

## Rapport d'activité pour l'année 2015

### Etude de la génération de séismes et de la propagation des ondes sismiques

**Projet :** c2015-046700

**Responsable :** AOCHI Hideo

BRGM/DRP/RSV, 3 avenue Claude Guillemin, BP36009, Orléans 45060 Cedex 2, France

#### Allocation

CINES SGI ICE OCCIGEN : 150 000 heures scalaires

CCRT BULL Xeron/GPU Titane : 1000 heures CPU/GPU

#### Consommation à ce jour (23/10/2015)

CINES SGI ICE OCCIGEN : environ 120 000 heures scalaires

CCRT BULL Xeron/GPU Titane : environ 200 heures CPU/GPU

#### Résultats scientifiques

Dans le cadre de plusieurs projets de recherches (ANR, FP7), nous avons continué nos travaux d'études de tremblements de terre en appliquant nos codes basés sur les méthodes BIEM [Méthodes d'Equation Intégrales = Boundary Integral Equation Method (Aochi et al., Pageoph, 2000)] et FDM [Méthode de Différences Finies = Finite Difference Method (Aochi and Madariaga, BSSA, 2003 ; Dupros et al., 2008)]. Nous nous efforçons de mieux comprendre les mécanismes de ces phénomènes, en étudiant le rayonnement des ondes.

Suite au changement des machines (vers occigen) en 2015, nous avons effectué des nombreux tests pour évaluer la performance. Il est avantageux d'utiliser plus de cœurs par nœud pour nos codes hybrides en MPI-OpenMP. Le temps du calcul nécessaire pour un problème est légèrement amélioré (Table 1).

*Table 1 : Comparison of CPU time for a case test1d3d\_std\_LP66H1 (1020 x 620 x 210 x 12000) on different machines at CINES. The code of FDM is parallelized with MPI between nodes and OpenMP on each node.*

	Nodes	Cores/node	Total cores	Elapsed Time (hh :mm :ss)	CPU Time (min)
JADE (2014)	16	8	128	2 :39 :56	20471
OCCIGEN (2015)	10	24	240	1 :17 :31	18604

Nous avons essayé lancer notre code version GPU de FDM en 2015, mais due à certains problèmes sur la version MPI-GPU, nous n'avons pas encore tout validé notre code sur CURIE. Cette tâche reste à faire d'ici la fin d'année. L'essai préliminaire montre un gain de temps significatif ( 40 fois plus rapide ! )

Table 2 : Comparison of CPU time for a case pp1 (420 x 260 x 90 x 6000) from different version of the code FDM, MPI-OpenMP on Occigen/CINES and GPU on Curie/TGCC.

	Nodes	Cores/node	Total cores	Elapsed Time	CPU Time (min)
Occigen (MPI-OpenMP)	5	24	120	00 :07 :22	928
Curie (GPU)	1	1	1	00 :23 :05	23

En 2015, nous avons progressé en modélisations de séismes, notamment nos simulations de la propagation des ondes en région d'Istanbul (Turquie) suite à celles précédemment effectuées en rupture dynamique sur la faille Nord Anatolienne (Aochi and Ulrich, BSSA, 2015). Nos études sont considérées comme une référence dans le cadre du projet européen MARSite (<http://marsite.eu/?p=1956>).

**Douglas & Aochi (BSSA, accepté, 2015)** ont étudié la variabilité du mouvement sismique aux termes de localisation d'un tremblement de terre, le chemin de la propagation des ondes et l'amplification d'un site local. Nous avons lancé une centaine simulations (différentes localisations (latitude, longitude et profondeur) et mécanismes de séisme). **Figure 1** montre le résidu de notre simulation par rapport à la prédiction par une loi empirique en fonction de la localisation du séisme. Par exemple, la localisation dans le centre-ouest de la Mer de Marmara (à environ 27.9°E, 40.3°N) montre un fort résidu pour une profondeur de séisme à 7 km (haut). Cela indique que cet endroit de séismes provoquerait un mouvement sismique plus fort que la prédiction empirique, à cause de la structure 3D. Nous aurions besoin plus en plus réflexion de ce type

En outre, nos simulations ont fournis beaucoup de scenarios afin de tester la méthodologie d'analyse (inversion de source sismique) dans la configuration actuelle. **Diao et al. (in revision, GJI, 2015)** en est la preuve d'une démonstration réussie. Les deux équipes ont travaillé pour ce blind-test. Le BRGM a fourni des simulations synthétiques (forward simulations) et le GFZ Potsdam a essayé trouver les modèles d'origine (inversions). **Figure 2** compare les sismogrammes à différentes stations y compris celles au fond de la Mer. Malgré la différence en méthodologies et paramétrages des deux équipes, ce teste valide à la fois nos simulations et leurs analyses dans une bonne cohérence.

