

## Le benchmark KARISMA revisité : enrichissements de la modélisation en interaction sol-structure sous séisme

G. Devésa<sup>1</sup>, N. Greffet<sup>1</sup>, A. Nieto Ferro<sup>1</sup>, D. Clouteau<sup>2</sup>

<sup>1</sup> EDF R&D, IMSIA UMR EDF-ENSTA-CNRS-CEA 9219, {georges-cc.devesa,nicolas.greffet,alex.nieto-ferro}@edf.fr

<sup>2</sup> LMSSMat, Ecole Centrale Supélec, France, didier.clouteau@ecp.fr

---

**Résumé** — Le benchmark KARISMA visait à confronter les méthodes de calcul sismique sur un bâtiment de la centrale de Kashiwazaki-Kariwa, en se comparant aux mesures obtenues lors du séisme Niigata Chuetsu-Oki (2007). Aucune équipe n'avait pu retrouver assez précisément les résultats mesurés. Sur ce constat, la R&D d'EDF avait décidé de poursuivre les analyses dans le cadre du projet SINAPS@, en particulier en introduisant différentes non-linéarités afin de mesurer leur influence et de confronter les méthodologies numériques récentes à un cas industriel avec des résultats mesurés sur site. **Mots clefs** — Interaction sol-structure, ISS, séisme, non-linéarités, contact, frottement, éléments finis, éléments de frontières, méthode Laplace-temps, frontières absorbantes, benchmark KARISMA, ISSS.

---

### 1. Contexte

Le Séisme Niigata Chuetsu-Oki (SNCO) a touché la région de Niigata au Japon le 16 Juillet 2007 au niveau de la côte Ouest de l'île d'Honshu, atteignant une magnitude de 6.8. La nature du sol, mou et sableux, a provoqué glissements de terrains, liquéfaction des sols et décollements de fondations. Les constructions traditionnelles en bois ont été endommagées sévèrement. Les constructions récentes, composées de murs de contreventement ont bien mieux résisté malgré les fortes accélérations subies.

La Centrale Nucléaire de Kashiwazaki-Kariwa (CNKK), située à une quinzaine de kilomètres de la faille, a été touchée. A cause de son importance stratégique, l'ensemble du site était surveillé par de très nombreux capteurs et accéléromètres qui ont enregistré des niveaux sismiques deux fois plus importants que le séisme de conception. Le PGA (Peak Ground Acceleration) dans les zones rocheuses a dépassé les 0,5 g. Aucun endommagement structurel majeur n'a été constaté. Etant donné le nombre important de données et d'observations collectées, le benchmark international KARISMA (KASHIWAZAKI-KARIWA RESEARCH INITIATIVE FOR SEISMIC MARGIN ASSESSMENT) a été organisé en 2009-2010, à l'initiative de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) [1], [2].

L'Agence Nationale pour la Recherche française (ANR) a alors publié un appel à projets dans ces domaines et, dans ce cadre, les membres de l'Institut SEISM ont construit le projet SINAPS@ (Earthquake and Nuclear Installations: Ensuring and Sustaining Safety). Le volet 4 de ce projet est la mise en application de méthodes de calculs « best-estimate » sur un cas industriel concret : KARISMA.

### 2. Objectif

Le bilan du benchmark KARISMA [2] a montré que tous les calculs présentaient des écarts sensibles avec les résultats mesurés lors du séisme. Afin d'affiner la méthodologie de simulation numérique, il a été décidé d'enrichir la modélisation en étudiant l'influence de phénomènes jusqu'alors négligés : les fortes non-linéarités constatées dans le sol, le contact-frottement à l'interface sol-bâtiment et la proximité d'autres bâtiments au travers de l'interaction structure-sol-structure.

### 3. Modélisation numérique

Afin de modéliser le bâtiment et son couplage avec le sol (interaction sol-structure) dans le cadre sismique, on peut adopter différentes stratégies spécifiques. Dans tous les cas, le bâtiment est discrétisé en éléments finis. Le domaine de sol peut, lui, être aussi discrétisé en EF, ce qu'on qualifie d'approche « full-FEM » ou par une méthode intégrale, sous le nom de couplage FEM-BEM (Boundary Elements Method) fréquentiel en linéaire et Laplace-temps en non-linéaire [3], [4]. Les modélisations EF sont faites avec *Code\_Aster* [5] et le code BEM associé est MISS3D [6]. Ce dernier n'acceptant que les comportements linéaires (avec amortissement), toutes les non-linéarités sont rejetées dans la partie EF.

