

Habilitation à Diriger des Recherches

Université Paris VII - Paris Diderot

Source Sismique: Physique et Perspective pour Aléa

Hideo Aochi

BRGM, France

devra être soutenu le 13 mai 2009

devant le jury composé de

M. Pascal Bernard (Physicien IPGP)	Rapporteur
M. Michel Bouchon (DR CNRS – LGIT)	Rapporteur
M. Luis Rivera (Professeur Université Louis Pasteur – IPGS)	Rapporteur
M. Martin Mai (Chercheur ETHZ)	Examineur
M. Raul Madariaga (Professeur ENS Paris)	Examineur
M. Fabian Bonilla (Expert IRSN)	Examineur

Original manuscript on 22 November 2007

Revised on 20 March 2008 (figures added, Chap 7 modified).

Revised on 15 October 2008 (formatted and translated in French, Chaps 1, 2, 3 and 7 modified).

Revised on 14 January 2009 (references updated, Chaps 4, 5 and 6 modified).

Revised on 31 January 2009 (Chap 5 modified, figures added).

Revised on 5 February 2009 (Chaps 2, 4 and 6 modified, figures added).

Revised on 15 February 2009 (corrected after reviewers).

Revised on 27 February 2009 (for submission)

Résumé

Ce rapport résume mes travaux de recherche et présente un plan de perspective. Le titre est intitulé "Processus Dynamique de la Génération de Tremblement de Terre et son Implication vers l'Aléa Sismique" (Dynamic Earthquake Generation Process and its Implication towards to Seismic Hazard). Les travaux ont été réalisés essentiellement à l'Université de Tokyo, Japon (1995 — 2000), à l'Ecole Normale Supérieure de Paris, France (2000 — 2003), à l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, France (2003 — 2004) et au BRGM (French Geological Survey, 2004 — présent) au travers des différentes collaborations. Les recherches focalisent sur les deux centres d'intérêt suivants :

- Comment se passe-t-il un tremblement de terre, notamment au niveau de la source ?
- Comment contribuer au mieux au besoin du risque sismique ?

Pour atteindre ces buts, j'ai concentré mes recherches sur l'approche numérique et théorique, la méthodologie ainsi que la compréhension de la physique des phénomènes et l'application vers l'aléa sismique. Le résultat principal obtenu est la modélisation numérique de la rupture dynamique dans un système complexe de faille lors d'un séisme, par exemple le séisme de Landers en 1992, le séisme d'Izmit en 1999 etc. Il est démontré que ce processus dynamique contrôlé par la contrainte et le comportement de faille affecte le rayonnement des ondes sismique. L'effet de cette source dynamique est donc essentiel pour le mouvement sismique notamment en champ proche de source. Certains aspects de tremblements de terre peuvent être physiquement reproduits, c'est-à-dire, prédictibles. Cette prédictibilité ou non-prédictibilité sera le cœur de ma future recherche.

Table des matières

1	Information Personnelle (Personal Information)	4
1.1	Curriculum Vitae	4
1.2	Encadrement (Research Coordination)	8
1.3	Liste de Publication (Publication List)	9
2	Introduction Générale (General Introduction)	17
3	Originalité des recherches (Originality)	26
4	Numerical Methods	28
4.1	Introduction	28
4.2	Boundary Integral Equation Method	29
4.3	Finite Difference Method	31
4.4	Finite Element Method and Spectral Element Method	33
4.5	Hybrid Methods	35
5	Physics of the Earthquake Generation Process	37
5.1	Introduction	37
5.2	Fault Constitutive Law	40
5.3	Complex Fault Geometry	43
5.4	Fault Heterogeneity	49
5.5	Towards A Seismic Cycle	55
5.6	Dynamic Modeling of Earthquakes	57
6	Application to Seismic Hazard Studies	62
6.1	Introduction	62
6.2	Earthquake Scenarios	64
6.3	Strong Ground Motion	66

7 Perspectives scientifiques (Scientific Perspective)	71
7.1 Projet de recherche au BRGM (Research project in BRGM)	71
7.2 Source Sismique (Earthquake Generation Process)	75
7.3 Aléa Sismique (Seismic Hazard Study)	77
7.4 Conclusion	79
References	80
Remerciment (Acknowledgments)	90
Appendix	92
A Abstract of Papers	92
A.1 Aochi, H. and S. Ide (2008)	92
A.2 Aochi, H. and R. Ando (2008)	92
A.3 Douglas, J. and H. Aochi (2008)	93
A.4 De Michele, M., D. Racoules, H. Aochi, N. Baghdadadi and C. Carnec (2008) .	94
A.5 Cruz-Atienza, V., J. Virieux and H. Aochi (2007)	94
A.6 Douglas, J., H. Aochi, P. Suhadolc and G. Costa (2007)	95
A.7 Aochi, H. and J. Douglas (2006)	95
A.8 Aochi, H. O. Scotti and C. Berge-Thierry (2005)	96
A.9 Aochi, H. and K. B. Olsen (2004)	96
A.10 Aochi, H. and S. Ide (2004)	97
A.11 Aochi, H. and R. Madariaga (2003)	97
A.12 Aochi, H., E. Fukuyama, and R. Madariaga (2003)	98
A.13 Aochi, H., R. Madariaga, and E. Fukuyama (2002)	98
A.14 Aochi, H. and M. Matsu'ura (2002)	99
A.15 Aochi, H., E. Fukuyama and M. Matsu'ura (2000b)	99
A.16 Aochi, H., E. Fukuyama and M. Matsu'ura (2000a)	100
B Extrait of Papers	100
B.1 Aochi, H., M. Cushing, O. Scotti, C. Berge-Thierry (2006)	100
B.2 Ide, S. and H. Aochi (2005)	100
B.3 Aochi, H. and E. Fukuyama (2002)	100

