



Simulations Sismiques à Grande Échelle/Haute Fréquence de la Région de Pointe-à-Pitre par la Méthode des Éléments Spectraux

Florent de Martin, Erwan Bourdon, Gabriel Courrioux, Evelyne Foerster,
Anne Lemoine, Agathe Roulle

► To cite this version:

Florent de Martin, Erwan Bourdon, Gabriel Courrioux, Evelyne Foerster, Anne Lemoine, et al.. Simulations Sismiques à Grande Échelle/Haute Fréquence de la Région de Pointe-à-Pitre par la Méthode des Éléments Spectraux. 8^{eme} colloque AFPS, Vers une maîtrise durable du risque sismique, Sep 2011, Champs-sur-Marne, France. 8 p. hal-00605317

HAL Id: hal-00605317

<https://brgm.hal.science/hal-00605317>

Submitted on 1 Jul 2011

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.



Simulations Sismiques à Grande Échelle/Haute Fréquence de la Région de Pointe-à-Pitre par la Méthode des Éléments Spectraux

Florent De Martin* — **Erwan Bourdon**** — **Gabriel Courrioux***** — **Evelyne Foerster*** — **Anne Lemoine*** — **Agathe Roullé***

* BRGM - Service Risques Naturels et Sécurité du Stockage de CO₂

3 avenue C. Guillemin, 45060 ORLEANS

{f.demartin, e.foerster, a.lemoine, a.roullé}@brgm.fr

** BRGM – SGR Guadeloupe

Route de l'Observatoire, 97113 GOURBEYRE

e.bourdon@brgm.fr

*** BRGM - Service Géologie

3 avenue C. Guillemin, 45060 ORLEANS

g.courrioux@brgm.fr

RÉSUMÉ. L'objectif de cette étude est de réaliser des simulations réalistes de séismes à grande échelle et haute fréquence (environ 5 Hz) dans la région de Pointe-à-Pitre, Guadeloupe. Pour cela, une modélisation détaillée de la source sismique et de la structure de vitesse du milieu est nécessaire. La géologie locale a été construite via le logiciel Geomodeler©, brgm en compilant les données de sous-sol (ex. données de forage) aux alentours de Pointe-à-Pitre. La vitesse des ondes de cisaillement au sein de chaque formation identifiées a été dérivée des campagnes géophysiques existantes (ex. SASW, H/V, etc.). Les séismes sont générés au niveau de la faille de Gosier située au sud-est de Pointe-à-Pitre. La distribution de glissement cinématique sur faille étendue a été générée selon le modèle de champ aléatoire de Mai et Beroza (2002). Les résultats des simulations sont montrés en termes de carte de PGV sur la surface libre ou de d'accélérogrammes synthétiques enregistrés au niveau de bâtiments à forts enjeux en cas de séisme (ex. maire, hôpitaux, lycées, etc.)

ABSTRACT. The goal of this study is to perform realistic large-scale spectral-element earthquake simulations in the vicinity of Pointe-à-Pitre, Guadeloupe, valid up to rather high frequencies (around 5 Hz). For this purpose, a detailed modeling of both the seismic source and velocity structure of the medium is necessary. The local geology has been constructed using brgm Geomodeler© software, by compiling the available underground data (e.g. boring data) in the vicinity of the city of Pointe-à-Pitre. The shear-wave velocities within each identified formation have been derived from the existing geophysical campaigns (e.g. SASW, cross-hole, H/V, etc.). In the present simulations, the Gosier fault, located to the Southeast of Pointe-à-Pitre, has been considered. The slip distributions of the finite-fault are generated according to the spatial random field model developed by Mai and Beroza (2002). The results of these simulations are shown as PGV map on the free surface or time history recorded at high stake facilities of Pointe-à-Pitre (e.g. city council, hospital, schools, etc.).

MOTS-CLÉS : séisme, scénario, simulation, méthode des éléments spectraux, modèle géologique, Guadeloupe, Pointe-à-Pitre.

KEYWORDS: earthquake, scenario, spectral-element method, geological model, Guadeloupe, Pointe-à-Pitre.

