



**HAL**  
open science

# Modélisation de la variabilité spatiale de l'action sismique pour les ponts en utilisant un domaine de sol réduit en forme de T

Maria Paola Santisi d'Avila, Reine Fares, Stefania Gobbi

► **To cite this version:**

Maria Paola Santisi d'Avila, Reine Fares, Stefania Gobbi. Modélisation de la variabilité spatiale de l'action sismique pour les ponts en utilisant un domaine de sol réduit en forme de T. 11ème Colloque National de l'AFPS, AFPS (Association Française du Génie Parasismique), Nov 2023, Gosier (Guadeloupe), France. pp.338-344. hal-04355470

**HAL Id: hal-04355470**

**<https://hal.science/hal-04355470>**

Submitted on 20 Dec 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Modélisation de la variabilité spatiale de l'action sismique pour les ponts en utilisant un domaine de sol réduit en forme de T

Santisi d'Avila Maria Paola<sup>1</sup>, Fares Reine<sup>2\*</sup>, Gobbi Stefania<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Polytech'Lab, UPR 7498, Université Côte d'Azur, 930, Route des Colles, 06410 Biot, France, maria\_paola.santisi\_d\_avila@univ-cotedazur.fr

<sup>2</sup>Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Études Mécaniques et Thermiques, 91191 Gif-sur-Yvette, France, reine.fares@cea.fr, \* Corresponding author

<sup>3</sup>Géodynamique et Structure, Montrouge, France, stefania.gobbi@geodynamique.com

---

**Résumé.** L'approche 1DT-3C est proposée pour modéliser un pont en tenant compte de la variabilité spatiale du mouvement sismique incident directement dans l'intégration de l'équation de l'équilibre dynamique du système sol-pont, en considérant les effets de site et l'interaction sol-structure. La technique de modélisation proposée assure un gain considérable en temps de modélisation et de calcul, en phase de conception.

**ABSTRACT.** The 1DT-3C approach is proposed for bridge modeling, taking into account the spatial variability of the incident seismic motion directly, in the integration of the dynamic equilibrium equation of the soil-bridge system, considering site effects and soil-structure interaction. The proposed modeling technique ensures a considerable gain in modeling and computation time in the design phase.

**Mots Clés :** interaction sol-structure, conception des ponts, effets de site, propagation d'ondes à trois composantes, méthode par éléments finis.

---

## 1. INTRODUCTION

La variabilité spatiale du mouvement sismique en surface peut modifier de manière significative les forces internes induites dans les ouvrages de longueur importante, comme c'est le cas des ponts [1, 2]. Le déphasage et la perte de cohérence du mouvement sismique dans une longue distance et, en plus, la variation spatiale de la stratigraphie et des propriétés géotechniques qui peuvent être non négligeables, obligent à devoir estimer un mouvement sismique différent sous chaque pilier [3].

Des méthodes simplifiées ont été proposées pour prendre en compte l'interaction sol-structure (ISS) et les effets de site dans la modélisation des ponts, comme des appuis visco-élastiques et des macroéléments [1, 4]. Ces approches, bien qu'efficaces en temps de calcul, nécessitent un effort de calibration et de modélisation beaucoup plus conséquents qu'une modélisation du domaine de sol par éléments finis. Une modélisation en trois dimensions (3D) du domaine de sol réduit considérablement le temps de modélisation, mais augmente le coût computationnel, associé à la taille du domaine et à sa discrétisation spatiale [5, 6].

Fares *et al.* [7] proposent une modélisation du domaine de sol qui soit 3D en surface jusqu'à une certaine profondeur fixée et 1D jusqu'au substratum rocheux. Ce modèle de propagation

unidirectionnelle (1D) des ondes sismiques à trois composantes (3C), dans un domaine de sol en forme de T (1DT-3C) permet de prendre en compte l'ISS et les effets de site avec un coût limité en temps de modélisation et de calcul. Fares *et al.* [7] proposent et appliquent cette technique de modélisation à l'étude de l'interaction sol-bâtiment.

Dans cette étude, la réduction du domaine de sol selon l'approche de modèle de propagation 1DT-3C est proposée pour l'étude de la réponse sismique d'un pont. Ainsi, la variabilité spatiale du mouvement en surface, à la base des piliers du pont, associée à la diversité des profils de sol sous chaque pilier, est obtenue directement dans l'intégration de l'équation de l'équilibre dynamique du système sol-pont.