Dans le cadre full-FEM, la condition de radiation des ondes dans le sol est modélisée par des éléments absorbants de type paraxiaux [7].

#### 3.1. Bâtiment

Tout comme le benchmark KARISMA, ce travail se concentre sur l'étude du bâtiment réacteur de l'Unité 7. Il mesure environ 63 m de hauteur, dont plus du tiers (26 m) est enterré. Les dimensions de la base sont de 56,7 x 59,3 m. Ce bâtiment comporte neuf niveaux et a une masse totale de 200 000 tonnes.

Le modèle EF complet compte environ 92 000 DDL et se compose d'éléments de type poutres (Timoshenko et Euler-Bernoulli), plaques (DKT) et discrets (masses et raideurs). Les internes nucléaires sont représentés par un modèle brochette équivalent.

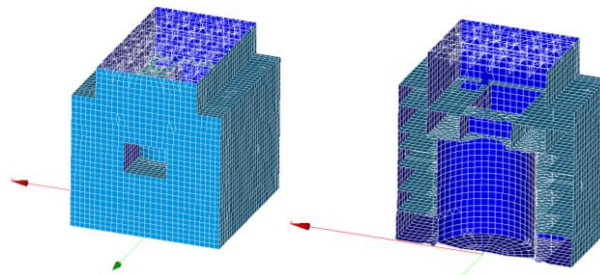


Figure 1 – Maillage du bâtiment

Le comportement du bâtiment est considéré élastique linéaire, car les analyses menées *a posteriori* ont montré que le bâtiment ne s'était pas endommagé lors du séisme. Pour prendre en compte les renforts d'acier présents dans le béton armé, la densité du béton est considérée supérieure à la théorie.

#### 3.2. Domaine de sol

Dans le cas d'ISS non-linéaire, une partie du sol doit être maillée pour y introduire des propriétés non-linéaires de sol. Conformément au cadre de la méthode Laplace-temps [3], cette non-linéarité sera confinée dans un domaine borné, situé au voisinage du bâtiment :

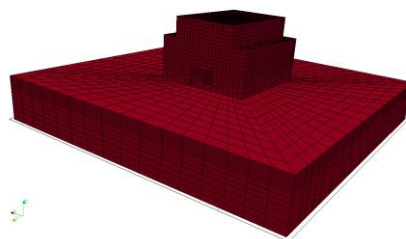


Figure 2 – Maillage du domaine de sol et du bâtiment

### 3.3. Détermination du comportement du sol et des signaux par la méthode linéaire équivalent

Pour obtenir le signal champ libre et le profil de sol dégradé représentatif de l'Unité 7, la méthodologie proposée est la suivante :

- étape 1 : le signal champ libre 5-G1 a été enregistré près du Borehole 5. 5G-1 est déconvolué sur le Borehole 5 et recalé par rapport aux niveaux d'accélération enregistrés en profondeurs. Pour rappel, seuls les PGA ont été enregistrés lors du séisme principal ;
- étape 2 : le signal au bedrock obtenu est reconvoqué au niveau de l'unité 7.

Chacune de ces étapes repose sur une colonne de sol qui permet aussi de recalculer les propriétés élastiques dégradées, couche par couche de sol, en fonction du signal sismique considéré.

Le schéma en Figure 3 explicite la démarche entreprise :

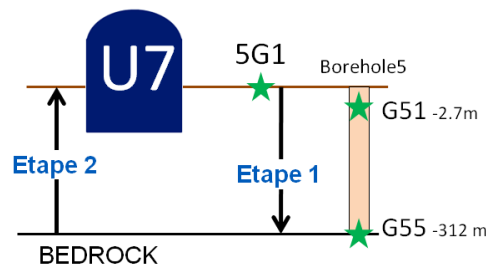


Figure 3 – Méthodologie d'obtention des signaux et du profil de sol dégradé sous l'Unité 7

### 3.4. Cas linéaire

On commence par calculer la réponse linéaire (le comportement du sol est alors de type linéaire équivalent dégradé, avec les valeurs obtenues grâce au processus de déconvolution-reconvolution précédent).