1. Introduction

Grâce au développement du calcul parallèle, les méthodes numériques utilisées en sismologies sont capables, depuis une quinzaine d'années, de simuler la propagation des ondes sismiques en milieu géologique complexe tridimensionnel (3D) à grande échelle avec une résolution croissante (i.e., vers des hautes fréquences). Avec une structure de vitesse réaliste, les sismogrammes synthétiques reproduisent avec succès les sismogrammes observés dans plusieurs bassins sédimentaires (ex., Graves, 1996 ; Pitarka et al., 1998 ; Wald and Graves, 1998 ; Kawase and Matsushima, 1998 ; Satoh et al., 2001 ; Komatitsch et al., 2004) ou à échelle globale (ex. Komatitsch and Tromp, 2002a,b ; Komatitsch et al., 2002, 2003). Différents buts peuvent être atteints via ces avancées récentes ; pour n'en citer qu'un, ces simulations pourraient à l'avenir servir à effectuer des analyses physiques quantitatives d'aléa sismique utiles dans les gammes de fréquences d'intérêt des dynamiciens des structures.

L'objectif de cet article est de présenter des simulations de séismes effectuées à grande échelle dans la région de Pointe-à-Pitre, Guadeloupe, valides jusqu'à 5 Hz avec une vitesse minimale d'onde de cisaillement de 200 m/s dans le bassin sédimentaire de Pointe-à-Pitre. Ces simulations ont été réalisées grâce au code FORTRAN90 en éléments spectraux « Éléments FInis SPECTraux 3D » (ÉFISPEC3D, De Martin, 2010) parallélisé en MPI (Message Passing Interface) et vérifié sur le cas test viscoélastique LOH.3 du « Southern California Earthquake Center » (De Martin, soumis). Dans un premier temps, nous présentons la construction du modèle géologique ainsi que la définition de la structure de vitesse utilisées pour les simulations. Ensuite, nous présentons la discrétisation spatio-temporelle et les caractéristiques du maillage. Enfin, nous présentons les différentes sources étendues utilisées au niveau de la faille du Gosier et les résultats sous forme de carte de PGV ou de sismogrammes synthétiques au droit des enjeux de la région (marie, hôpitaux, lycées, etc.).

2. Modèle géologique et structure de vitesse

Le modèle des simulations représente une région de 40 x 30 x 30 km incluant la topographie (MNT 40 m). Il se compose d'un modèle géologique 3D local détaillé de taille 7 x 7 x 0.1 km au niveau de Pointe-à-Pitre emboîté dans un modèle régional 1D (Dorel, 1979). Le modèle local aux alentours de Pointe-à-Pitre a été réalisé sous Geomodeler© via la compilation des données du sous-sol (ex. données de forage). Quatre grandes formations géologiques ont été identifiées : du calcaire altéré formant le substratum rocheux et des argiles, vases et remblais formant le bassin sédimentaire.

Une structure de vitesse homogène a été affectée à chacune de ces formations via des études préliminaires réalisées dans la région (Monge et al., 1998). Le Tableau 1 récapitule les propriétés mécaniques affectées à chaque formation. Les facteurs de qualité des sédiments sont simplifiés et choisis afin d'obtenir un amortissement classique de 5%. La loi viscoélastique utilisée dans cet article est celle présentée par Liu et Archuleta (2006). En dehors du bassin sédimentaire, les propriétés mécaniques élastiques suivent celles de Dorel (1979) et sont récapitulées en Tableau 1. Le substratum 1 se situe de 0 à 3 km, le substratum 2 de 3 à 12 km, le substratum 3 de 12 à 15 km et le substratum 4 de 15 à 50 km.

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques élastiques et viscoélastiques des formations géologiques présentent dans le modèle local (calcaire altéré, vase, argile et remblai) et régional (substratum 1 à 4).

Type de formation	Vitesse de cisaillement (Vs m/s)	Vitesse de compression (Vp m/s)	Densité (kg/m ³)	Facteur de qualité des ondes de cisaillement	Facteur de qualité des ondes de compression
Calcaire altéré	1000	2000	2000	25	75

Argile	350	1000	1700	10	30
Vase	200	1000	1500	10	30
Remblai	250	800	1600	10	30
Substratum 1	1500	3500	2500	50	150
Substratum 2	3410	6000	2500	50	150
Substratum 3	3980	7000	2500	50	150
Substratum 4	4550	8000	2500	50	150

3. Discrétisation spatiale/temporelle et décomposition du domaine de simulation

Le maillage est effectué grâce au logiciel GiD (<http://gid.cimne.upc.es/>). Afin de raffiner la zone du bassin sédimentaire pour effectuer des simulations valides jusqu'à 5 Hz avec une vitesse d'onde de cisaillement minimale de 200 m/s, le maillage est de type écossais sur la géologie locale de 7 x 7 x 0.1 km (cf.