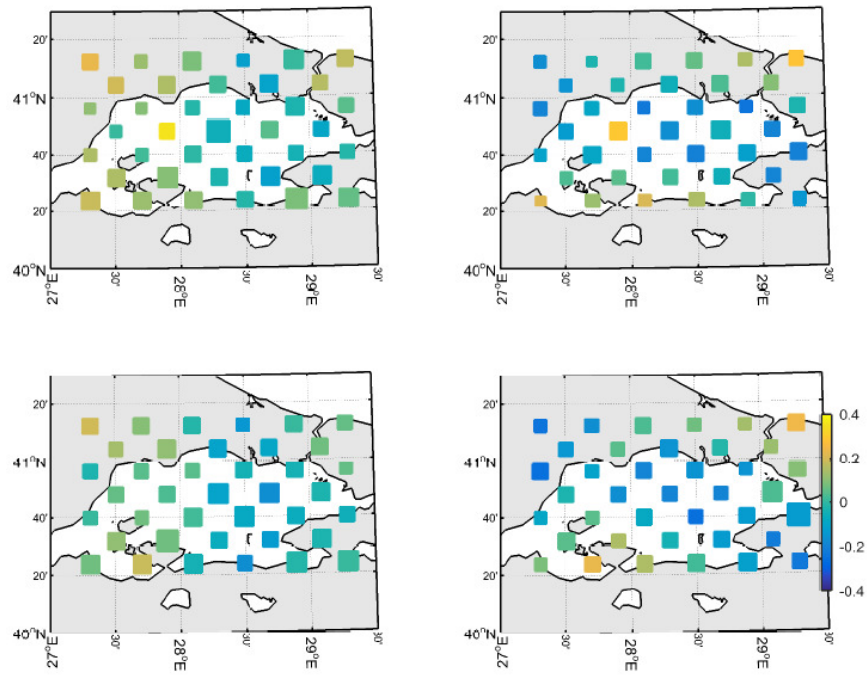


Figure 1: Maps of event residuals, where size is proportional to standard deviation, which ranges from 0:2531 to 0:6035. Top maps are for the 7km sources and bottom maps are for the 12 km sources; left maps are for the strike-slip sources and right maps are for the oblique sources.(Douglas & Aochi, 2015)