La méthode de résolution la plus efficace est le couplage fréquentiel Aster-MISS3D qui se base sur une méthode de type sous-structuration avec projection sur une base de Ritz. Cette base comporte les modes dynamiques du bâtiment en base encastree et des modes traduisant la cinématique de l'interface FEM-BEM. Pour un radier rigide, les modes d'interface seront les six modes de corps rigide, pour un radier souple, il faut prendre en compte tous les modes statiques, donc autant de modes qu'il y a de DDL à l'interface. Une nouvelle méthode de réduction de cette base de modes statiques a été mise au point et testée. Cette méthode purement algébrique se décompose ainsi :

- projection des matrices de masse et de raideur sur la base des modes statiques d'interface,
- calcul des modes associés,
- reprojexion de ces modes sur base physique.

Ci-dessous sont comparés les résultats obtenus (courbe noire) aux données mesurées (courbe rouge) et aux autres résultats du benchmark.

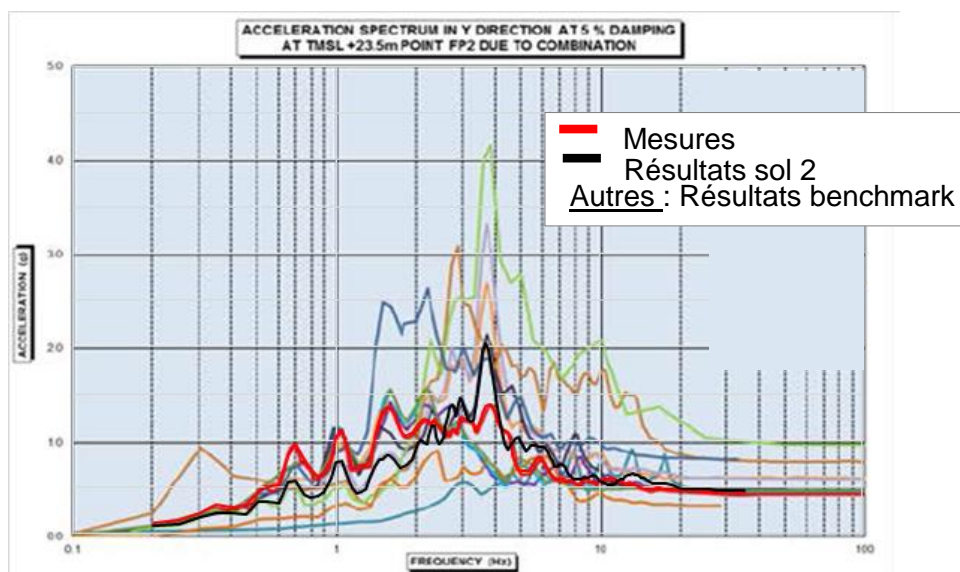


Figure 4 – Spectres de réponse d’oscillateur suivant Y, au point R1 du 3<sup>e</sup> plancher

Les résultats obtenus avec le sol recalé sont dans la bonne moyenne des résultats des autres participants au benchmark. Des écarts avec les résultats mesurés sur site demeurent (sous-évaluation des niveaux sous 3 à 4 Hz et surévaluation au-dessus), ce qui justifie la nécessité de poursuivre le travail d’amélioration du modèle.

### 3.5. Cas non-linéaires

#### 3.5.1. Sol non-linéaire

La première étape a été la validation de la taille du domaine de sol non-linéaire (comportement de type Hujieux [8]) qui doit être maillé en éléments finis. Ce modèle de comportement permet de modéliser le comportement des sols dans une large gamme de chemins de contraintes. Il est basé sur le concept de contraintes effectives de Terzaghi et considère un critère de rupture de type Coulomb. Le modèle utilise la notion d’état critique pour définir l’état ultime du matériau. Plus d’informations sur l’écriture du modèle sont données dans la documentation associée [8].

Une calibration pour deux types de matériaux : sable et argile, a été menée.