Figure 1). Il est composé de 8 341 190 nœuds géométriques, de 8 205 084 hexaèdres à 8 nœuds et de 195 612 quadrangles formant les frontières absorbantes (approximation paraxiale P1 (Stacey, 1988)). Le désavantage de ce type de maillage est la contrainte forte au niveau de la condition de stabilité de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) car les hexaèdres de petite taille (40 m dans notre étude) présents dans les matériaux à forte vitesse de compression (ex. substratum 4) imposent un pas de temps très faibles pour garantir la stabilité du schéma en temps explicites. Dans notre cas, nous utilisons des polynômes d'ordre 4 pour les fonctions de formes, ce qui implique une distance minimale entre les points de Gauss-Lobatto-Legendre de 6.9 m ($= 40/2 \times 0.3453$) pour un hexaèdre dont une arête mesure 40 m. Le pas de temps a donc été fixé à 2.5E-5 seconde soit un CFL de $(8000 \times 2.5E-5)/6.9 = 0.28$ (nous notons qu'avec l'utilisation des frontières absorbantes P1, le nombre CFL doit être empiriquement inférieur à 0.3 pour garantir la stabilité du schéma). Le nombre total de degré de liberté (i.e., sommation sur les trois directions de l'espace) est de 1 705 228 632. Pour la résolution du système matriciel, le domaine est décomposé sur 224 CPUs, soit la résolution d'environ 7 612 627 de degré de liberté par CPU. L'utilisation de 8 variables de mémoire pour la loi viscoélastique mène à une consommation mémoire d'environ 440 Go. Les 120 000 pas de temps (représentant 30 secondes de simulation) sont résolus en 11 jours sur le cluster du BRGM (composé au total de 256 cores (AMD Opteron 2.3 Ghz Quad cores) distribués sur 32 nœuds avec 16 Go de mémoire par nœud).

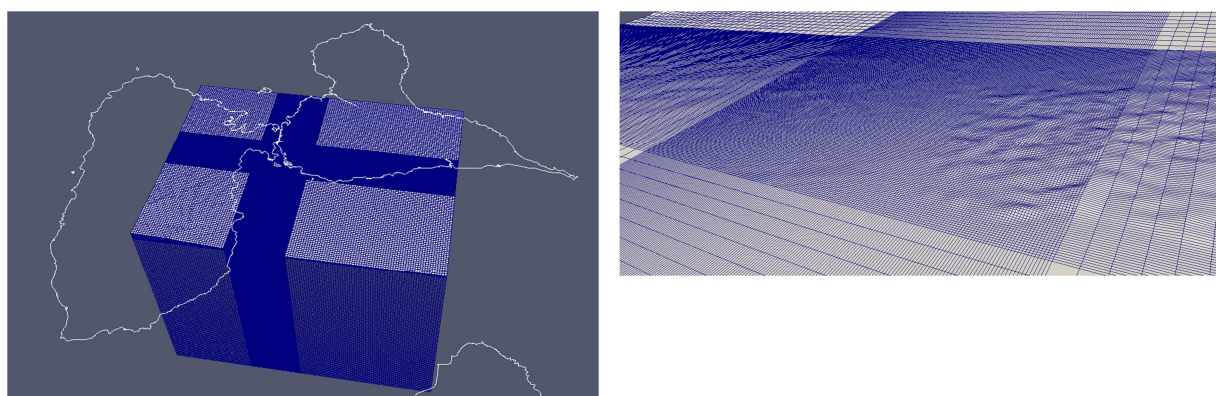


Figure 1. Maillage écossais formé d'hexaèdres (gauche) et zoom sur la région de Pointe-à-Pitre (droite).

4. Modèles de source et simulations

Nous considérons dans cet article les séismes potentiels pouvant avoir lieu sur la faille de Gosier (cf.