Chapitre 1

Information Personnelle (Personal Information)

1.1 Curriculum Vitae

AOCHI, Hideo

Né le 7 août 1972 à Tokyo, Japon

Nationalité : Japonaise

Adresse actuel

BRGM (French Geological Survey)

Service Aménagement et Risques Naturels (Land Planning and Natural Risk Division)

3 avenue Claude Guillemin, 45060 Orléans Cedex, France

tel : (33) 2 38 64 35 00

fax : (33) 2 38 64 26 89

e-mail : h.aochi@brgm.fr

Formation

- Doctorat en Science, Department of Earth and Planetary Physics, The University of Tokyo, Japan, “Theoretical studies on dynamic rupture propagation along a 3D non-planar fault system” sous la direction de le Professeur Mitsuhiro Matsu’ura et le Dr. Eiichi Fukuyama, avril 1997 – mars 2000.
- Master en Science, Department of Earth and Planetary Physics, The University of Tokyo, Japan, “Slip- and time-dependent fault constitutive law and earthquake rupture process” sous la direction de le Professeur Mitsuhiro Matsu’ura, avril 1995 – mars 1997.

- Bachelor en Science, Department of Astronomy and Geophysics, Tohoku University, Japan, “Multi-fractal analysis on spatial pattern of seismicity” sous la direction de les Professors Masakazu Ohtake et Haruo Sato, avril 1991 – mars 1995.

Expériences professionnelles

- **Ingénieur expérimenté (Senior Research Scientist) : Service Aménagement et Risques Naturels, BRGM, France, janvier 2008 – présent.**
- **Chef de projet (Project Leader) : Service Aménagement et Risques Naturels, BRGM, France, janvier 2005 – présent.**
- Ingénieur confirmé (Research Scientist) : Service Aménagement et Risques Naturels, BRGM, France, septembre 2004 — décembre 2007.
- Chercheur postdoctoral : Bureau d’Evaluation du Risques Sismiques des Installations Nucléaires, Institute de Radioprotection et de Sûreté Nucleaire, France, février 2003 – septembre 2004 (contrat IRSN).
- Chercheur postdoctoral : Laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure Paris, France, avril 2000 — mars 2002 (bourse japonaise JSPS), avril – juillet 2002 (contrat CNRS), octobre 2002 – janvier 2003 (contrat ENS).
- Assistant de recherche (Assistant Staff) en temps partiel, The University of Tokyo, Japan, octobre 1998 – mars 2000.
- Assistant d’enseignement (Teaching Assistant) en temps partiel, The University of Tokyo, Japan, avril 1997 – septembre 1997.

Expériences invitées

- Chercheur invité (Invited Researcher) : Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Japan, janvier -- février 2003, février 2006, octobre 2007.
- Chercheur invité : Institute for Crustal Study, University of California Santa Barbara, USA, août 2002 – septembre 2002.

Prix, Distinction

- Prix pour jeune sismologue, Seismological Society of Japan, mai 2007.
- Postdoctoral fellowships for research abroad, Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), avril 2000 – mars 2002.

Enseignement

- Sismologie (for undergraduate students), Ecole Normale Supérieure Paris, France, 2002.
- Calcul scientifique (for undergraduate students), The University of Tokyo, Japan, 1995.

Autres expériences

- Jury de thèses : V. Cruz-Atienza, Rupture Dynamique des Failles Non-Planaires en Différences Finies, Université Nice-Sofia-Antipolis, mai 2006 (examinateur). F. Semmane, Caractérisation de la source sismique à partir des données en champs proche. Application aux séismes de Tottori (Japon) et Boumerdes (Algérie), Université Joseph-Fourier, mai 2005 (examinateur).
- Evaluation de propositions de recherche (NSF, ANR)
- Membre de Seismological Society of Japan (depuis 1995), American Geophysical Union (depuis 1997), European Geoscience Union (depuis 2000), Association Française de Génie Parasismique (depuis 2005).