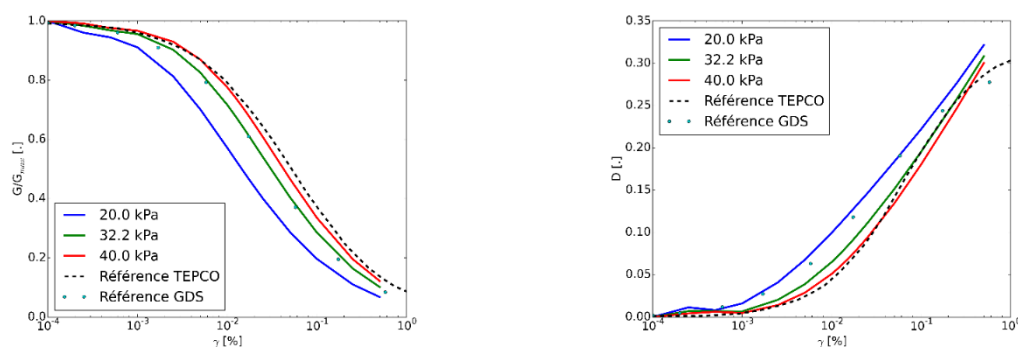


Figure 5 – Calibration des courbes de dégradation du module de cisaillement et d’amortissement pour la couche de sable comprise entre +8.0 et +10.0 T.M.S.L., pour trois valeurs de pression de confinement

Le graphe suivant permet de comparer les solutions linéaires et non-linéaires, au centre du radier (à gauche) et sommet du bâtiment (à droite, on a choisi ce point différent du point R1 car il est plus discriminant) :

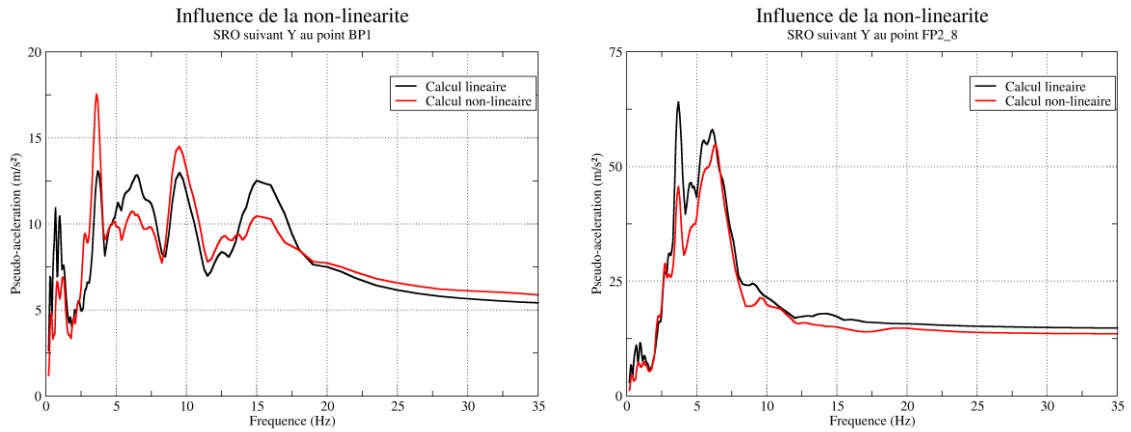


Figure 6 – SRO suivant Y au centre du radier (à gauche) et au sommet du bâtiment (à droite)

Le bâtiment étant suffisamment enfoncé pour reposer sur une couche de sol de bonne qualité, les non-linéarités sont cantonnées aux couches supérieures de sol, le long des faces latérales du bâtiment et leurs effets sur la réponse globale du bâtiment sont donc modérés. Plus précisément, une approche de type linéaire équivalente recalée permet d’obtenir une solution de bonne qualité et très proche de la solution non linéaire.