Figure 2). Nous supposons la faille plane avec un azimuth de 90° par rapport au nord, un pendage de 70° et une rupture normal, soit un angle de rupture de -90°. Plusieurs scénarios de rupture cinématique sont envisagés. La Figure 3 montre deux scénarios de glissement hétérogène pour une même magnitude ($M_w=6.0$) générés via la méthode de Mai et Beroza (2002) (Seul le scénario a) a été réalisé à ce jour à cause d'une grande demande du cluster de calcul). La faille de taille 10 x 5 km est composée de 7881 sous failles, chacune affectée d'un point source double couple. La fonction de source est une tangente hyperbolique de la forme :

$$s(t) = 0.5 \left(1 + \tanh \left(\frac{t-t_0}{\tau/5} \right) \right), \quad [1]$$

avec τ le temps de montée (fixe pour chaque point source) et t_0 le temps de décalage (variable pour simuler une propagation de rupture circulaire). Les résultats de cet article sont montrés pour $\tau = 1$ seconde.

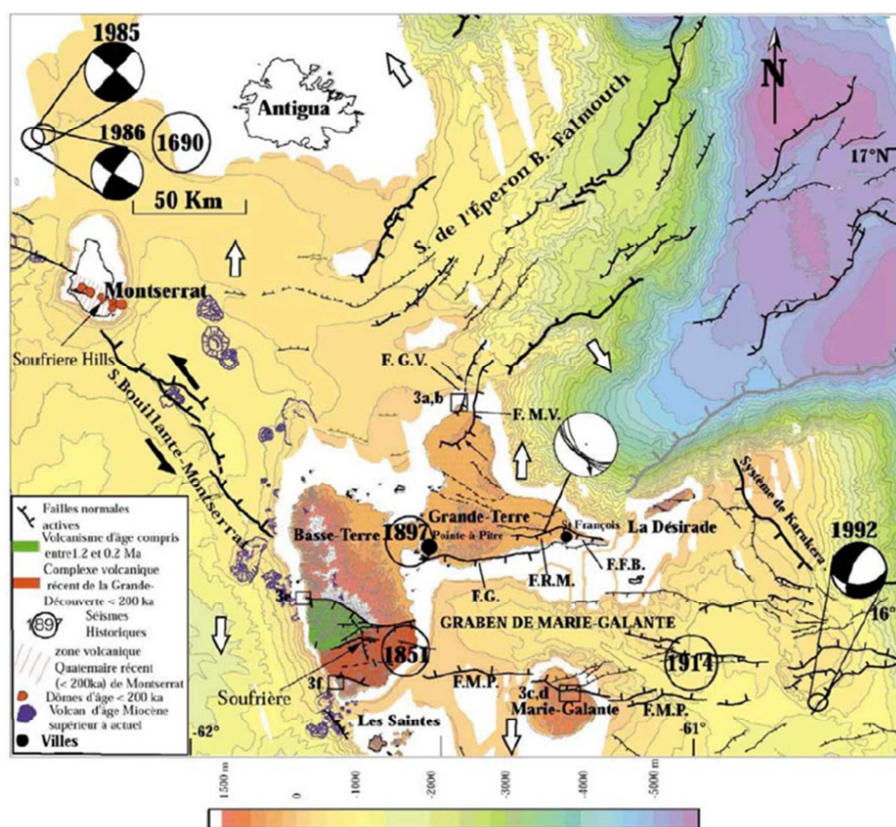


Figure 2. Failles normales de l'archipel de la Guadeloupe (d'après Feuillet, 2000). La faille de Gosier, proche de Pointe-à-Pitre, est notée F.G.