Participation aux projets à cofinancement (Financed Project Participations) (extrait)

- “Liens entre complexité de la faille, essaimage de la sismicité et vitesse de rupture : l’importance de l’étude de la Faille Nord Anatolienne (SUPNAF)”, coordonné par le Dr. Jean Schmittbul, financé par Agence Nationale de Recherche (programme Risques Naturels), France, 2009 – 2011.
- “DEvelopment of Broadband Acceleration Time histories for engineers (DEBATE)”, coordonnée par Hideo Aochi, financé par Agence Nationale de Recherche (programme Risques Naturels), France, 2009 — 2011.
- “Rhéologie des Aspérités de Faille : Rôle des Fluides - Intégration à l’Echelle du Cycle Sismique”, coordonné par Dr. Renaud Toussaints, financé par Institute National des Sciences de l’Universe, France, 2007.
- “Adaptation et optimisation des performances applicatives sur architectures NUMA : Etude et mise en oeuvre sur des application en sismologie (NUMASIS)”, coordonné par Dr. Jean Francois Mehaut, financé par Agence Nationale de Recherche (programme Calcul Intensif), France, 2006 – 2008.
- “Quantitative Seismic Hazard Analysis (QSHA)”, coordonné par le Professor Jean Virieux, financé par Agence Nationale de Recherche (programme Catastrophes Telluriques et Tsunamis), France, 2006 – 2008.
- “Seismic simulation in complex source-site context (SEISMULATORS)”, coordonnée par Hi-

- deo Aochi, finance par Agence Nationale de Recherche (programme Catastrophes Telluriques et Tsunamis), France, 2006 – 2008.
- “Special Project for Earthquake Disaster Mitigation in Urban Area (Dai-Dai-Toku)” financé par Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan, 2002 – 2007.
 - “How Can We Improve Ground Motion Estimates by Lessons Learned From Rupture Dynamics?” coordonné par Dr. Kim Olsen, finance par Southern California Earthquake Center, USA, 2002 – 2007.
 - “APEC Cooperation for Earthquake Simulation (ACES)” financé par Australia, China, Japan and USA, 1999 – 2004.
 - “3D modeling of crustal deformation and tectonic stress loading process around Japan” coordonné par le Professor Mitsuhiro Matsu’ura, finance par Ministry of Education, Japan, 1995 – 1997.

Organisation

- Convener de la session “Dynamic earthquake rupturing at various scale”, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, décembre 2008.
- Chairman de la session “Characterisation des mouvements forts”, the 7th national colloquium of the Association Française de Génie Parasismique, Chatenay-Malabry, France, juillet 2007.
- Co-convener de la session “Fault zone properties and behaviors in earthquakes”, Western Pacific Geophysics Meeting of AGU, Beijing, China, juillet 2006.
- Co-organizer of the international joint workshop “New Trends in Seismic Vulnerability and Risk Assessment” with the Kobe University, Orléans, France, décembre 2005.

1.2 Encadrement (Research Coordination)

En tant que chef de projet dans un organisme public, les expériences d'encadrement acquises sont essentiellement la coordination de projets et le management des équipes d'ingénieurs.

Encadrement d'étudiants et de postdocs

- Florent De Martin (BRGM), collaboration dans le cadre de sa thèse sur le couplage des simulations de la propagation des ondes en différence finie et de l'effet nonlinéaire du sol en éléments finis (directeur : Professeurs Arezou Modaressi et Hiroshi Kawase), 2007 – 2009.
- Fabrice Dupros (BRGM), collaboration dans le cadre de sa thèse sur l'optimisation du code en différence finie (directeur : Professeurs Jean Roman et Dimitri Komatitsch), 2007 – 2009.
- Jérôme Salichon (BRGM), CDD sur l'étude du séisme des Saintes en 2004 en Antilles, 2006 – 2007.
- Victor Cruz-Antienza (Université de Nice-Sophia-Antipolis), collaboration dans le cadre de sa thèse sur la comparaison des méthodes entre les équations intégrales et les différences finies (directeur : Professeur Jean Virieux), 2004 – 2006.
- Plusieurs (co-)encadrements de stagiaires (master, école ingénieur).

Coordination de projets

- **Coordination de projet national “DEvelopment of Broadband Acceleration Time histories for Engineers (DEBATE)” (BRGM, ENS Paris, IRSN, Géodynamique & Structure), Agence Nationale de Recherche (programme Risques Naturels), France, 2009 — 2011.**
- **Coordination de projet national “SEISmic siMULATion of complex sOUrce-Site context (SEISMULATORS)” (BRGM, IPGP, ENS Paris, ECP, IRSN), Agence Nationale de Recherche (program Catastrophes Telluriques et Tsunamis), France, 2006 – 2008. (<http://seismulators.brgm.fr>)**
- **Chef de projet cadre “Risques sismiques”, BRGM, France, 2005 – présent.**
 - **Coordination de l'ensemble de projets en cours au BRGM sur la thématique. (7 projets sous contrat externe en fin 2008)**
 - **Coordination des actions internes de recherche sur la thématique. (4,5 personne.an sur l'année 2008)**
- Project fellow “Theoretical study on rupture processes of interacting complex fault systems”, Japan Society for the Promotion of Science, Japan, 2000 – 2002.

1.3 Liste de Publication (Publication List)

updated on 31 December 2008.

Theses

1. Aochi, H., Theoretical studies on dynamic rupture propagation along a 3D non-planar fault system, PhD thesis, University of Tokyo, Japan, March 2000.
2. Aochi, H., Slip- and time-dependent fault constitutive law and earthquake rupture process, Master thesis, University of Tokyo, Japan, March 1997 (in Japanese).

Book

1. Uenishi, K., N. Kame and H. Aochi, Seismology - Quantitative Approach - (Translation of "Quantitative Seismology Second Edition" by K. Aki and P. G. Richards), pp.909, Kokin Shoin, Tokyo, Japan, 2004 (in Japanese).