En parallèle à l’approche Laplace-temps utilisée ici, une modélisation full-FEM (FF) a été testée. Elle s’est avérée plus coûteuse en temps (d’un facteur de l’ordre de 4) et donne des résultats très proches de la méthode Laplace-temps (LT) :

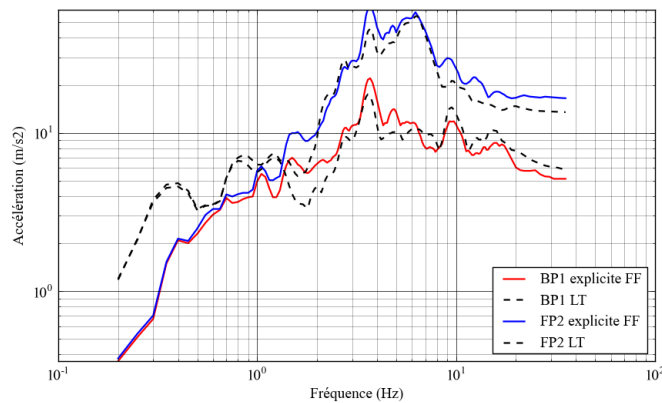


Figure 7 – Comparaisons des SRO avec les méthodes LT et FF

### 3.5.2. Influence de la liaison sol-bâtiment

Dans les méthodes classiques ISS avec décollement de radier, on va utiliser une approche de type tapis de ressort de sol en série avec un tapis d’éléments discrets de contact. Ce type de modélisation simple n’est pas très adapté aux cas de sols à stratification complexes et/ou aux cas de bâtiments enfoncés.

Une nouvelle méthode plus réaliste a donc été proposée, permettant de s’affranchir des limitations précédentes, tout en conservant une mise en œuvre aisée ainsi que des temps de calcul raisonnables.

Pour cela, le contact frottement est représenté par des éléments de joint [9], qui sont surfaciques, avec un comportement élasto-plastique dérivé de la condition de contact de Signorini et du comportement élasto-plastique de Mohr-Coulomb. Ce type d'élément est caractérisé par sa rigidité, son amortissement (en compression et en traction), et ses coefficients d'adhésion et de frottement de Coulomb. Ce sont des éléments finis volumiques avec une épaisseur nulle. Jusqu'à présent, dans le domaine sismique, ce type de modélisation n'avait été testé que pour représenter les joints de plots pour des calculs de barrages.

Afin de juger de l'influence de cette liaison sol-bâtiment, on compare les résultats linéaires aux résultats où les seules non-linéarités sont localisées dans ces éléments joints (le sol reste linéaire). Une modélisation full-FEM a été employée, afin de vérifier sa bonne adaptation à ce type de problème.

Globalement, sous l'effet du séisme, l'effet du décollement à l'interface sol-structure reste très faible. Les écarts entre le calcul linéaire et ce nouveau cas avec contact-frottement étaient négligeables (moins de 1 % sur les SRO par exemple). Un essai avec des paramètres plus dégradés pour les joints, afin d'obtenir un cas plus sévère représentant une plus forte dégradation du sol au voisinage du bâtiment, a été lancé mais des difficultés de convergence ont bloqué la résolution.

### 3.5.3. Influence de la proximité d'autres bâtiments

Les effets d'interaction structure-sol-structure (ISSS) sont d'une importance reconnue dans les cas de bâtiments proches, ce qui est le cas sur le site de Kashiwazaki-Kariwa, en particulier la salle des machines.

Etant donné le manque d'informations détaillées sur le comportement dynamique de ce bâtiment, il est modélisé simplement par un modèle brochette, avec une masse concentrée de 165 000 tonnes (environ 80% la masse du bâtiment réacteur à -3 m, pour un enfoncement au sol totale de 23 m et une emprise au sol de 80 x 90 m. Les deux bâtiments sont espacés de 5 m. Les deux points d'intérêt dans le bâtiment réacteur sont au radier (R2) et au niveau du troisième plancher (R1).

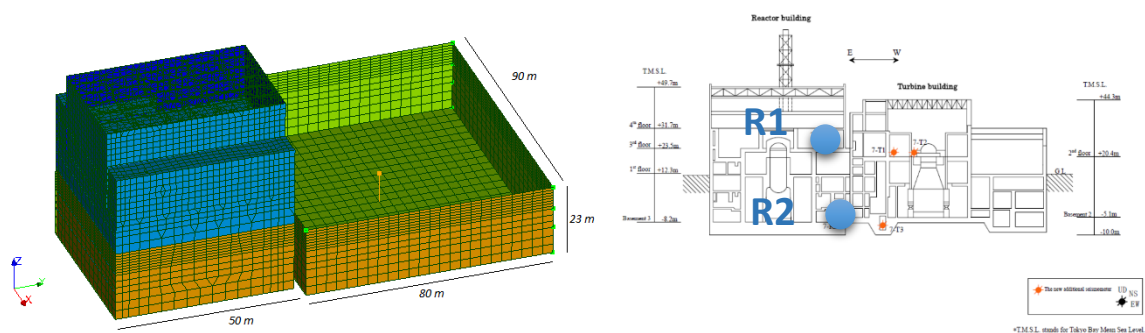


Figure 8 – Modèle ISSS (à gauche) et vue en coupe des bâtiments avec les deux points d'intérêt