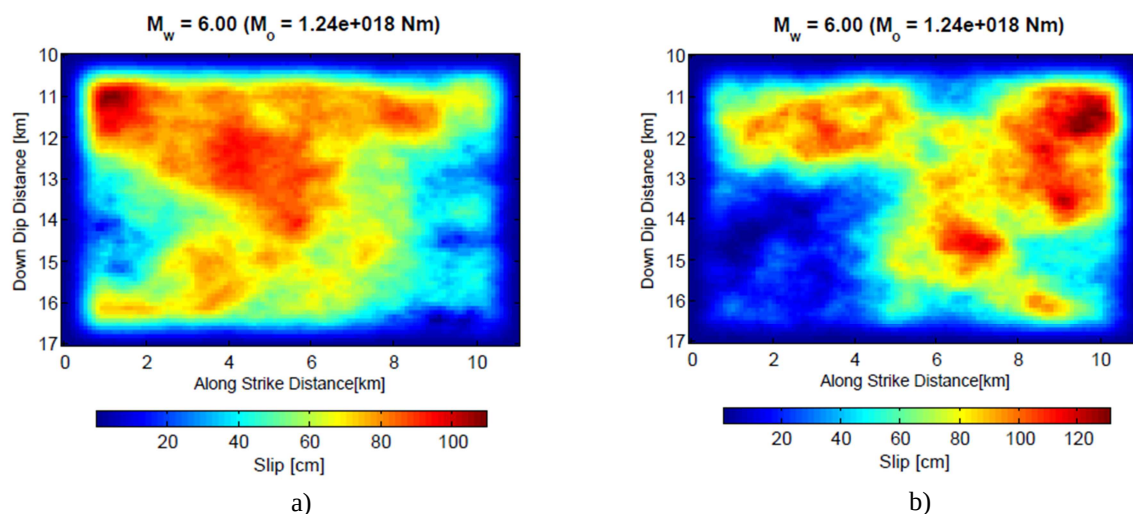
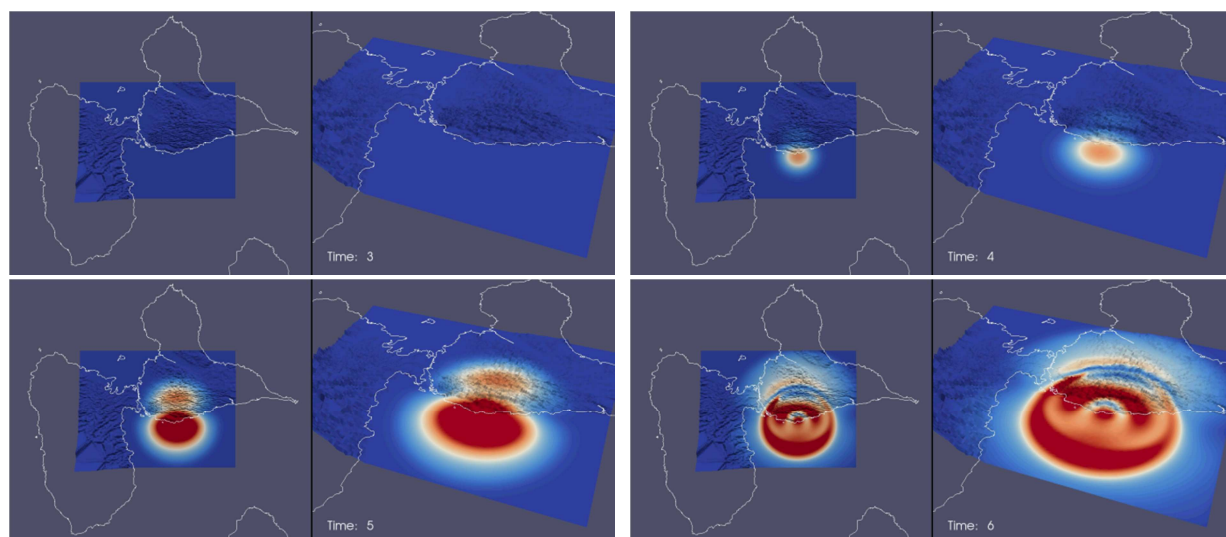


Figure 3. Répartition des glissements pour deux séismes de scénarios de magnitude $M_w = 6.0$ générés par la méthode de Mai et Beroza, 2002.

La Figure 4 montre la propagation des ondes pour le séisme de scénario a) de la Figure 3. Un effet de site dû au bassin sédimentaire est clairement visible au niveau de la région pointoise sur les snapshots à 8 et 9 secondes. La Figure 5 montre la carte de PGD (Peak Ground Displacement) et PGV (Peak Ground Velocity) lors du séisme de scénario a). Sur la carte de PGV, un effet de bord (ex. Kawase, 1996) est visible dans le coin sud-est du bassin sédimentaire. Nous notons aussi que les PGVs simulés sont cohérents avec ceux dérivés empiriquement par Akkar et Bommer (2007) pour des failles normales (cf. Figure 6). La Figure 7 montre des exemples d'accélérogrammes synthétiques obtenus à la mairie de Pointe-à-Pitre et au Lycée de Baimbridge durant le séisme de scénario a). A cause du mécanisme normal de la faille, les accélérations dans la direction NS sont beaucoup plus fortes que celle dans la direction EW.



