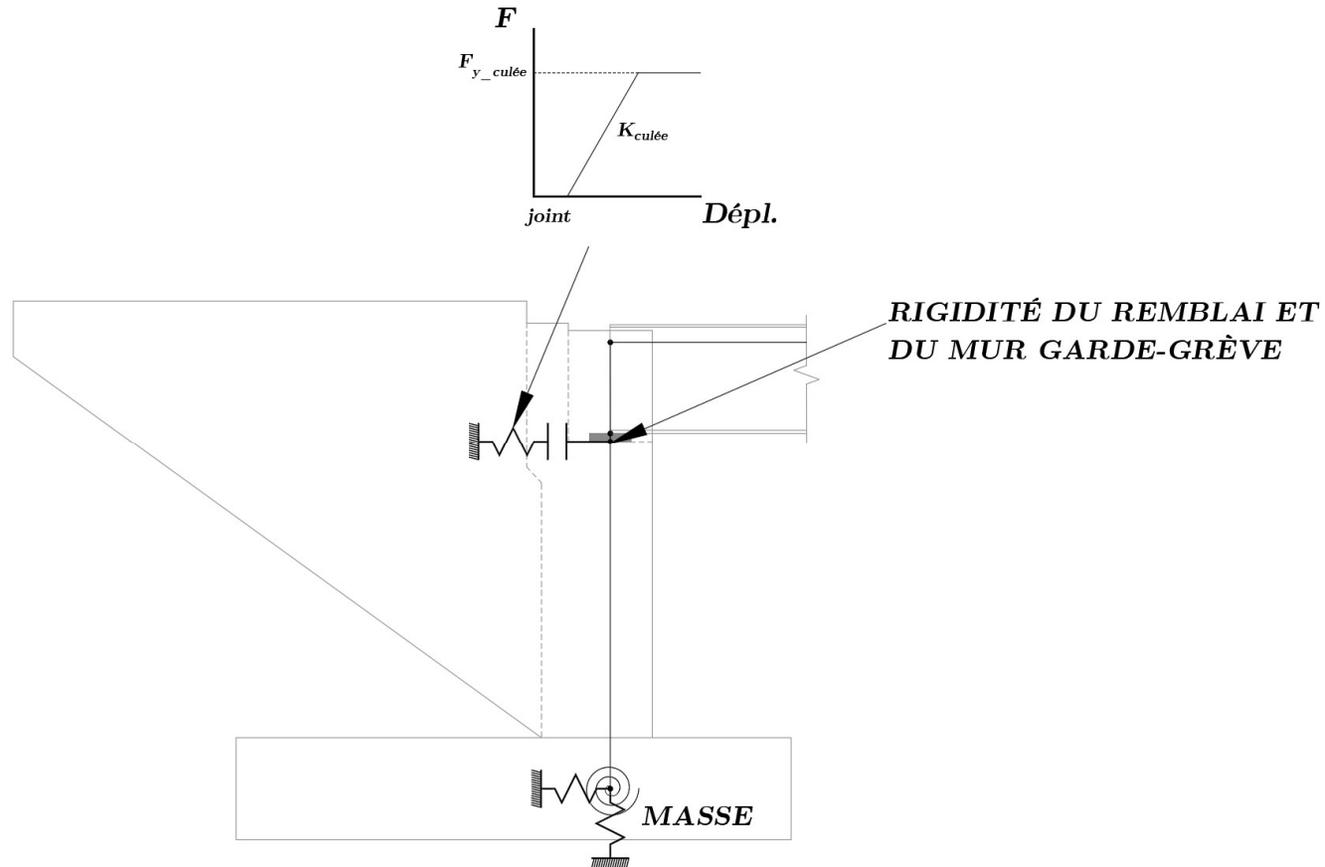
- Approche 4 : Comportement non linéaire des fondations – Méthode Beam-on-Nonlinear-Winkler-Foundation (travaux en cours – résultats non présentés)