On retrouve les conclusions déjà observées sur des cas simples comme le benchmark NUPEC [10] avec une désamplification des niveaux de réponse sous 4 Hz et une amplification au-delà, comme cela transparaît sur la figure ci-dessous (la réponse ISSS est en bleue, la réponse du bâtiment isolé en vert et les mesures en rouge) :

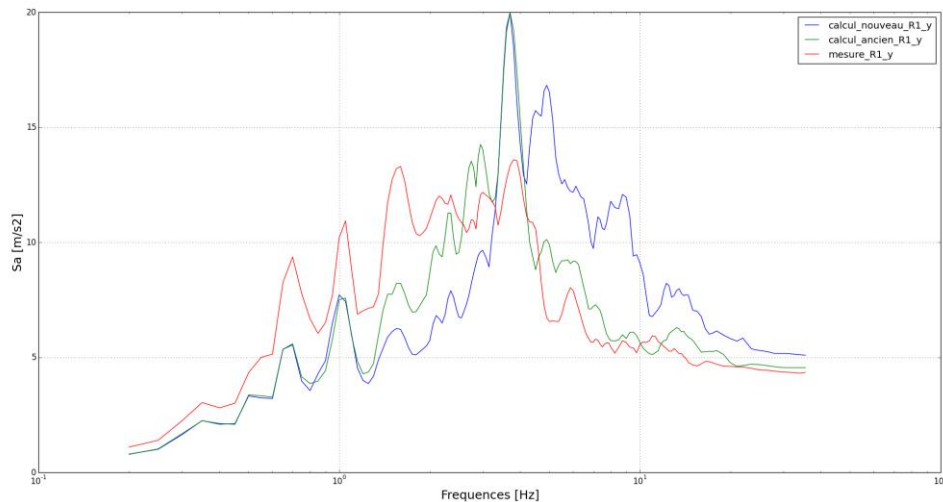


Figure 9 – SRO suivant Y au point R1

L'influence de l'ISSS est donc relativement sensible, mais ne permet pas d'expliquer les écarts avec les résultats expérimentaux.

### 3.6. Performances CPU des méthodes

Quand on se confronte à des problèmes industriels réalistes, l'optimisation des coûts de calculs et de l'usage des ressources informatiques, en particulier la mémoire, devient cruciale, d'autant plus que l'on vise à développer l'utilisation par l'ingénierie de nouvelles méthodes avancées.

Globalement, on arrive aujourd'hui à des problèmes non-linéaires comportant quelques centaines de milliers de DDL, pour des transitoires pouvant avoir quelques dizaines de milliers de pas de temps. Nos codes de calcul : *Code\_Aster* et MISS3D ont donc fait l'objet de développements spécifiques afin d'offrir des performances compatibles avec les exigences des utilisateurs finaux.

Dans *Code\_Aster*, on va donc utiliser le parallélisme au niveau solveur en privilégiant l'utilisation du solveur MUMPS [11] ou si le modèle le permet du solveur itératif PETSc [12]. En plus de ce niveau générique de parallélisme, il existe un procédé de distribution parallèle des calculs sur les points de Gauss, qui est particulièrement intéressant dans les cas où la relation de comportement est complexe à intégrer, ce qui est le cas avec la loi de Hujoux [8] employée ici. Ainsi, sur les problèmes sismiques non-linéaires transitoires, on a une bonne scalabilité jusque vers 16 ou 32 processeurs.

Certaines étapes offrent des gains bien plus grands, comme le calcul des modes vibratoires par exemple, où la scalabilité reste quasi-optimal jusque 72 processeurs.