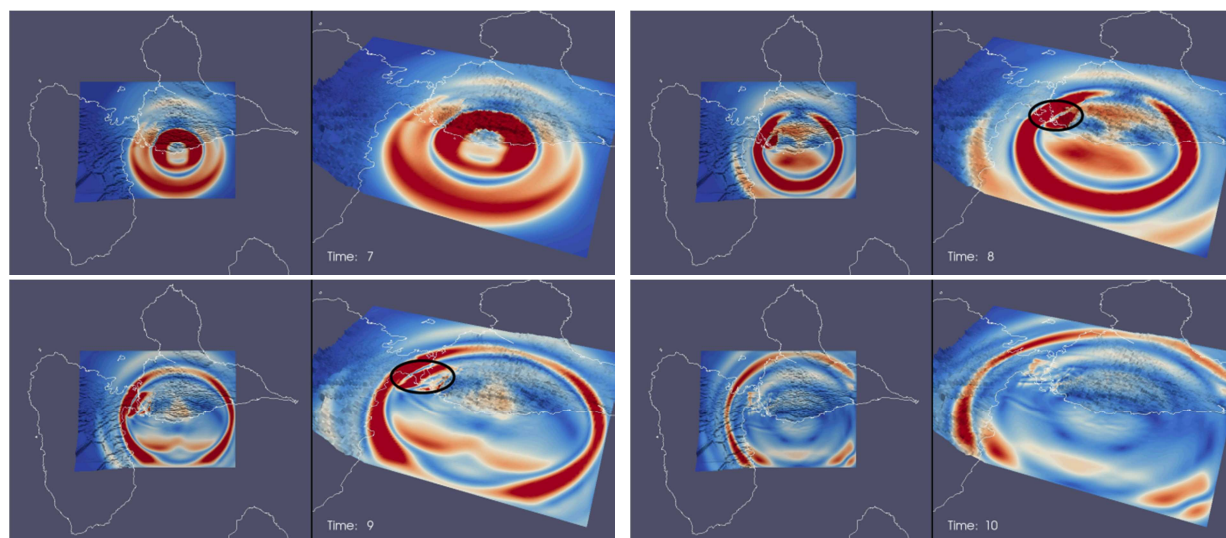


Figure 4. Snapshots de propagation d'onde en milieu complexe durant un séisme de scénario de magnitude 6 en Guadeloupe, Antilles française, calculés avec le code en éléments spectraux EFISPEC3D. Chaque snapshot est composé de deux panneaux : le panneau droit est une vue isométrique et celui de gauche une vue projetée dans le plan horizontal. La magnitude de la vitesse est représentée à chaque seconde. Un net effet de site dû au bassin sédimentaire est visible vers Pointe-à-Pitre et mis en évidence par une ellipse noire sur les snapshots à 8 et 9 secondes.

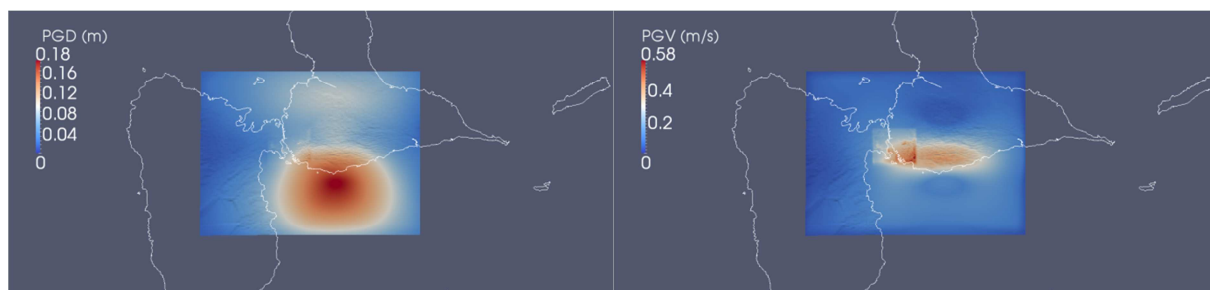


Figure 5. PGD (gauche) et PGV (droite) lors du séisme de scénario a).