Papers in refereed journals

1. Aochi, H. and S. Ide, Complexity in earthquake sequences controlled by multi-scale heterogeneity in fault fracture energy, *in press, J. Geophys. Res.*, 2008.
2. Aochi, H. and R. Ando, Numerical simulations on faulting : Microscopic evolution, macroscopic interaction and rupture process of earthquakes, *in press, J. Seism. Soc. Japan*, 2008.
3. Douglas, J. and H. Aochi, A survey of techniques for predicting earthquake ground motions for engineering purposes, *Surv. Geophys.*, **29**, 187–220, 2008.
4. de Michele, M. D. Racoules, H. Aochi, N. Baghdadadi and C. Carnez, Measuring coseismic deformation on the northern segment of the Ban-Baravat escarpment associated with the 2003 Bam (Iran) earthquake, by correlation of very-high-resolution satellite imagery, *Geophys. J. Int.*, **173**, 459–464, 2008.
5. Cruz-Atienza, V., J. Virieux and H. Aochi, 3D Finite-Difference Dynamic-Rupture Modelling Along Non-Planar Fault, *Geophysics*, **72**(5), SM123–SM137, 2007.
6. Douglas, J., H. Aochi, P. Suhadolc and G. Costa, The importance of crustal structure in explaining the observed uncertainties in ground motion estimation, *Bull. Earthq. Engineering*, **5**, 17–26, 2007.
7. Aochi, H. and J. Douglas, Testing the validity of simulated strong ground motion from the dynamic rupture of a fault system, by using empirical equations, *Bull. Earthq. Engineering*, **4**, 211–229, 2006.

8. Aochi, H., M. Cushing, O. Scotti, and C. Berge-Thierry, Estimating rupture scenario likelihood based on dynamic rupture simulations : the example of the segmented Middle Durance fault, southeastern France, *Geophys. J. Int.*, **165**, 436-446, 2006.
9. Ide, S. and H. Aochi, Earthquakes as multiscale dynamic ruptures with heterogeneous fracture surface energy, *J. Geophys. Res.*, *110*, B11303, doi :10.1029/2004JB003591, 2005.
10. Aochi, H., O. Scotti, and C. Berge-Thierry, 3D dynamic rupture propagation along complex segments with different mechanisms, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L21304, doi :10.1029/2005GL024158, 2005.
11. Aochi, H. and K. B. Olsen, On the effects of non-planar geometry for blind thrust faults on strong ground motion, *Pure appl. Geophys.*, **161**, 2139-2153, 2004.
12. Aochi, H. and S. Ide, Numerical Study on Multi-Scaling Earthquake Rupture, *Geophys. Res. Lett.*, **31**(2), 10.1029/2003GL018708, 2004.
13. Aochi, H. and R. Madariaga, The 1999 Izmit, Turkey, earthquake : Non-planar fault structure, dynamic rupture process and strong ground motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 1249-1266, 2003.
14. Aochi, H. and E. Fukuyama and R. Madariaga, Constraints of Fault Constitutive Parameters Inferred from Non-planar Fault Modeling, *Geochimistry, Geophysics, Geosystems*, **4**(2), 10.1029/2001GC000207, 2003.
15. Aochi, H. and M. Matsu'ura, Slip- and time-dependent fault constitutive law and its significance in earthquake generation cycles, *Pure appl. Geophys.*, **159**, 2029-2044, 2002.
16. Aochi, H., R. Madariaga and E. Fukuyama, Effect of Normal Stress During Rupture Propagation along Non-planar Fault, *J. Geophys. Res.*, **107**(B2), 10.1029/2001JB000500, 2002.
17. Aochi, H. and E. Fukuyama, Three-dimensional nonplanar simulation of the 1992 Landers earthquake, *J. Geophys. Res.*, **107**(B2), 10.1029/2000JB000061, 2002.
18. Aochi, H., E. Fukuyama and M. Matsu'ura, Selectivity of spontaneous rupture propagation on a branched fault, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 3635-3638, 2000b.
19. Aochi, H., E. Fukuyama and M. Matsu'ura, Spontaneous Rupture Propagation on a Non-planar Fault in 3D Elastic Medium, *Pure appl. Geophys.*, **157**, 2003-2027, 2000a.

Proceedings of Conferences

1. Dupros, F., H. Aochi, A. Ducellier, D. Komatitsch, and J. Roman, Exploiting intensive multi-threading for efficient simulation of seismic wave propagation, 11th International Conference on Computational Science and Engineering, San Paulo, Brazil, July 2008.