Dans le cadre du couplage FEM-BEM, la résolution du problème BEM par MISS3D peut représenter une part importante du temps total. De plus, pour des cas où l'interface sol-structure comporte quelques dizaines de milliers de DDL, l'occupation mémoire peut dépasser 100 Go. Le code MISS3D a été récemment porté en fortran 90 afin d'optimiser la gestion mémoire et son branchement sur les routines Intel MKL [13] a permis de multithreader de manière efficaces la plupart des étapes de calcul coûteuses. A titre d'exemple, le speedup sur 24 threads peut atteindre un facteur de l'ordre de 15. En plus de ce niveau de parallélisation, l'utilisation de la méthode Laplace-temps offre un autre niveau de distribution des calculs lié à la boucle dans l'espace de Laplace.

Finalement, en combinant toutes ces optimisations, le calcul le plus lourd (sol non-linéaire avec loi de Hujoux) prend de l'ordre de cinq jours avec la méthode Laplace-temps.

## 4. Conclusions et perspectives

Le cadre du benchmark KARISMA a permis de tester les méthodes de modélisation « best-estimate » pour l'interaction sol-structure en tenant compte de nombreux phénomènes (et de juger de leur influence relative) :

- non-linéarité de sol,
- contact-frottement à l'interface sol-bâtiment,
- influence de bâtiments proches : ISSS.

Les deux approches full-FEM et FEM-BEM Laplace-temps ont montré leurs capacités à traiter ce type de problème industriel, en un temps compatible avec les exigences de l'ingénierie.

La prise en compte de tous les phénomènes précités n'a cependant pas permis de parfaitement retrouver les résultats mesurés sur site lors du séisme. Cela mène à penser qu'il faudrait probablement remettre en question la précision des signaux mesurés.

En perspectives à ce travail, on peut proposer la prise en compte des effets à plus grande échelle que sont les effets de site (forme du bassin sédimentaire, pendage des couches de sol, topographie).

## Références

- [1] IAEA, Guidance Document Part 1 : K-K Unit 7r/B Structure Phase I, II & Revised III, Vienna Février 2012.
- [2] IAEA, Review of seismic evaluation methodologies for nuclear power plants based on a benchmark exercise, IAEA TECDOC SERIES, IAEA-TECDOC-1722, Vienna, 2013.
- [3] A. Nieto Ferro, D. Clouteau, N. Greffet, G. Devésa. On a hybrid Laplace-time domain approach to dynamic interaction problems, European Journal of Computational Mechanics, vol. 21, page3-page6, 2012.
- [4] A. Nieto Ferro. Nonlinear Dynamic Soil-Structure Interaction in Earthquake Engineering, Thèse de l'Ecole Centrale Paris, 2013.
- [5] Site *Code\_Aster* : <http://www.code-aster.org>
- [6] Site MISS3D : [http://www.mssmat.ecp.fr/mssmat/moyens/moyens\\_techniques\\_logiciels/miss](http://www.mssmat.ecp.fr/mssmat/moyens/moyens_techniques_logiciels/miss)
- [7] Documentation Aster R4.02.05. Éléments de frontière absorbante, Site *Code\_Aster* : <http://www.code-aster.org>, 2016.
- [8] D. Aubry, J.C. Hujeux, F. Lassoudière, Y. Meimon. A double memory model with multiple mechanisms for cyclic soil behaviours, Int. Symp. Num. Models in Geomechanics, Zürich, vol. 1, page3-page13, 1982.
- [9] Documentation Aster R7.01.25. Lois de comportement des joints des barrages : JOINT\_MECA\_RUPT et JOINT\_MECA\_FROT, Site *Code\_Aster* : <http://www.code-aster.org>, 2016.
- [10] Y. Kitada, T. Hirotsu, M. Iguchi. Models test on dynamic structure-structure interaction of nuclear power plant buildings, Nuclear Engineering and Design, vol. 192, page205-page216, 1999.
- [11] P.R. Amestoy, I.S. Duff, J.Y.L'Excellent. Multifrontal parallel distributed symmetric and unsymmetric solvers, Comput. Methods in Appl. Mech. Eng., vol. 184, page501-page520, 2000.
- [12] Site PETSc : <http://www.mcs.anl.gov/petsc>
- [13] Site Intel MKL : <https://software.intel.com/en-us/intel-mkl>