

NNT : 2017SACL061



POLITECNICO MILANO 1863

THÈSE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY
ET DU POLITECNICO DI MILANO
PRÉPARÉE À CENTRALESUPÉLEC

Ecole doctorale n°ED579

Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences

Scuola di Dottorato di Ricerca

Spécialité de doctorat : Génie Civil

Structural, Seismic and Geotechnical Engineering

par

M. FILIPPO GATTI

Analyse physics-based de scénarios sismiques «de la faille au site»: prédiction de mouvement sismique fort pour l'étude de vulnérabilité sismique de structures critiques.

Thèse présentée et soutenue à Paris, le 25 Septembre 2017.

Composition du Jury :

M.	RAUL MADARIAGA	Professeur émérite Ecole Normale Supérieure	(Président du jury)
M.	ETIENNE BERTRAND	Directeur de Recherche CEREMA, Seismic risk team	(Rapporteur)
M.	HIROSHI KAWASE	Professeur Kyoto University	(Rapporteur)
Mme	EVELYNE FOERSTER	Ingénieur de Recherche Commissariat à l'Energie Atomique (CEA)	(Examinatrice)
M.	KYRIAZIS PITILAKIS	Professeur Aristotle University Thessaloniki (AUTH)	(Examinateur)
M.	FERNANDO LOPEZ-CABALLERO	Maître de Conférence/LRU CentraleSupélec	(Co-directeur de thèse)
M.	ROBERTO PAOLUCCI	Professeur Aristotle University Thessaloniki (AUTH)	(Directeur de thèse)
M.	DIDIER CLOUTEAU	Professeur CentraleSupélec	(Directeur de thèse)

Titre : Analyse physics-based de scénarios sismiques «de la faille au site»: prédiction de mouvement sismique fort pour l'étude de vulnérabilité sismique de structures critiques.

Mots clés : seismologie, génie parasismique numérique, mouvements sismiques forts, modélisation physics-based, vulnérabilité sismique, quantification d'incertitude

Résumé : L'ambition de ce travail est la prédiction du champ d'onde incident réaliste, induit par des mouvements forts de sol, aux sites d'importance stratégique, comme des centrales nucléaires. À cette fin, un laboratoire virtuel efficace et multi-outil est développé et exploité pour simuler les aspects différents d'un phénomène complexe comme un tremblement de terre: le mécanisme de source, la propagation dans la croûte terrestre, l'interaction avec les interfaces géologiques et l'effet des couches de sol hétérogènes et non-linéaires. La plate-forme numérique aide non seulement à l'approfondissement de l'aperçu et la compréhension du tremblement de terre lui-même, mais permet aussi la quantification d'incertitude de bases de données sismiques, des outils de prédiction traditionnels, des procédures de conception et des paramètres cruciaux définissant le scénario sismique de mouvement fort. Ce cadre computationnel multi-échelle fait face à la nature diversifiée d'un tremblement de terre par approche *holistique* local-régionale: la réponse de site localement observée est premièrement caractérisée dans les détails pour la commuter à réponse-cible pour une analyse à plus grande échelle. L'outil principal est représenté par un logiciel très performant pour résoudre le problème d'équation d'onde basé sur la Méthode des Éléments Spectrales. Ce code, appelé SEM3D, est conçu pour tourner efficacement sur des architectures parallèles multi-core. SEM3D est intégré par un générateur parallèle de champs aléatoires à grande échelle pour représenter l'hétérogénéité des propriétés de sol, avec un solveur non-linéaire efficace pour simuler le comportement hystérique de sols. Un cas d'étude complexe est choisie