## 2. MODÈLE DE PROPAGATION 1DT-3C

La technique de modélisation de la propagation 1DT-3C des ondes sismiques prévoit l'assemblage de chaque pilier avec un domaine de sol en forme de T, ayant une stratigraphie indépendante. Le même signal sismique à trois composantes est imposé au niveau de l'interface sol-rocher, aux différents profils de sol, et il se propage jusqu'en surface. La solution de l'équation d'équilibre dynamique du système sol-pont reproduit directement les effets de site et d'ISS. Cette technique de modélisation est efficace pour des ponts ayant un espacement assez plus long de la taille du domaine de sol en T, pour que l'interaction sol-pilier puisse être considérée indépendante pour chaque pilier et pour que l'interaction pilier-pilier puisse être assumée négligeable.

Le domaine de sol en forme de T est défini en 3D jusqu'à une profondeur prédéfinie  $h$  et 1D jusqu'à l'interface sol-rocher (figure 2.1). Dans chaque couche, le sol est homogène et isotrope, avec des propriétés mécaniques constantes avec la profondeur. La discrétisation spatiale du domaine de sol est réalisée par des éléments finis solides à 8 ou à 20 nœuds. La taille des éléments, dans la direction verticale, est déterminée en fonction de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans chaque couche, en fixant la fréquence maximale d'intérêt égale à 15 Hz et le nombre minimal de nœuds par longueur d'onde égale à 10 [7].

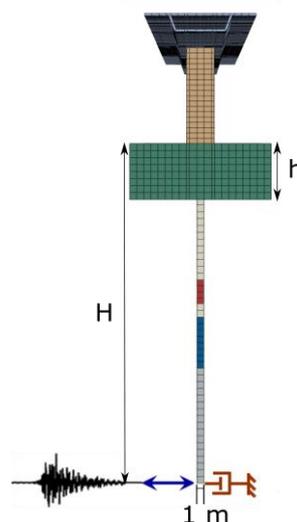


Figure 2.1. Modèle d'interaction sol-pont 1DT. Le domaine de sol 3D a épaisseur  $h$ . Le substratum rocheux est localisé à la profondeur  $H$ .

L'épaisseur du sol 3D est déterminée suite à la comparaison des profils de déformation tangentielle maximale dans les deux cas de surface libre et d'ISS [7, 8]. À la surface inférieure du domaine 3D une condensation des degrés de liberté est appliquée pour imposer l'égalité des déplacements par rapport au sommet du profil 1D. La fondation est rigidement connectée

au sol et, également, le pilier à la fondation.

L'extension du domaine de sol en surface est définie en prenant la plus petite aire  $A$  pour laquelle la fonction de transfert haut du sol-bas du sol présente un pic correspondant à la fréquence de la colonne de sol à surface libre. Le même rapport entre la longueur de la fondation et du domaine de sol devrait être fixé dans les deux directions horizontales.

L'aire  $A$  du domaine de sol est prise en compte dans la partie 1D, plus en profondeur, en multipliant, dans chaque couche de sol, la densité  $\rho$  et le module de Young  $E$  par l'aire  $A$ . Egalement, dans la courbe de premier chargement qui caractérise le comportement non linéaire du sol dans le domaine 1D, les contraintes doivent être multipliées par l'aire  $A$ .

Une condition absorbante est appliquée à l'interface sol-rocher, en utilisant des amortisseurs ayant un coefficient d'amortissement égal à  $A \rho_b v_{sb}$  dans les directions horizontales et égal à  $A \rho_b v_{pb}$  dans la direction verticale [9]. Le rocher, supposé à comportement élastique, est caractérisé par la densité  $\rho_b$  et la vitesse des ondes de cisaillement et de pression  $v_{sb}$  et  $v_{pb}$ , respectivement. La charge sismique est imposée à l'interface sol-rocher en termes de force. L'amplitude est égale à  $A \rho_b v_{sb} 2v_{bx}(t)$ ,  $A \rho_b v_{sb} 2v_{by}(t)$  et  $A \rho_b v_{pb} 2v_{bz}(t)$  dans les directions  $x$ ,  $y$  et  $z$ , respectivement, où  $2v_b(t)$  est la vitesse de l'onde sismique incidente au niveau du rocher affleurant.

Une condition aux limites périodique [10] est imposée aux surfaces latérales du domaine de sol, pour obtenir des déformations horizontales nulles, en accord avec la condition de sol infiniment étendu horizontalement. Les résultats présentés dans ce papier ont été obtenus en utilisant le logiciel par éléments finis Abaqus de Dassault Systèmes (licence GENCI-CINES Grant A0090410632).