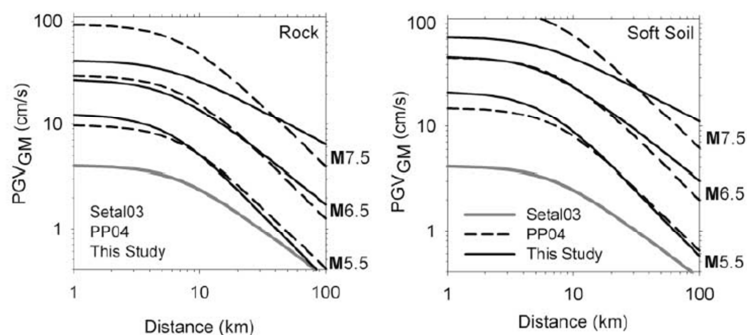


Figure 6. Prédiction de PGV_{GM} pour des failles normales entre différentes études. Reproduction de la Figure 11 provenant de Akkar et Bommer (2007) (noté « This study » dans la figure).

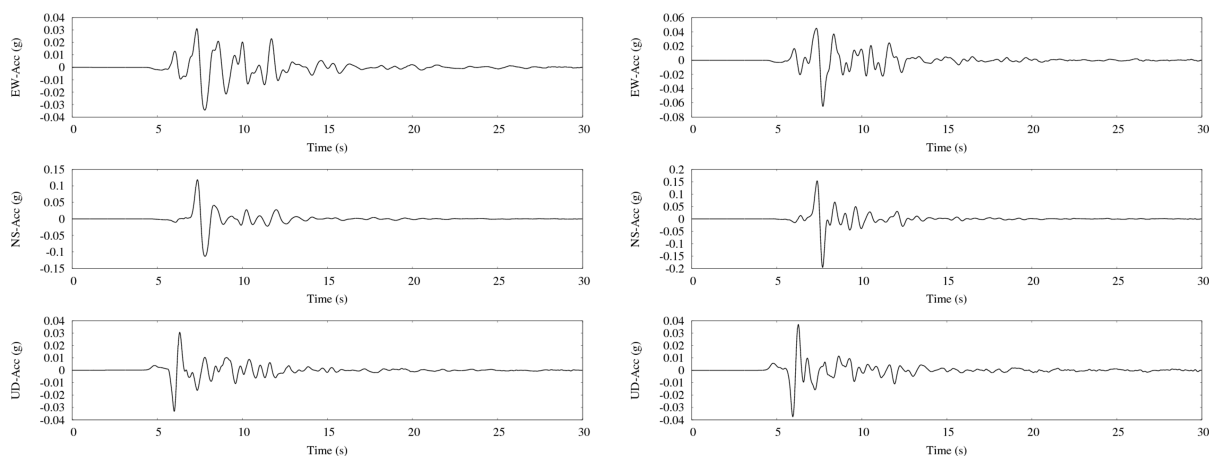


Figure 7. Sismogrammes synthétiques obtenus à la mairie de Pointe-à-Pitre (gauche) et au lycée de Baimbridge (droite) suite au séisme de scénario a).

5. Conclusions

Nous avons réalisé un modèle géologique 3D détaillé de la zone de Pointe-à-Pitre auquel nous avons affecté une structure de vitesse provenant d'études antérieures. Cela nous a permis de réaliser des simulations par éléments spectraux grâce au code EFISPEC3D. Les PGVs obtenus sont cohérents avec ceux calculés empiriquement par d'autres études pour des failles normales. L'intérêt de telles simulations est aussi de produire des accélérogrammes synthétiques de plus en plus réalistes dans des milieux géologiques 3D complexes. Cependant, même si de nos jours les méthodes numériques donnent des résultats de plus en plus précis à haute fréquence, les résultats synthétiques obtenus sont clairement entachés d'incertitudes dues à la méconnaissance du milieu de propagation et du mécanisme de rupture de la source.

Remerciement

Cette étude a été financée par le conseil régional de la Guadeloupe et par la dotation interne BRGM. Nous remercions John Douglas pour ses conseils sur la comparaison avec les PGV empiriques.