- Avantages
 - Utilisation de lois de comportement implémentées par Raychowdhury en 2008 dans OpenSees
- Inconvénients
 - Comportement uniaxial du ressort (valide pour les modèles 2D)
 - Deux types de sol disponibles (« B » (roche), « D » (sol consistant))

3. MODÉLISATION DES CULÉES

- Réponse longitudinale – Méthode de la norme CSA S6-14



- Définition de la rigidité bilinéaire associée à la pression active du remblai

RAPPEL DES CLASSES DE SOLS

- Classification des sols

Classe du site	Nom du profil du sol	Propriétés moyennes dans les 30 m supérieurs	
		Vitesse moyenne de l'onde de cisaillement \bar{V}_s (m/s)	Résistance à la pénétration standard \bar{N}_{60}
A	Roche dure	$\bar{V}_s > 1500$	Sans objet
B	Roche	$760 < \bar{V}_s \leq 1500$	Sans objet
C	Sol très dense et roche dense	$450 < \bar{V}_s < 760$	$\bar{N}_{60} > 50$
D	Sol consistant	$180 < \bar{V}_s < 360$	$15 \leq \bar{N}_{60} \leq 50$
E	Sol meuble	$\bar{V}_s < 180$	$\bar{N}_{60} < 15$
F	Autre sol	Évaluation requise sur le site	

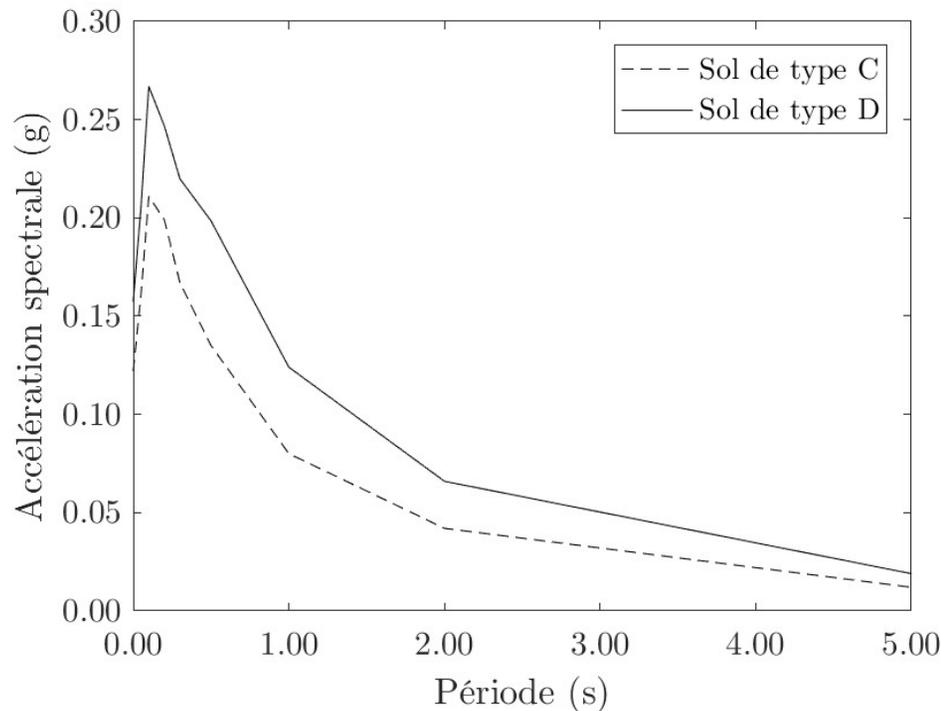
INFLUENCE DES CLASSES DE SOLS

- Le type de sol a une influence sur :