à cette fin: le tremblement de terre $M_W 6.6$ Niigata-Ken Chūetsu-Oki, qui a endommagé la centrale nucléaire de Kashiwazaki-Kariwa. Les effets de site non-linéaires observés, la nature impulsive des signaux et l'incohérence spatiale du mouvement de sol enregistré sont à premier examens et caractérisés. Dans la suite, le modèle physics-based 3D «de la faille au site» est construit et employé pour prédire le mouvement sismique dans une bande de fréquence de 0-7 Hz. L'effet de la structure géologique pliée au-dessous du site est quantifié en simulant deux chocs d'intensité modérée et en évaluant la variabilité spatiale des spectres de réponse aux différents endroits dans le site nucléaire. Le résultat numérique souligne le besoin d'inclure la structure géologique syncline-anticline dans le modèle, pour obtenir une réponse de site amplifiée par rapport à l'hypothèse classique d'un demi-espace par couches parallèles. De plus, l'analyse comparative reproduit l'incohérence remarquable des signaux observés dans les enregistrements, mettant en évidence le besoin d'une description plus détaillée et spécifique à site du champ d'onde incident utilisé comme paramètre d'entrée dans la conception structurel antisismique de réacteurs nucléaires et des installations. Dans un deuxième temps, l'effet de rupture de la faille est testé et calé. Finalement, la bande de fréquences des signaux synthétiques obtenues comme résultat des simulations numériques est agrandie en exploitant la prédiction stochastique des ordonnées spectrales à courte période fournies par des Réseaux Artificiels de Neurones. Les synthétiques sont spectral-matched sur ces simulations.

Title : Forward physics-based analysis of "source-to-site" seismic scenarios for strong ground motion prediction and seismic vulnerability assessment of critical structures

Keywords : engineering seismology, computational earthquake engineering, strong ground motion earthquake, physics-based modelling, seismic vulnerability, uncertainty quantification

Abstract : The ambition of this work is the prediction of a synthetic yet realistic broad-band incident wave-field, induced by strong ground motion earthquakes at sites of strategic importance, such as nuclear power plants. To this end, an effective multi-tool virtual laboratory is developed and exploited to simulate the different aspects of the complex phenomenon an earthquake embodies: the source mechanism, the wave propagation path through the Earth's crust, the interaction with the shallow geological interfaces and the effect of the non-linear heterogeneous softer soil deposits. The platform not only helps in deepening the insight and the understanding of the earthquake itself, but also permits the uncertainty quantification of seismic databases, traditional predictive tools, design procedures and crucial parameters defining strong ground shaking scenarios. This multi-scale computational framework copes with the manifold nature of an earthquake by a *holistic* local-to-regional approach: the locally observed site-response is at first characterized in details to switch to target response for a larger-scale analysis, in a second instance. The core tool is represented by a high-performance software to solve the wave-equation problem based upon the Spectral Element Method. This code, called SEM3D, is tailored to effectively scale on multi-core parallel architectures. SEM3D is featured by a large-scale random-field parallel generator to represent the heterogeneity of the soil properties, along with an effective non-linear solver to simulate the hysteretic soil behaviour. A complex case study is chosen to this end: is the M_W 6.6 Niigata-

Ken Chūetsu-Oki earthquake, which damaged the Kashiwazaki-Kariwa nuclear power plant. The observed non-linear site-effects, the pulse-like wave-motion and the spatial incoherence of the recorded ground motion are at first investigated and characterized. In the following, the 3D source-to-site physics-based model is constructed and employed to provide reliable input ground motion, for a frequency band of 0-7 Hz. The effect of the folded geological structure underneath the site is quantified by simulating two aftershocks of moderate intensity and by estimating the spatial variability of the response spectra at different locations within the nuclear site. The numerical outcome stresses the need to include the syncline-anticline geological structure within the model, so to picture the amplified site-response in contrast with the classical assumption of a layered half-space. Moreover, the comparative analysis reproduces the remarkable incoherence of the ground motion time-histories observed in the recordings, highlighting the need for a more detailed and site-specific description of the incident wave-field used as input parameter in the antiseismic structural design of nuclear reactors and facilities. In a second time, the effect of extended fault rupture is tested and tuned. Finally, the frequency band of the time-histories obtained as outcome of the numerical simulations is enlarged by exploiting the stochastic prediction of short-period response ordinates provided by Artificial Neural Networks. The synthetics are spectral-scaled upon those provisions.