### 3. MODÈLE RHÉOLOGIQUE DES SOLS

L'approche de modélisation de la propagation 1DT-3C est indépendante du modèle de comportement du sol qui est adopté. Dans cette recherche, le comportement du sol est simulé en utilisant un modèle élasto-plastique [7, 8] qui satisfait les critères de Masing [11] et ne dépend pas du nombre de cycles de chargement. Le processus de dissipation d'énergie est purement hystérétique et ne dépend pas de la fréquence. Le modèle de plasticité adopté, disponible dans la bibliothèque du logiciel Abaqus, considère un écrouissage combiné cinématique (translation de la surface limite) et isotrope (croissance de la surface limite). Il tient compte de l'effet de fluage cyclique, caractérisé par une accumulation de déformation plastique au cours de chaque cycle de chargement et donc un décalage de la boucle d'hystérésis contrainte-déformation le long de l'axe de déformation. La surface limite en plasticité est celle de Von Mises, appropriée dans des conditions non drainées. La formulation rhéologique est en termes de contraintes totales. La taille de la surface limite est imposée par la courbe de premier chargement dans le cas de contrainte uni-axiale. La même courbe de décroissance du module élastique avec la déformation est utilisée en compression et en cisaillement (normalisée par rapport au module élastique initial), en accord avec l'hypothèse de coefficient de Poisson constant.

La caractéristique principale du modèle de sol adoptée est que les paramètres mécaniques pour la calibration du modèle rhéologique sont facilement obtenus à partir d'essais en laboratoire et in-situ.

Dans cette étude, le comportement élastique du matériau composant la structure est considéré élastique, en accord avec les résultats discutés par Fares [8]. Ces derniers montrent que dans l'analyse d'ISS dynamique d'un bâtiment en béton armé, la prise en compte du comportement

non linéaire du sol est prédominante dans la réponse sismique de la structure, par rapport à l'effet du comportement non linéaire de la structure.

## 4. INTERACTION SOL-PONT

Un pont à poutre en béton armé est modélisé pour illustrer le modèle de propagation des ondes 1DT-3C (figure 4.1a). Toutefois, l'approche proposée est indépendante du type de structure du pont.

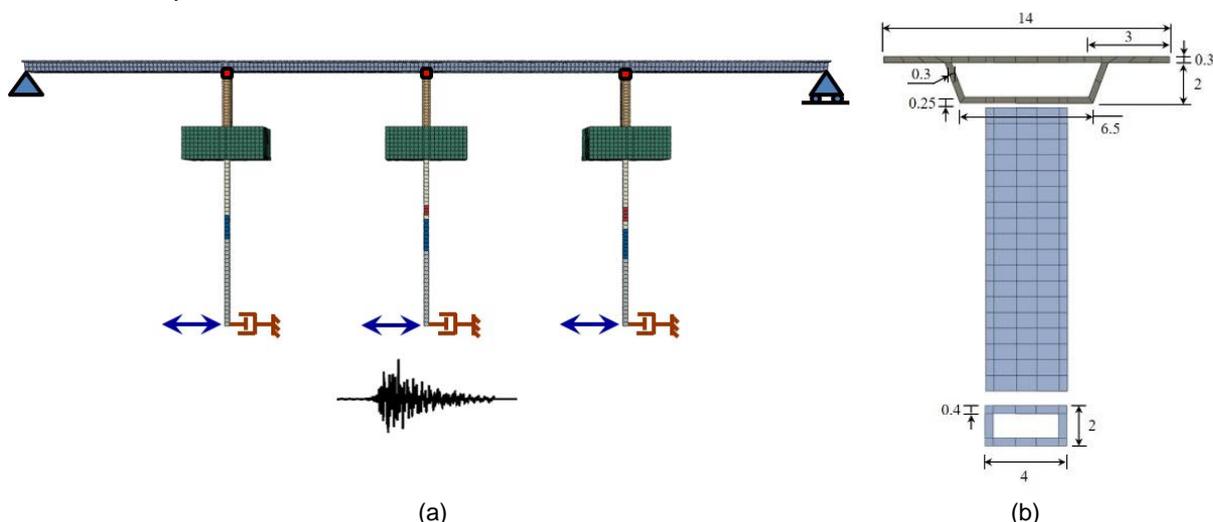


Figure 4.1. (a) Schéma du modèle de propagation des ondes 1DT-3C pour l'analyse dynamique de l'interaction sol-pont ; (b) Section verticale et horizontale du pont à poutre.