1. Spectre de calcul

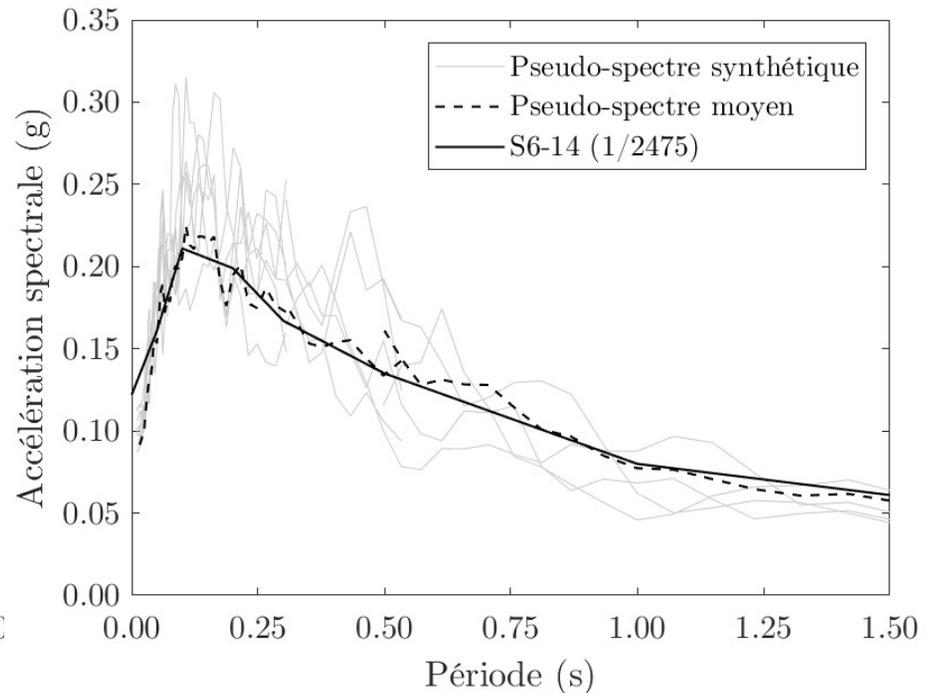
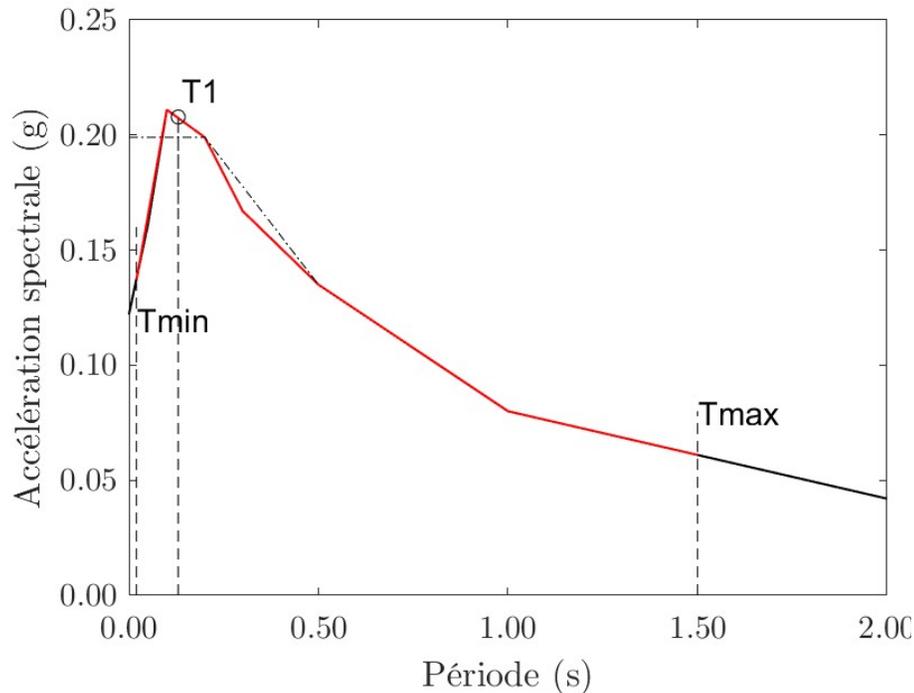
2. Paramètres du modèle d'interaction sol-structure

- Module de cisaillement (G)
- Coefficient de Poisson
- Densité du sol



SÉLECTION DES ACCÉLÉROGRAMMES

- Séismes synthétiques d'Atkinson compatibles avec le spectre d'aléa uniformisé du CNBC 2015 (Atkinson et al., 2015) :