2. De Martin, F., H. Aochi and H. Modaressi, Reponse dynamique d'une vallee alpine sous excitation sismique, 7eme Colloque National AFPS, A093, Chatenay-Malbrey, France, July 2007.
3. De Martin, F., H. Modaressi, and H. Aochi, Coupling of FDM and FEM in seismic wave propagation, 4th international conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Paper No. 1743, Thessaloniki, Greece, June 2007.
4. Bernardie, S., H. Aochi, H. Modaressi and R. Madariaga, Some Insights on Dynamic Rupture Modelling Using a Finite Element Method, 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, September 2006.
5. Douglas, J., H. Aochi, P. Suhadolc and G. Costa, On the applicability of one-dimensional crustal structures for ground-motion simulation, 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, September 2006.
6. Aochi, H., J. Rey and J. Douglas, Numerical Simulation of Wave Propagation in the Grenoble Basin : Benchmark ESG2006, 3me International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France, August 2006.
7. Douglas, J., H. Aochi, P. Suhadolc, G. Costa, The importance of crustal structure in explaining the observed uncertainties in ground motion estimation, International Conference on Earthquake Engineering in 21 Century, Skopje, Macedonia, August 2005.
8. Aochi, H., E. Durukal and L. F. Bonilla, Assessment of Lateral Spreading : Modeling a Case from the 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake, the 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and the 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Berkeley, USA, January 2004.
9. Aochi, H. and E. Fukuyama, Scrutiny of the 3-D non-planar fault model of the 1992 Landers earthquake, in Proceedings of the 2nd ACES Workshop, edited by M. Matsu'ura, K. Nakajima and P. Mora, 335-341, 2001.
10. Olsen, K. B., E. Fukuyama, H. Aochi and R. Madariaga, Hybrid modeling of curved fault radiation in a 3D heterogeneous medium, in Proceedings of the 2nd ACES Workshop, edited by M. Matsu'ura, K. Nakajima and P. Mora, 343-349, 2001.
11. Aochi, H., and M. Matsu'ura, Evolution of contacting rock surfaces and a slip- and time-dependent fault constitutive law, in APEC Cooperation for Earthquake Simulation (ACES), 1st ACES Workshop Proceedings, edited by P. Mora, 135-140, 1999.
12. Hirata, N., T. Iwasaki, H. Aochi and M. Matsu'ura, Modeling of plate boundaries and intra-arc active fault systems in and around Japanese islands, in APEC Cooperation for Earthquake Simulation (ACES), 1st ACES Workshop Proceedings, edited by P. Mora, 171-175, 1999.

13. Aochi, H., E. Fukuyama and M. Matsu'ura, An expression of stress field in 3D elastic medium using boundary integral equation method, in APEC Cooperation for Earthquake Simulation (ACES), 1st ACES Workshop Proceedings, edited by P. Mora, 239-245, 1999.

Abstracts in conference proceedings (selected)

1. De Michel, M., . Raucoules, J. Salichon, A. Lemoine and H. Aochi, Mapping deformation field prior to an earthquake : InSAR observations 1993-2004 before the Mw6.0 Parkfield event, Eos Trans, AGU, 89(53), Fall Meet. Suppl., Abstract S21B-1816, San Francisco, USA, December 2008.
2. Raucoules, D., M. De Michel, H. Aochi and C. Carnec, Mapping the earthquake rupture and displacement field using correlation of ALOS PALSAR amplitude images : Application to the Mw7.9 Sichuan earthquake, 12 May 2008, Eos Trans, AGU, 89(53), Fall Meet. Suppl., Abstract G33C-0703, San Francisco, USA, December 2008.
3. Kame, N. and H. Aochi, A hybrid FDM-BIEM approach for dynamic rupture simulation, Eos Trans, AGU, 89(53), Fall Meet. Suppl., Abstract S51D-1763, San Francisco, USA, December 2008.
4. Poisson, B. and H. Aochi, Effect of fault geometry on earthquake rupture migration induced by fluid injection, Eos Trans, AGU, 89(53), Fall Meet. Suppl., Abstract S51D-1771, San Francisco, USA, December 2008.
5. Aochi, H. and S. Ide, Complexity in earthquake sequences controlled by multi-scale heterogeneity in fault fracture energy, Eos Trans, AGU, 89(53), Fall Meet. Suppl., Abstract S51D-1779, San Francisco, USA, December 2008.
6. Aochi, H. and A. Kato, Three-dimensional non-planar dynamic rupture process of the 2007 Mw6.6 Niigata-ken Chuetsu-Oki, Japan, earthquake, Japan Geoscience Union Meeting, Chiba, May 2008.
7. Kame, N. and H. Aochi, A hybrid FDM-BIEM approach for dynamic rupture simulation : Part II, Japan Geoscience Union Meeting, Chiba, May 2008.
8. Aochi, H. and S. Ide, Multi-scale heterogeneous fault system for dynamic rupture events during a seismic cycle, Seismological Society of Japan Fall Meeting, Sendai, Japan, October 2007.
9. Aochi, H., J. Douglas, S. Ide, Heterogeneous dynamic rupture modeling for strong ground motion simulation, Geophysical Research Abstracts, 9, 05591, Vienna, Austria, 2007.
10. Aochi, H. and S. Ide, Numerical simulation of temporal evolution of multi-scale earthquake rupture, Geophysical Research Abstracts, 9, 05583, Vienna, Austria, 2007.