### 4.1 Structure du pont

Le pont à poutre est long 200 m, avec quatre travées de 50 m et trois piliers. La structure s'inspire du pont régulier B232 testé par Pinto *et al.* [12], en considérant la même hauteur pour les trois piliers. Les isolateurs connectant le tablier aux piliers sont modélisés par un ressort (raideur horizontale  $K_h = 2.32$  kN/mm et verticale  $K_v = 1424$  kN/mm). Le tablier est en béton armé, large 14 m, et les piliers en béton armé ont une hauteur de 14 m. La section transversale de tablier et piliers est représentée en figure 4.1b. Les propriétés mécaniques du béton et la charge sur le tablier sont détaillées dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3: Propriétés mécaniques du béton et charge sur la travée

Module de Young $E$ (N/mm <sup>2</sup> )		Coefficient de Poisson $\nu$	Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Charge permanente $g$ (kg/m <sup>2</sup> )
Pilier	Travers	Pilier/Travers	Pilier/Travers	Travers
29400	25000	0.2	2500	1100

### 4.2 Profils de sol

La stratigraphie des profils de sol et les propriétés géotechniques sont décrites dans les tableaux 4.1 et 4.2. Le mouvement sismique est imposé à une profondeur de 50 m, pour les trois colonnes de sol. L'aire du domaine de sol dans le plan horizontal est estimée égale à  $A = 20$  m  $\times$  20 m.

Tableau 4.1: Stratigraphies des profils de sol sous chaque pilier

Profil 1		Profil 2		Profil 3	
couche	épaisseur	couche	épaisseur	couche	épaisseur
	(m)		(m)		(m)
AD1	8	AD1	8	AD1	8
AD2	10	AD2	14	AD2	11.5
AD4	5	AD4	6	AD3	2.5
AD5	27	AD5	22	AD2	1
				AD4	8
				AD5	19

Tableau 4.2: Propriétés mécaniques des couches de sol

couche	type de sol	densité	vitesse ondes S	vitesse ondes P	coefficient de Poisson	déformation de référence	angle de frottement
		(kg/m <sup>3</sup> )	(m/s)	(m/s)		(‰)	(°)
AD1	limon sableux/argileux	1902	230	478.8	0.35	0.427	27
AD2	gravier sableux	1960	540	962.0	0.27	0.368	39
AD3	limon argileux	2000	325	608.0	0.30	0.427	27
AD4	argile limoneuse	2000	600	1282.8	0.36	2.431	26
AD5	argile limoneuse profonde	2000	800	1710.5	0.36	-	-
BDR	rocher	2100	1000	2449.5	0.40		

### 4.3 Signaux d'entrées

Le signal sismique synthétique (figure 4.2), proposé par Mavroeidis et Papageorgiou [13], est appliqué à l'interface sol-rocher. La fréquence prédominante du signal  $f = 2.2$  Hz est choisie pour correspondre à la fréquence propre du profil de sol 3 (tableau 4.1). L'accélération maximale, dans la direction longitudinale du pont, est  $a_{max} = 1 \text{ m/s}^2$  pour l'analyse en régime linéaire et  $a_{max} = 3 \text{ m/s}^2$  quand le comportement élasto-plastique du sol est pris en compte. L'accélération maximale est  $0.8a_{max}$  dans la direction transversale du pont et  $0.5a_{max}$  dans la direction verticale.

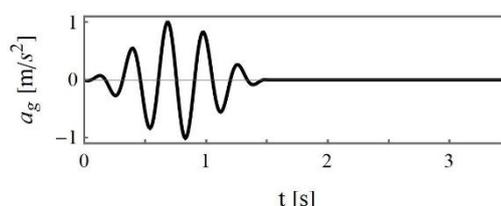


Figure 4.2. Signal synthétique d'accélération normalisé au rocher affleurant ( $a_g$ ) de fréquence  $f = 2.2$  Hz.

## 5. RESULTATS

La figure 5.1 montre l'accélération dans le temps à l'interface avec le substratum rocheux et à la base des piliers, et, également, le déplacement dans le temps au sommet des piliers. À cause de la propagation dans des profils de sol différents, la réponse sismique à la base et au sommet des piliers est différente en amplitude et en phase, soit en régime élastique, qu'en tenant compte du comportement non linéaire du sol.

## 6. CONCLUSIONS

La modélisation de propagation 1DT-3C des ondes sismiques, proposée dans ce travail, est une technique qui permet de simuler la réponse sismique d'un pont en tenant compte de la variabilité spatiale de l'excitation sismique due à l'hétérogénéité des propriétés mécaniques du sol et à l'interaction sol-structure.