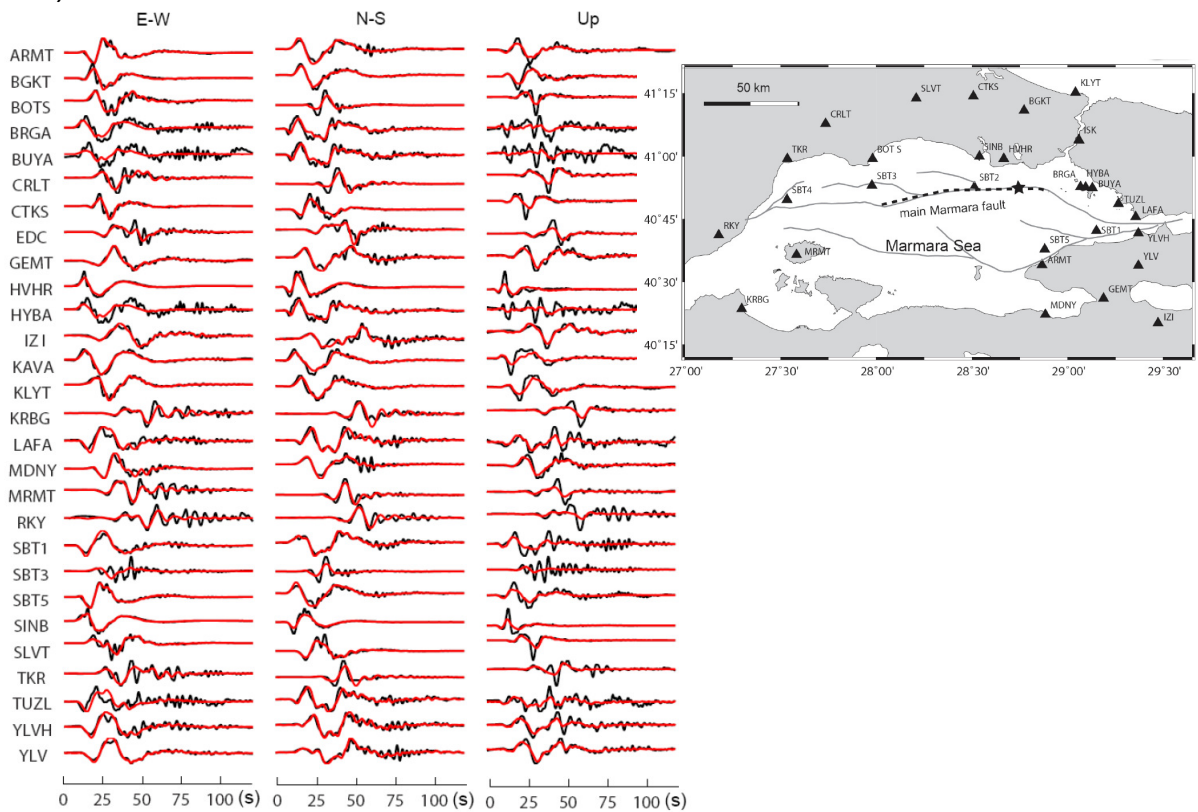
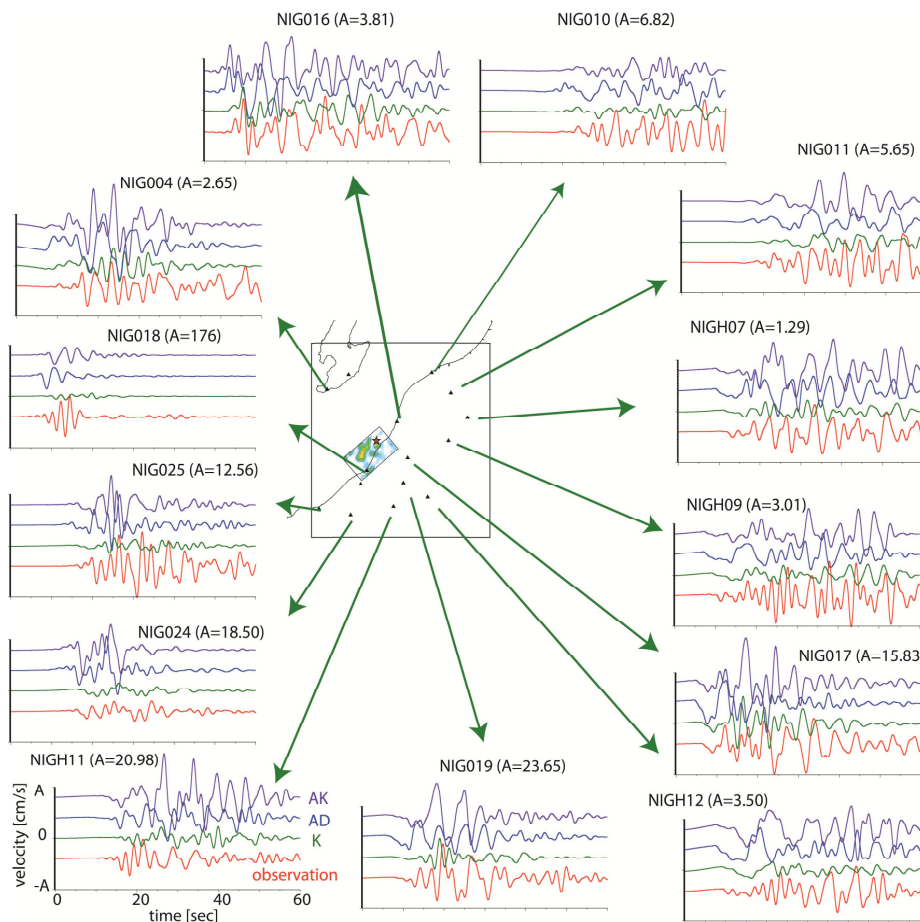
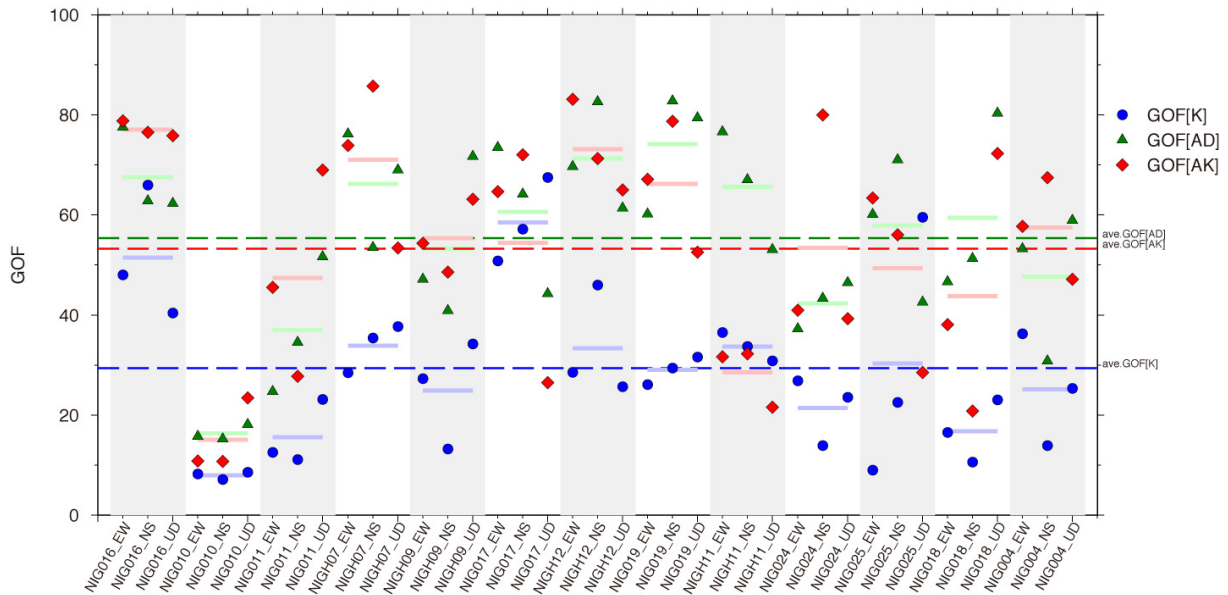