11. Aochi, H., J. Salichon and A. Lemoine, Validation of teleseismic inversion of the 2004 Les Saintes, Lesser Antilles, earthquake (Mw6.3) from 3D finite-difference forward modelling, Geophysical Research Abstracts, 9, 05465, Vienna, Austria, 2007.
12. Aochi, H., Dynamic rupture modelling along a fault system, Eos Trans, AGU, 87(36), West. Pac. Geophys. Meet. Suppl., Abstract S35A-04, Beijing, China, 2006 (invited).
13. Aochi, H., J. Le-Puth and S. Ide, Attempts at using a dynamic rupture source model for ground-motion simulations, Eos Trans, AGU, 87(36), West. Pac. Geophys. Meet. Suppl., Abstract S11E-0160, Beijing, China, 2006.
14. Jousset, P. and H. Aochi, Regional scale numerical simulation of wave propagation for seismic hazard evaluation study, Geophysical Research Abstracts, 8, 02396, Vienna, Austria, April 2006.
15. Lemoine, A., H. Aochi, G. Bertrand, J. Lambert, C. Lembezat and T. Winter, Source parameters inversion using macroseismic data in a moderately seismic context (France), Geophysical Research Abstracts, 8, 04454, Vienna, Austria, April 2006.
16. Ide, S. and H. Aochi, Rupture propagation and seismic energy radiation along fault surfaces of fractal characteristics, Eos Trans. AGU, 86 (52), Fall Meet. Suppl., Abstract, S51F-01, 2005.
17. Aochi, H., M. Seyedi, J. Douglas, E. Foerster and H. Modaressi, A complete BIEM-FDM-FEM simulation of an earthquake scenario - dynamic rupture process, seismic wave propagation and site effects, Geophysical Research Abstracts (European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, April), 7, 02589, 2005.
18. Aochi, H. and S. Ide, Numerical simulation of cascade and pre-slip rupture models, Geophysical Research Abstract (European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, April 2005), 7, 02602, 2005.
19. Aochi, H., C. Berge-Thierry, E. Cushing, O. Scotti and Ph. Volant, Probabilistic and dynamic approaches of earthquake scenarios in the Moyenne Durance, France, XXIX General Assembly of European Seismological Commission, Potsdam, Germany, September 2004.
20. Ide, S. and H. Aochi, Multiscale dynamic rupture simulation on fractal patch model, Western Pacific Geophysics Meeting, Hawaii, USA, August 2004.
21. Aochi, H., O. Scotti and C. Berge-Thierry, Importance of Intermediate Principal Stress Magnitude in Dynamic Rupture Propagation in 3D, Eos Trans. AGU, 84(47), Fall Meet. Suppl., Abstract S21G-05, 2003.
22. Ide, S. and H. Aochi, Numerical Study on Multi-Scaling Earthquake Rupture, Eos Trans. AGU, 84(47), Fall Meet. Suppl., Abstract S42D-0199, 2003.

23. Berge-Thierry, C., H. Aochi, E. Cushing, O. Scotti and P. Volant, Scenario Earthquake in the Moyenne Durance, South-Eastern France, *Eos Trans. AGU*, 84(47), Fall Meet. Suppl., Abstract S41C-0104, 2003.
24. Aochi, H. and S. Ide, Numerical Study on Multi-Scaling Earthquake Rupture, Fall Meeting of SSJ, Kyoto, Japan, October 2003 (in Japanese).
25. Aochi, H. and R. Madariaga, Dynamic modeling of the 1999 Izmit, Turkey earthquake on non-planar fault models, *Eos Trans. AGU*, 83(47), Fall Meet. Suppl., Abstract NG62A-0939, 2002.
26. Olsen, K. B. and H. Aochi, On the effects of non-planar fault geometry on strong ground motion, *Eos Trans. AGU*, 83(47), Fall Meet. Suppl., Abstract S12B-1209, 2002.
27. Aochi, H. and R. Madariaga, Fault parameters of the 1999 Izmit earthquake inferred from accerelogram near the fault, *Geophysical Research Abstracts*, 4, 27th General Assembly of the European Geophysical Society, EGS02-A-00618, 2002.
28. Aochi, H., K. B. Olsen, E. Fukuyama and R. Madariaga, Hybrid simulation of dynamic rupture and seismic wave propagation, *Geophysical Research Abstracts*, 4, 27th General Assembly of the European Geophysical Society, EGS02-A-00619, 2002.
29. Aochi, H. and R. Madariaga, The 1999 Izmit, Turkey, earthquake, Non-planar fault structure, dynamic rupture process and strong ground motion, *EOS Trans, American Geophysical Union*, 82(47), Fall Meeting Suppl., Abstract S31C-04, 2001.
30. Aochi, H., E. Fukuyama and R. Madariaga, Dynamic rupture modeling with non-planar faults and generation of strong motion, Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting, Tokyo, Japan, July 2001.
31. Aochi, H., R. Madariaga and E. Fukuyama, Constraint of fault properties on strong motion based on non-planar fault modeling, *Geophysical Research Abstracts*, 3, 26th General Assembly of the European Geophysical Society, 911, 2001.
32. Aochi, H., E. Fukuyama and R. Madariaga, Effect of normal stress on a dynamic rupture along non-planar fault, *EOS Trans AGU*, 81(48), Fall Meeting Suppl., Abstract T21G-02, 2000.
33. Aochi, H., and E. Fukuyama, A New Approach for the Non-Planar Fault Modeling of Dynamic Rupture During the 1992 Landers Earthquake, *EOS Trans AGU*, 81(22), Western Pacific Geophysics Meeting, S51D-02, 2000.
34. Aochi, H., E. Fukuyama and M. Matsu'ura, 3D Non-planar Simulation of the 1992 Landers Earthquake, 25th General Assembly of EGS, Nice, France, April 2000.
35. Aochi, H., E. Fukuyama and M. Matsu'ura, Dynamics of Rupture Propagation on 3D Complex Faults, *EOS Trans AGU*, 80(46), Fall Meeting Suppl., S51E-04, 1999.

