

Modélisation des effets de site multidimensionnels par le calcul haute-performance avec code_aster

N. Tardieu¹, V. Alves Fernandes², G. Devésa³,

¹ Electricité de France/R&D, IMSIA UMR EDF-CNRS-CEA-ENSTA 9219, nicolas.tardieu@edf.fr

² Electricité de France/R&D, IMSIA UMR EDF-CNRS-CEA-ENSTA 9219, Institut SEISM, <http://www.institut-seism.fr>
vinicius.alves-fernandes@edf.fr

³ Electricité de France/R&D, Institut SEISM, <http://www.institut-seism.fr/>
georges-cc.devesa@edf.fr

Résumé — Les effets de site influencent la propagation des ondes sismiques du substratum rocheux vers la surface, engendrant une modification de l'amplitude et de la durée du signal sismique. Des développements récents sur l'architecture de code_aster permettent de démontrer sa capacité à l'utilisation de la méthode des éléments finis pour l'estimation des effets de site multidimensionnels pour des études industrielles.

Mots clefs — effets de site, calcul haute performance, code_aster.

1 Contexte

On appelle effet de site toute modification du signal sismique (amplitude, durée) provoquée par une modification des propriétés mécaniques des matériaux du substratum rocheux vers la surface, des hétérogénéités du sol et des variations géométriques des interfaces et de la surface libre. Lors des séismes, l'impact des sites sur les signaux sismiques en surface est observé en comparant des signaux enregistrés à différents emplacements d'un bassin sédimentaire à des enregistrements au rocher affleurant.

Dans le cadre des actions post-Fukushima et afin de répondre à la demande de l'ASN d'évaluation de l'impact des effets de site multidimensionnels, EDF coordonne des actions de développement de méthodologies de prise en compte des effets de site et de validation des simulations numérique pour leur estimation. Ces actions s'inscrivent également dans la préparation de l'utilisation du signal sismique au rocher affleurant [1] [2], avec étape de propagation du rocher vers le champ libre à l'échelle caractéristique du site. La tendance générale de la communauté d'expertise sismique en France et à l'étranger est d'aller vers des modélisations « site-spécifique », conformément aux résultats projet SIGMA [3]. Le but de cette démarche est de réduire les incertitudes issues de l'étape de définition du mouvement sismique en vue de définir le signal à l'entrée de l'analyse d'interaction sol-structure des bâtiments.

2 Etat de l'art des outils de modélisation des effets de site

De nombreux laboratoires en France utilisent et développent des outils de simulation en élastodynamique par éléments spectraux (SPECFEM [4],[5], SEM3D [6],[7], EFISPEC [8]) pour la détermination du mouvement sismique. Ces outils permettent dans différentes mesures la prise en compte d'une échelle spatiale pluri-décakilométrique, avec les contributions topographiques, lithologiques, bathymétriques, des effets de directivité du signal sismique via modélisation de la source. Dans le cadre du projet ANR PIA SINAPS@ [1], l'outil SEM3D a été utilisé pour la modélisation de la réponse sismique de l'unité 7 de la centrale nucléaire de Kashiwazaki-Kariwa au Japon lors du séisme de Niigata Chuetsu-Oki en 2007 [7]. Des approches basées sur des modélisations en éléments de frontières accélérés par multipôle rapide (FM-BEM) développés au laboratoire

POEMS ont également déjà été déclinées pour l'étude des effets de site multidimensionnels en viscoélasticité [9] [10].

A l'étranger, plusieurs techniques de modélisation des effets de site sont employées. L'équipe de l'Université de Bratislava développe et utilise un code en différences finies pour la modélisation de la réponse de site multidimensionnel. Le code différences finies SW4 développé par le Lawrence Berkeley National Laboratory Energy Research Scientific Computing Center (NERSC) est utilisé pour un couplage entre les échelles régionale et de la structure via la méthode DRM (Domain Reduction Method [11]) pour l'étude de la réponse sismique des installations nucléaires [12]. Les méthodes de différences finies offrent l'avantage de la simplicité de développement et de l'efficacité numérique, mais engendrent une dispersion numérique des ondes préjudiciable à la qualité de la prédiction, et un coût élevé en termes de mémoire informatique [13].