Figure 2 : Comparison of the input (black: **notre simulation**) et inverted three-component velocity waveforms for a scenario of M7 event. After Diao et al. (2015).

Deuxièmement, l'importance du processus de rupture dynamique en terme de la compréhension du rayonnement des ondes et pour la prédiction du mouvement fort en champs proche (**Aochi, IAIA workshop, 2015**). A cette occasion, nous avons retravaillé nos simulations pour quantifier l'avantage du modèle de source dynamique. La **Figure 3** montre une simulation des propagations des ondes à l'échelle régionale à partir de différentes modèles de source sismique pour le séisme de Niigata Chuetsu-oki en 2007 (Mw6.6, Japon). Les calculs ici ont permis à évaluer les simulations avec les observations (Aochi and Yoshimi, soumis à J. Seismology, 2015). Les modèles dynamiques (Modèles AK et AD) (également simulée précédemment par notre soin avec la BIEM) marquent une note bien meilleure qu'un modèle cinématique paru dans la littérature (Modèle K), comme montré statistiquement dans la **Figure 4**.



**Figure 3 – Comparaison des mouvements du sol (en vitesse en composant EW) à différentes stations autour d'un séisme de Chuetsu-oki en 2007. Par rapport aux observations (rouge), trois modèles de sources sont simulés. Model K : Kinematic model of Aoi (EPS, 2007), Model AD : Modèle dynamique sur une faille plane simulé par Aochi and Dupros (2011). Modèle AK : Modèle dynamique sur deux failles conjuguées simulé par Aochi and Kato (2010). Les résultats sont analysés statiquement par Goodness-of-Fit criteria (Aochi & Yoshimi, soumis à J. Seismology, 2015).**



**Figure 4 : Goodness-of-Fit score (highest at 100) characterize les mouvements forts simulés par rapport aux observations en termes de six paramètres (PGV, PGD, DUR, RS, FS and ENER). La modèle de source dynamiquement simulé (vert et rouge) améliore la note du modèle cinématique (bleu). D’après Aochi and Yoshimi (submitted to J. Seismol, 2015).**

Enfin, nous avons proposé un nouveau modèle de l’hétérogénéité (**Aochi and Ide, IUGG, 2015** ; en préparation d’un article). **Figure 5** présente notre simulation préliminaire (**Aochi & Ide, unpublished work**). En fait, nous pensons que les lois de frottement sur une petite hétérogénéité est aussi important avant l’initiation de glissement (slip-strengthening, normalement négligé et mis à zéro) que pendant le glissement (après l’initiation). La question est de savoir comment les petites hétérogénéités sont visibles sans être cachées derrière d’une grande hétérogénéité au terme du rayonnement des ondes (abordé dans l’article d’Aochi and Ide (EPS, 2014), qui bénéficient de la ressource de GENCI). Nous pensons qu’il faut un mécanisme qui permet de retarder le processus de rupture sur les petites hétérogénéités. Puisque c’est un processus non-linéaire, nous avons également amélioré le code BIEM. Nous souhaitons continuer à travailler sur ce sujet en 2016.