36. Aochi, H., E. Fukuyama and M. Matsu'ura, Dynamics of Branching Faults, Seismological Society of Japan Fall Meeting, Sendai, Japon, November 1999 (in Japanese).
37. Aochi, H., E. Fukuyama and M. Matsu'ura, Dynamic rupture simulation on a bending fault using 3D BIEM, Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting, Tokyo, Japon, June 1999 (in Japanese).
38. Aochi, H., and M. Matsu'ura, 3D-simulation of spontaneous earthquake rupture processes with a slip- and time-dependent constitutive law, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, December 1998.
39. Aochi, H., E. Fukuyama and M. Matsu'ura, Expression of 3D stress field by boundary integral equation : In order to describe rupture process on arbitrary fault shape, SSJ Fall Meeting, Fukui, Japon, October 1998 (in Japanese).
40. Aochi, H., and M. Matsu'ura, Spontaneous Rupture Stop on Earthquake Faults with a Slip- and Time-dependent Constitutive Law, The 29th General Assembly of the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, Thessaloniki, Greece, August 1997.
41. Matsu'ura, M. and H. Aochi, Slip- and Time-Dependent Fault Constitutive Law and its Implication in Earthquake Generation Physics, The 29th General Assembly of IASPEI, Thessaloniki, Greece, August 1997.
42. Aochi, H. and M. Matsu'ura, Physical significance of fault constitutive law inferred from analysis of one freedom system, JEPS Joint Meeting, Nagoya, Japan, March 1997 (in Japanese).
43. Matsu'ura, M. and H. Aochi, Natural Extension of the Slip-Dependent Friction Law by Considering a Healing Mechanism, AGU Fall Meeting, San Francisco, December 1996.
44. Aochi, H., T. Iwasaki and M. Matsu'ura, 3D shape of fault boundary in and around Japan, SSJ Fall Meeting, Mito, Japan, September 1996 (in Japanese).
45. Aochi, H. and M. Matsu'ura, Mechanism of healing process and generalization of fault constitutive law, SSJ Fall Meeting, Mito, Japan, September 1996 (in Japanese).

Other articles

1. Foerster, E., H. Aochi, R. Pedreros and H. Modaressi, La modélisation numérique : un outil majeur pour les risques naturels, Géosciences (BRGM's journal for a sustainable Earth), N°6, 36-45, 2007. (in French)
2. Aochi, H., The role of fault continuity at depth in numerical simulations of earthquake rupture, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **78**, 75-82, 2003.

3. Aochi, H. and R. Madariaga, The role of fault geometry in numerical simulation of earthquake rupture, Tech. Note, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED), Tsukuba, Japan, 234, 186-194, 2002.
4. Aochi, H., Fault geometry and simulation of dynamic rupture process, *Newsletter of Seismological Society of Japan*, **13**, 8-11, 2001. (review in Japanese)
5. Aochi, H., and M. Matsu'ura, Slip- and time-dependent constitutive law as a governing equation for earthquake generation process, *Chikyū (Earth) Monthly*, **20**, 528-533, 1998. (in Japanese)
6. Tsutsui et al. (68 co-authors), Seismic Velocity Structure Beneath Kirishima Volcanoes with Differential Analysis of Explosion Experiment, *Kazan (Volcano)*, **41**, 227-241, 1996 (in Japanese).
7. Kagiya et al. (68 co-authors), 1994 Explosion Experiment in Kirishima Volcanoes, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **70**, 33-60, 1995. (in Japanese)

Chapitre 2

Introduction Générale (General Introduction)

Je me sens toujours familier avec les termes “tremblements de terre”, même si je n’ai jamais vécu un tel désastre. Pendant ma vingtaine d’années passées au Japon, il y a eu plusieurs séismes destructeurs tels que le Nihon-kai Chubu-oki en 1983, le Nagano-ken Seibu en 1984, le Hyogo-ken Nanbu (Kobe) en 1995 et bien d’autres... Ils sont illustrés dans la Figure 2.1. Dans les années 80, nous avons appris à l’école que le prochain séisme dans la région Tokai (M7.5), sud-ouest de Tokyo, est prédictible. A chaque fois que le gouvernement donne une alerte, les élèves rentrent immédiatement chez eux et se préparent pour le séisme à venir. Seulement 20 ans après, une telle alerte n’a jamais été sonnée et ce séisme n’a pas encore lieu...

La cartographie de l’aléa sismique probabiliste au Japon a été publiée il y a quelques années. Un exemple vous est montré dans la Figure 2.2). L’endroit près de subductions comme la région Tokai est toujours coloré avec une probabilité très élevée d’un mouvement fort même par rapport à la durée de la vie humaine. J’ai compris maintenant qu’il est extrêmement compliqué de prédire un prochain tremblement de terre, car le mécanisme du séisme (processus de génération de séisme) est tellement complexe. A ce jour, nous n’avons pas suffisamment de connaissances ni sur l’intérieur de la Terre, ni sur la mécanique de cette rupture et de sa déformation. Nous ne sommes donc pas capables d’établir le système déterministe pour la prédiction.