En Italie, le code Eléments Spectraux SPEED développé à l'Université de Milano [14] est utilisé pour des simulations à l'échelle régionale pour des études PSHA. Au Japon, la méthode Eléments Finis est employée par l'Université de Tokyo pour la simulation numérique du mouvement sismique à l'échelle d'une ville, en modélisant à la fois la géologie et les ouvrages de génie civil [15]. En Californie, le logiciel CyberShake développé par le Southern California Earthquake Center est utilisé pour l'établissement des cartes de PSHA à partir d'une méthodologie de simulation numérique basée sur des fonctions de Green [16].

3 Approche actuelle avec code_aster

3.1 Méthodologie de modélisation

La méthodologie fondée sur la méthode des éléments finis, notée FEM dans la suite, via code_aster choisie par EDF pour les études d'effet de site présente une grande flexibilité de modélisation (facilité de maillage, prise en compte de non linéarités, variabilité des propriétés mécaniques). Elle permet la prise en compte du chargement sismique comme une onde plane à incidence verticale définie au rocher affleurant ainsi que des compléments de force aux nœuds imposés aux frontières latérales du domaine dans les directions transverses à la propagation. Ces compléments de force sous forme d'évolutions temporelles contiennent deux contributions issues des solutions provenant d'un modèle auxiliaire (1D pour un modèle 2D, 2D pour un modèle 3D) (Figure 1). La première contribution est issue de la projection de la solution du mouvement imposé sur les faces d'éléments latéraux de type paraxial, qui sont en capacité d'absorber des ondes à incidence proche de la normale à la frontière du domaine ; la seconde provient des évolutions temporelles de forces de réaction transmises par le modèle auxiliaire aux frontières latérales du domaine.

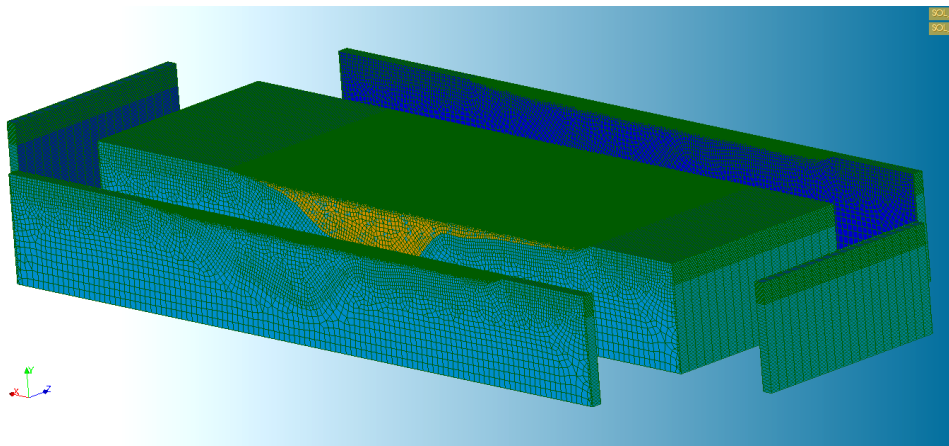


Figure 1 - Vision schématique des modèles auxiliaires pour l'obtention des conditions aux limites

3.2 Outil de simulation

Le principal verrou de l'approche FEM pour les études d'effet de site est le traitement des systèmes de très grande taille pour la propagation d'onde sur des domaines de l'ordre kilométrique. On vise des simulations impliquant de l'ordre de quelques centaines de millions de degrés de liberté avec un transitoire de plusieurs milliers de pas de temps. Pour lever ce verrou, l'architecture parallèle de code_aster a été revue en profondeur pour produire un logiciel appelé asterxx. Il est fondé sur la définition d'objets C++ pouvant être distribués sur différents processus. La Figure 2 illustre la manière dont les structures de données Fortran sont encapsulées dans le C++.

Dans code_aster, chaque processus lit l'intégralité du maillage et a la connaissance de l'intégralité de tous les objets. Seuls les traitements de calcul élémentaire, d'assemblage et de résolution sont parallélisés. Cette approche n'est donc pas scalable en temps et en espace. Dans asterxx, le domaine d'étude est préalablement découpé en sous-domaines et chaque processus ne lit et n'a la connaissance que d'une petite partie du domaine. La cohérence entre les données est traditionnellement assurée par des communications MPI entre les processus.