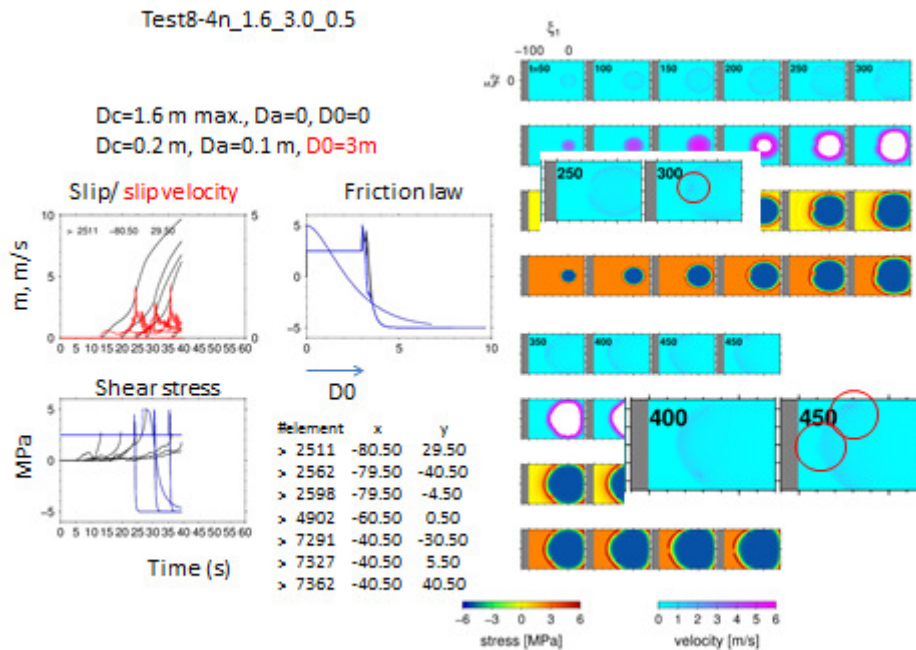


Figure 3: An example of dynamic rupture simulation, taking into account of slip-hardening process prior to slip-weakening friction. The distance necessary to hardening process is a key variable parameter, and might be scale –dependent. Local perturbation in rupture front appears, as remarked in red circles.

## Publication

- **Aochi, H.** and M. Yoshimi, Seismological asperities from the point of view of dynamic rupture modeling: the 2007 Mw6.6 Chuetsu-Oki, Japan, earthquake, submitted to J. Seismology, 2015. (submitted in 2015)
- Douglas, J. and **H. Aochi**, Assessing components of ground-motion variability from simulations for the Marmara Sea region (Turkey), accepted, Bull. Seism. Soc. Am., 2015. (submitted in 2015)
- Diao, F., R. Wang, **H. Aochi**, T. R. Walter, Y. Zhang, Y. Zheng, and X. Xiong, Rapid kinematic finite-fault inversion for an Mw7+ scenario earthquake in the Marmara Sea: Uncertainty study, in revision, Geophys. J. Int., 2015. (submitted in 2015)
- **Aochi, H.** and **T. Ulrich**, A probable earthquake scenario near Istanbul determined from dynamic simulations, Bull. Seism. Soc. Am. , 105(3), 1468-1475, doi:10.1785/0120140283, 2015. (submitted in 2014)

## Publication en préparation

- **Aochi, H.**, and S. Ide, Role of multi-scale heterogeneity in slow earthquakes from numerical simulations, in preparation for J. Geophys. Res., 2015

## Conférences

- **Aochi, H.**, Input ground motion calculation base on dynamic rupture modeling on segmented faults, in the proceeding of the IAEA international workshop on Best Practice in Physics-based Fault Rupture Models for Seismic Hazard Assessment of

Nuclear Installations, Vienna Austria, November 2015. (**invited with an extended abstract**)

- **Aochi, H.** and S. Ide, Importance of scaling relation in slip-strengthening in various earthquake slips, IUGG General Assembly, Prague, June 2015.
- **Aochi, H., T. Ulrich,** D. Michea and F. Dupros, Variability estimation in ground motion around Istanbul based on the probabilistic dynamic rupture scenarios along the North Anatolian fault, IUGG General Assembly, Prague, June 2015.