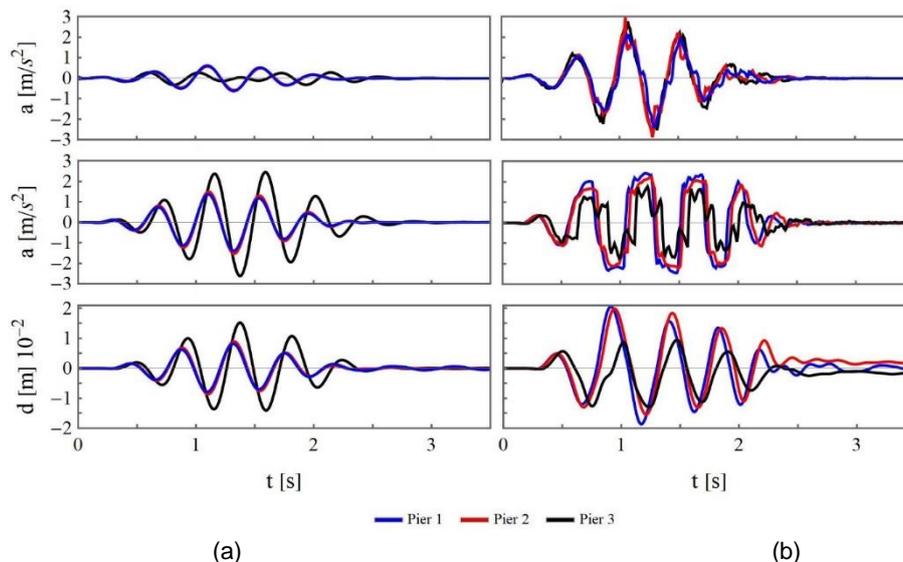


Figure 5.1. Accélération à l'interface sol-rocher (haut) et à la base du pilier (milieu) et déplacement au sommet du pilier (bas), dans la direction de l'axe longitudinal du pont, en régime élastique (a) et pour comportement non linéaire du sol (b), pour une fréquence prédominante du signal d'entrée  $f = 2.2$  Hz.

## 7. REFERENCES

- [1] Sextos AG, Ptilakis KD, Kappos AJ (2003) "Inelastic dynamic analysis of RC bridges accounting for spatial variability of ground motion, site effects and soil–structure interaction phenomena. Part 1: Methodology and analytical tools". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 32-4:607-627 <https://doi.org/10.1002/eqe.241>
- [2] Zerva A (1991) "Effect of spatial variability and propagation of seismic ground motions on the response of multiply supported structures". *Stochastic Structural Dynamics 2: New Practical Applications Second International Conference on Stochastic Structural Dynamics, Florida*, pp 307-336
- [3] CEN (2011) "Eurocode 8: Design provisions of structures for earthquake resistance—Part 2: Bridges". EN 1998-2:2005+A2:2011
- [4] Gorini DN, Callisto L, et Whittle AJ (2020) "An inertial macroelement for bridge abutments". *Géotechnique*, <https://doi.org/10.1680/jgeot.19.P.397>
- [5] Elgamal A, Yan L, Yang Z, Conte JP (2008) "Three-dimensional seismic response of Humboldt Bay bridge-foundation-ground system". *Journal of Structural Engineering* 134-7:1165-1176
- [6] Mazzieri I, Stupazzini M, Guidotti R, et Smerzini C (2013) "SPEED: SPectral Elements in Elastodynamics with Discontinuous Galerkin: A non-conforming approach for 3D multi-scale problems". *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 95-12:991-1010
- [7] Fares R, Santisi d'Avila MP, Deschamps A (2019) "Soil-structure interaction analysis using a 1DT-3C wave propagation model". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 120:200-213 <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.02.011>
- [8] Fares R (2018) "Techniques de modélisation pour la conception des bâtiments parasismiques en tenant compte de l'interaction sol-structure". Thèse, Côte d'Azur, <http://www.theses.fr/2018AZUR4103>
- [9] Lysmer J et Kuhlemeyer RL (1969) "Finite dynamic model for infinite media". *Journal of the Engineering Mechanics Division* 95-4:859-878
- [10] Zienkiewicz OC, Bicanic N, Shen FQ (1989) "Earthquake input definition and the transmitting boundary conditions". *Advances in Computational Nonlinear Mechanics* 109-138 [http://doi.org/10.1007/978-3-7091-2828-2\\_3](http://doi.org/10.1007/978-3-7091-2828-2_3)
- [11] Kramer SL (1996) "Geotechnical earthquake engineering". Pearson Education India
- [12] Pinto AV, Verzeletti G, Pegon P, Magonette G, Negro P, Guedes J (1996) "Pseudo-dynamic testing of large-scale R/C bridges" Report EUR 16378
- [13] Mavroeidis GP et Papageorgiou AS (2002) "Near-source strong ground motion: characteristics and design issues". *The 17th US National Conference on Earthquake Engineering (7NCEE)*, Boston 21 pp 25