Pour la résolution, nous n'avons pas retenu d'approche de décomposition de domaines à proprement parler. Le maillage est découpé selon ses éléments et non ses nœuds. Cela autorise l'assemblage d'une matrice distribuée conceptuellement identique à la matrice séquentielle et dont la résolution parallèle est assurée par une méthode directe telle que MUMPS [17] ou itérative telle que celles fournies par PETSc [18].

3.3 Gains en performance

Deux exemples permettent d'illustrer les gains en performance attendus pour des problèmes en dynamique linéaire avec cette nouvelle architecture. Il s'agit pour le premier d'un cas académique de la propagation d'onde plane à incidence verticale sur un domaine rectangulaire, et pour le deuxième un cas représentatif d'un domaine géologique, comme la Figure 1.

Les performances obtenues sont satisfaisantes : pour le premier cas, 2000 pas de temps pour le calcul sur un maillage comportant environ 185Mdds et 1080 processeurs s'effectue en 3h (4,5 s par pas de temps de résolution). Pour le deuxième, à ressource informatique équivalente et comportant environ 118 Mdds, une étude type sur un signal avec 2000 pas de temps dure environ 6h. La perte de performance provient de la connectivité du maillage, car pour le deuxième cas une géométrie géologique complexe y est intégrée.

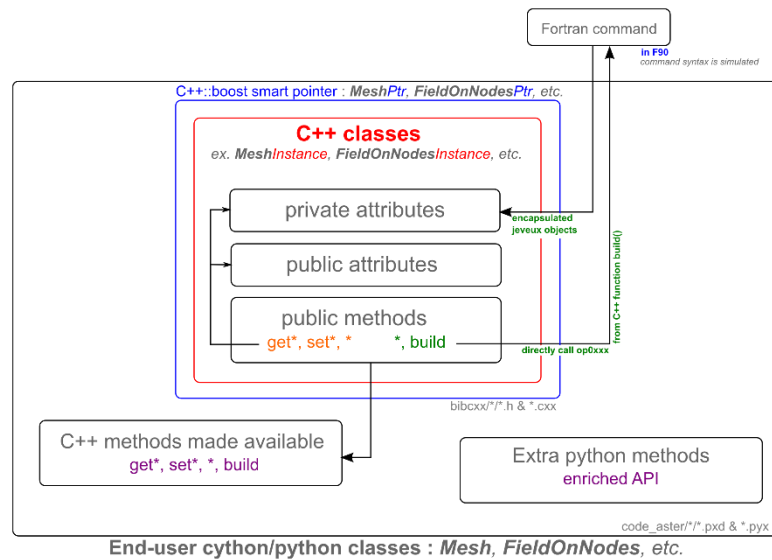


Figure 2 - illustration de l'encapsulation des objets d'asterxx

4 Conclusions et perspectives

De nombreuses méthodes et outils de modélisation de propagation d'onde dans des milieux géologiques existent et permettent, à différents niveaux de finesse et de performance, de réaliser des études de l'impact des effets de site sur les niveaux sismiques en surface. Grâce à des développements récents dans l'architecture de code_aster, il est possible aujourd'hui de réaliser des simulations numériques sur des domaines comportant plusieurs centaines de millions de degrés de liberté. Cela permet de rendre opérationnel l'usage de code_aster pour l'estimation des effets de site sur des domaines de l'ordre kilométrique, à des niveaux de fréquence pertinents pour le domaine sismique.

Plusieurs optimisations sont encore possibles afin d'améliorer les performances numériques de l'étude, comme l'optimisation du maillage selon le profil de vitesse d'onde du domaine modélisé ou le passage à une approche fréquentielle (moins coûteuse en termes de nombre de pas de calcul indépendants). Ces optimisations permettront d'envisager à moyen terme la prise en compte des incertitudes pour ce type de modélisation.

Références

- [1] Bilan du projet PIA ANR « SINAPS@ » 2013-2018 : Synthesis of Lessons, Recommendations and further Research Needs resulting from SINAPS@ project, 2018.
- [2] Toward an integrated seismic risk assessment for nuclear safety improving current French methodologies through the SINAPS@ research project. Nuclear Engineering and Design, 323, pp. 185–201, 2017.
- [3] Bilan du projet SIGMA. G.SENFAUTE. Note EDF D309516007105, 10/08/2016.
- [4] Maday, Y. and Patera, A.T. Spectral element methods for the incompressible navier-stokes equations. State of the art survey in computational mechanics, pages 71–143, 1989. Maday, Y. Meiron, D., Patera, A.T., Ronquist, E. Analysis of iterative methods for the steady and unsteady Stokes problem: application to