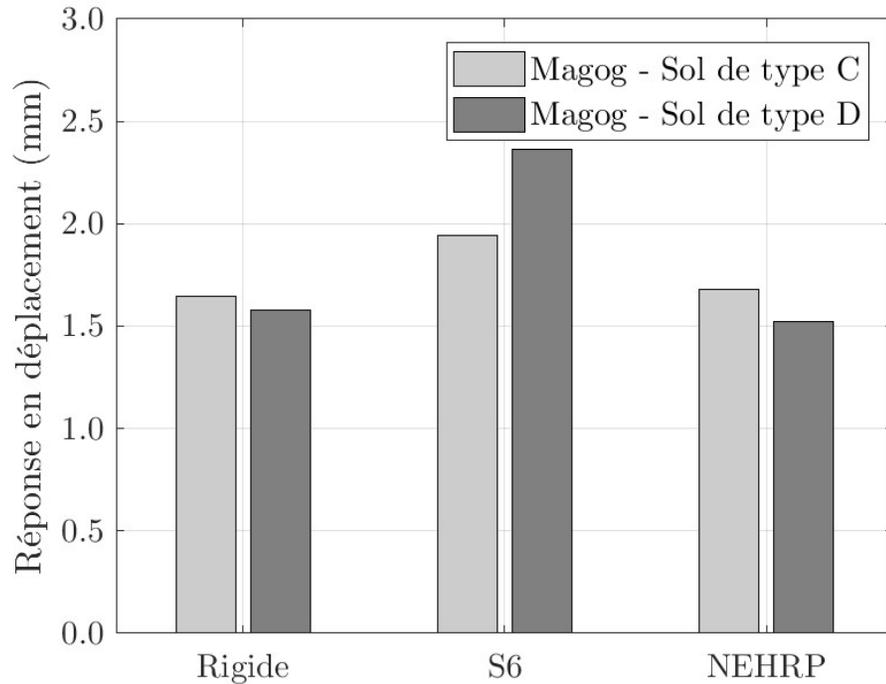


1. Plage effective de période
du spectre cible

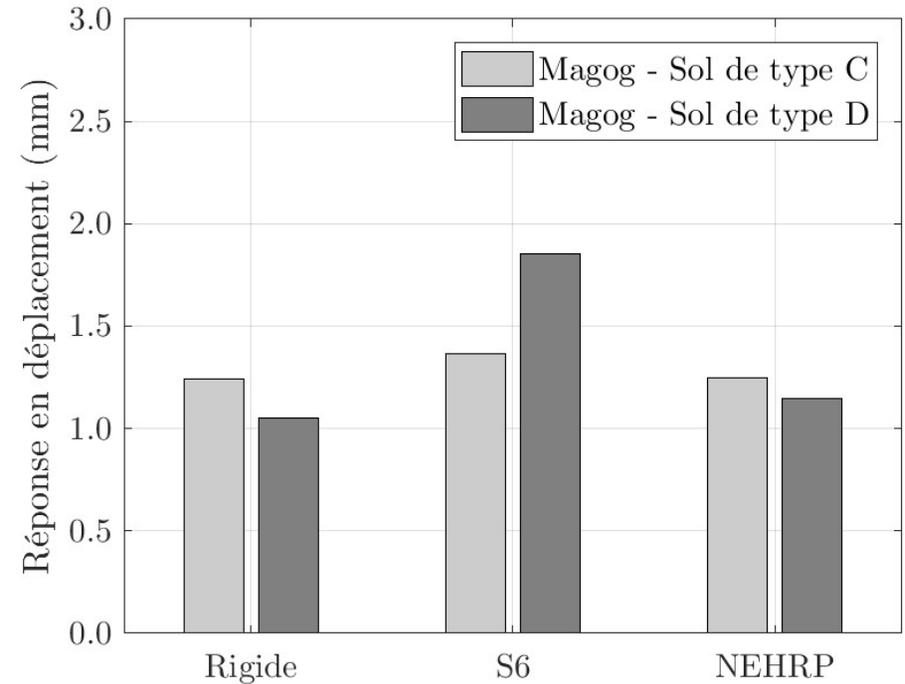
2. Étalonnage des pseudo-spectres
synthétiques

PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. Introduction
2. Pont de Magog
3. Conclusions des travaux antérieurs (F. Dallaire & X. Robert-Veillette)
4. Modélisation dans OpenSees
5. **Résultats**
6. Conclusions



- Direction longitudinale



- Direction transversale

PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. Introduction
2. Pont de Magog
3. Conclusions des travaux antérieurs (F. Dallaire & X. Robert-Veillette)
4. Modélisation dans OpenSees
5. Résultats
- 6. Conclusions**

CONCLUSIONS

- L'absence d'amortissement dans le modèle de la norme CSA S6-14 surestime les déplacements en tête par rapport aux deux autres modèles présentés
- L'utilisation de la méthode du guide NEHRP, utilisant un système de ressort-amortissement, donne des réponses réalistes
- L'utilisation d'une fondation rigide néglige l'effet de l'interaction sol-structure, ce qui a une influence sur l'évaluation de la réponse
- Les modèles de fondations incluant l'interaction sol-structure ajoutent de la flexibilité au modèle ce qui se traduit par une augmentation des déplacements en tête
- L'ajout d'amortissement à la fondation réduit les déplacements par rapport à un modèle sans amortissement
- L'ajout de l'interaction sol-structure aux modèles numériques engendre une réduction de la réponse en cisaillement

RECOMMANDATIONS

- Pour un pont standard situé dans une zone de faible activité sismique, l'impact d'inclure l'interaction sol-structure aux modèles numériques n'est pas significatif
- Il est recommandé de privilégier la modélisation de l'interaction sol-structure par rapport à une fondation rigide
- L'utilisation de la méthode simplifiée de la norme CSA S6-14 ne représente pas le comportement réaliste du sol, puisqu'il néglige les amortissements hystérétique et radial de ce dernier
- L'inclusion d'un système ressort-amortissement au modèle engendre une complexification négligeable face à un modèle utilisant seulement des ressorts

- Évaluer les réponses sismiques en considérant un comportement non linéaire de l'interaction sol-structure à l'aide de la méthode de Beam-on-non-linear-Winkler-foundation.
- Effectuer les analyses dynamiques pour deux ponts supplémentaires.



- Les auteurs remercient le CRSNG, le FRQNT et le CEISCE pour leur support financier offert pour ce projet.
- Les auteurs remercient M. Sylvain Bouchard de Transport Québec pour l'accès au pont pour les essais dynamiques et pour l'accès aux plans des ponts.
- Les auteurs remercient le MTQ pour l'organisation de ce colloque.

RÉFÉRENCES

Atkinson, G. et al. (2015) *Selection and scaling of ground motion time histories for seismic analysis using NBCC 2015*. The 11th Canadian Conference on Earthquake Engineering : Canadian Association for Earthquake Engineering.

Charney, F.A. (2008) *Unintended consequences of modeling damping in structures*. Journal of Structural Engineering, Volume 134, Numéro 4, p. 581-592

Dallaire, F. (2016) *Quantification de l'amortissement visqueux élastique des piles en béton armé des ponts routiers québécois*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 142 p.

NEHRP Consultants Joint Venture. (2012) *Soil-Structure Interaction for Building Structures* (No. NIST GCR 12-917-21). Gaithersburg: U.S. Department of Commerce.

Raychowdhury, P. (2008) *Nonlinear Winkler-based Shallow Foundation Model for Performance Assessment of Seismically Loaded Structures*, Thèse de doctorat, University of California, San Diego, United States of America, 325 p.

Robert-Veillette, X. (2013) *Impact du taux d'amortissement visqueux élastique des ponts routiers sur les résultats d'analyses sismiques linéaires et non linéaires*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 114 p.