6. Bibliographie

- Akkar S, Bommer JJ, "Empirical prediction equations for peak ground velocity derived from strong motion records from Europe and the Middle East". Bull Seism Soc Am 97(2): 511–530, 2007.
- De Martin, F., Verification of a Spectral-Element Code for the Southern California Earthquake Centre LOH.3 Viscoelastic Case, Bull. Seism. Soc. Am. (soumis).
- De Martin, F., Influence of the Nonlinear Behavior of Soft Soils on Strong Ground Motions. Ph. D. thesis, Ecole Centrale Paris, Paris, France, 2010.
- Dorel, J., Seismicité et structure de l'arc des Petites Antilles et du Bassin Atlantique, Thèse de Doctorat d'Etat, Université P. et M. Curie, Paris, 1979.
- Feuillet N., Sismotectonique des Petites Antilles. Liaison entre activité sismique et volcanique, thèse, université Paris-7, 283 p., 2000.

- Graves, R. W., “Simulating realistic earthquake ground motions in regions of deep sedimentary basins”. In *Proc. of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico. CD-ROM, No. 1932, 1996.
- Kawase, H., “The Cause of the Damage Belt in Kobe: "The Basin-Edge Effect," Constructive Interference of the Direct S-Wave with the Basin-Induced Diffracted/Rayleigh Waves”. *Seismological Research Letters*, v. 67, no. 5, p. 25-34, 1996.
- Kawase, H. and S. Matsushima, “Strong motion simulation in Kobe during the Hyogo-ken Nanbu earthquake of 1995 based on a three-dimensional basin structure”. *J. Struct. Constr. Eng. Trans. Architectural Inst.* 514 111–118. In Japanese with English abstract, 1998.
- Komatitsch, D., J. Ritsema, and J. Tromp, “The spectral-element method, Beowulf computing, and global seismology”. *Science* 298 1737–1742, 2002.
- Komatitsch, D. and J. Tromp, “Spectral-element simulations of global seismic wave propagation-I. Validation”. *Geophys. J. Int.* 149 390–412, 2002a.
- Komatitsch, D. and J. Tromp, “Spectral-element simulations of global seismic wave propagation-II. 3-D models, oceans, rotation, and self-gravitation”. *Geophys. J. Int.* 150 303–318, 2002b.
- Komatitsch, D., S. Tsuboi, C. Ji, and J. Tromp, “A 14.6 billion degrees of freedom, 5 teraflops, 2.5 terabyte earthquake simulation on the earth simulator”. In *Proceedings of the 2003 ACM/IEEE conference on Supercomputing*, Los Alamitos, CA, USA, pp. 4. IEEE Computer Society, 2003.
- Komatitsch, D., Q. Liu, J. Tromp, P. Suss, C. Stidham, and J. H. Shaw, “Simulations of Ground Motion in the Los Angeles Basin Based upon the Spectral-Element Method”. *Bull. Seism. Soc. Am.* 94 187–206, 2004.
- Liu, P. and R. Archuleta, “Efficient modeling of Q for 3D numerical simulation of wave propagation”. *Bull. Seism. Soc. Am.* 96 1352–1358, 2006.
- Mai, P. M., and G. C. Beroza, A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip, *J. Geophys.* 107, no. B11, 2308, 2002.
- Monge, O., Vermeersch, F., Martin, C., “Microzonage sismique de l’agglomération pontoise : extension aux communes des Abymes et du Gosier et homogénéisation”, Rapport BRGM/R 39213, 1998.
- Pitarka, A., K. Irikura, T. Iwata, and H. Sekiguchi, “Three-dimensional simulation of the near-fault ground motion for the 1995 Hyogo-Ken Nanbu (Kobe), Japan, earthquake”. *Bull. Seism. Soc. Am.* 88 428–440, 1998.
- Satoh, T., H. Kawase, T. Sato, and A. Pitarka, “Three-Dimensional Finite-Difference Waveform Modeling of Strong Motions Observed in the Sendai Basin, Japan”. *Bull. Seism. Soc. Am.* 91 812–825, 2001.
- Stacey, R., “Improved transparent boundary formulations for the elastic wave equation”. *Bull. Seism. Soc. Am.* 78 2089–2097, 1988.
- Wald, D. J. and R. W. Graves, “The seismic response of the Los Angeles basin, California”. *Bull. Seism. Soc. Am.* 88 337–356, 1998.