- spectral element discretizations. *SIAM J. Sci. Comput.* 14, 2 (1993), 310–337.
- [5] Komatitsch, D. and Vilotte, J.-P. The spectral element method: an efficient tool to simulate the seismic response of 2D and 3D geological structures. *Bull. Seis. Soc. Am.* 88, 2 (1998), 368–92.
- [6] Projet SINAPS@. Actes de la plénière 2017 : https://www.institut-seism.fr/wp-content/uploads/2017/11/ProceedingsSINAPS_2017_V2.pdf. Gatti, F. et al.: Source-to-site earthquake ground motion scenario: a history in the making applicative test case; 3D spectral element modeling of near source effects including kinematic rupture and finite-fault effects.
- [7] Gatti, F., Touhami, S., Lopez-Caballero, F., Paolucci, R., Clouteau, D., Alves Fernandes, V., Kham, M., Voltaire, F. Broad-band 3-D earthquake simulation at nuclear site by an all-embracing source-to-structure approach *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115:263-280, 2018.
- [8] De Martin F., Verification of a spectral-element method code for the Southern California Earthquake Center LOH.3 viscoelastic case, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 101:6 2855-2865, 2011.
- [9] Meza-Fajardo, K., Semblat, J.-F., Chaillat, S., Lenti, L. Seismic Wave Amplification in 3D Alluvial Basins: Fast Multipole accelerated BEM based simulations and aggravation factors, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 106 (3), 1267-1281, 2016.
- [10] Adnani, Z., Chaillat, S., Bonnet, M., Nieto-Ferro, A., Greffet, N. Calcul des opérateurs d'impédance en interaction sol-structure : méthode éléments de frontière accélérée par méthode multipôle rapide. CSMA 2017.
- [11] Bielak, J. Loukakis, K., Hisada, Y., Yoshimura, C. (2003) Domain Reduction Method for Three-Dimensional Earthquake Modeling in Localized Regions, Part I: Theory. *BSSA* 93(2): 817-824.
- [12] Abell Mena J A, Orbović N, McCallen D B, Jeremic B. Earthquake soil-structure interaction of nuclear power plants, differences in response to 3-D, 3 × 1-D, and 1-D excitations. *Earthquake Engng Struct Dyn.* 2018;1–18.
- [13] Faccioli, E., Paolucci, R., Vanini, M., 1998. *3D Site Effects and Soil-Foundation Interaction in Earthquake and Vibration Risk Evaluation*. <http://www.crs4.it/projectdetails/TRISEE/>.
- [14] Paolucci R., Mazzieri I., Smerzini C., Stupazzini M. (2014) *Physics-Based Earthquake Ground Shaking Scenarios in Large Urban Areas*. In: Ansal A. (eds) *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology*. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, vol 34. Springer, Cham.
- [15] Hori M., Ichimura T., Fujita K. (2016) *Simulation of Seismic Wave Propagation and Amplification*. In: Yoshimura S., Hori M., Ohsaki M. (eds) *High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake/Tsunami Engineering*. Springer Tracts in Mechanical Engineering. Springer, Cham.
- [16] Graves, R., Jordan, T. H., Callaghan, S., Deelman, E., Field, E. H., Juve, G., Kesselman, C., Maechling, P., Mehta, G., Okaya, D., Small, P., Vahi, K. (2010), *CyberShake: A Physics-Based Seismic Hazard Model for Southern California*, *Pure and Applied Geophysics*.
- [17] P. R. Amestoy and A. Guermouche and J.-Y. L'Excellent and S. Pralet, Hybrid scheduling for the parallel solution of linear systems , *Parallel Computing*, 32(2), pp.136-156, 2006
- [18] Satish Balay and Shrirang Abhyankar and Mark~F. Adams and Jed Brown and Peter Brune and Kris Buschelman and Lisandro Dalcin and Alp Dener and Victor Eijkhout and William~D. Gropp and Dinesh

Kaushik and Matthew~G. Knepley and Dave~A. May and Lois Curfman McInnes and Richard Tran Mills and Todd Munson and Karl Rupp and Patrick Sanan and Barry~F. Smith and Stefano Zampini and Hong Zhang and Hong Zhang, PETSc Users Manual, <http://www.mcs.anl.gov/petsc>, 2018