Dans la plupart de cas, des séismes ont lieu en profondeur et on ne peut ni observer ni mesurer ces sources directement sur place. Les observations sismologiques et géodésiques sont limitées à la surface de la Terre ou à proximité de la surface. A l’interprétation de ces données, nous obtenons une image de la source sismique. Dans certains cas, nous constatons une trace de source sismique visible sur la surface de la Terre (Figure 2.3), par exemple des grands séismes récents (environ une magnitude 7 ou plus) peu profonds ou des grands séismes très anciens qui montaient en surface suite à la déformation terrestre à long terme. Une de mes premières observations sur terrain était au centre

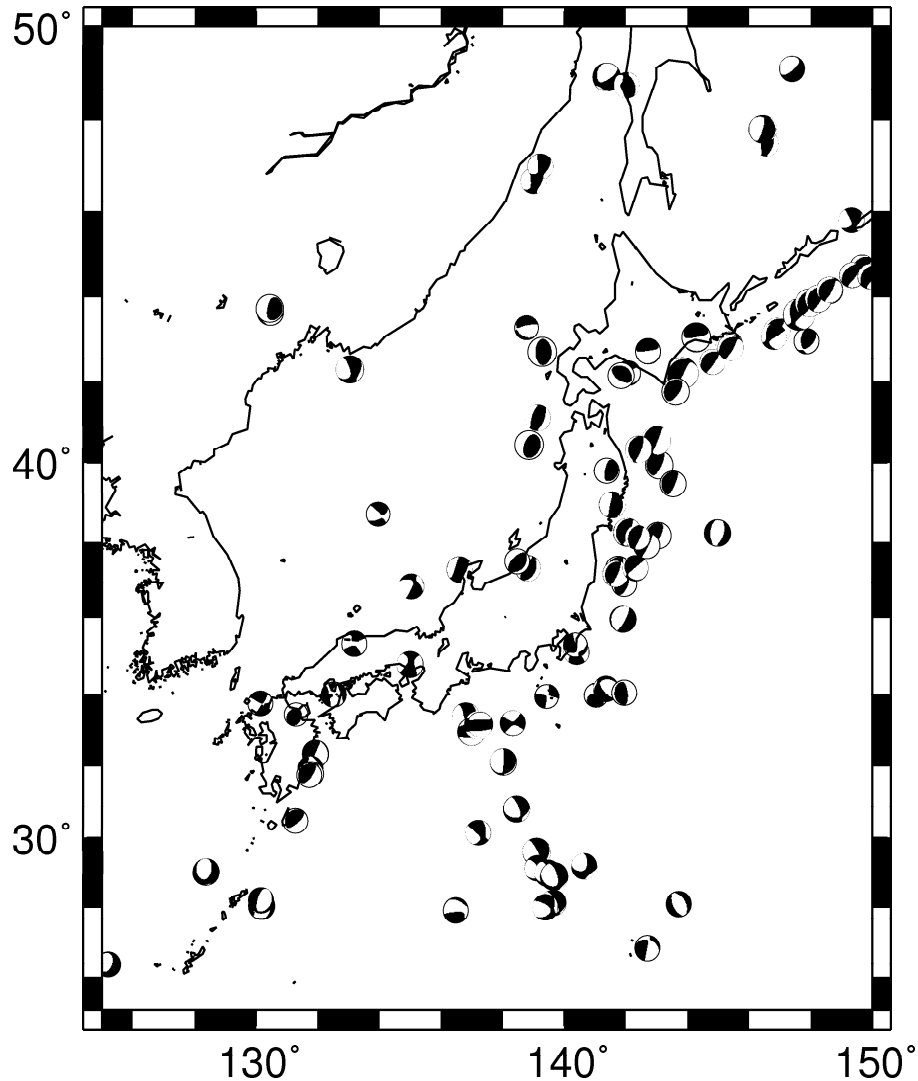
Harvard CMT Catalog ($M_w > 6.5$) 1980 - 2007

FIGURE 2.1 – Seismicity around Japan (Controid Moment Tensor solutions from the Havard catalog between the year 1980 and 2007, whose moment magnitude M_w are equal or larger than 6.5). As major damaging earthquakes, there occurred the 1983 Nihon-kai Chubu ($M7.7$), the 1993 Hokkaido Nansei-oki ($M7.8$), the 1995 Hyogo-ken Nanbu ($M7.3$), the 2000 Tottori-ken Seibu ($M7.3$), the 2001 Geiyo ($M6.7$), the 2003 Kushiro-Oki ($M8.0$), the 2004 Niigata-ken Chuestu ($M6.8$), the 2005 Fukuoka-ken Seiho-oki ($M7.0$), the 2007 Noto-hanto ($M6.9$), the 2007 Niigata-ken Chuestu-Oki ($M6.8$) and the 2008 Iwate-Miyagi-Nairiku ($M7.2$), for example (Japan Meteorological Agency).

du Japon, dans une partie de la zone de faille Itoigawa-Shizuoka où l'aléa sismique est très élevé en direction sud nord (toute la largeur du centre du Japon) dans la Figure 2.2. Les failles (traces de rupture) anciennes ont eu lieu en profondeur et sont montées vers la surface ultérieurement.

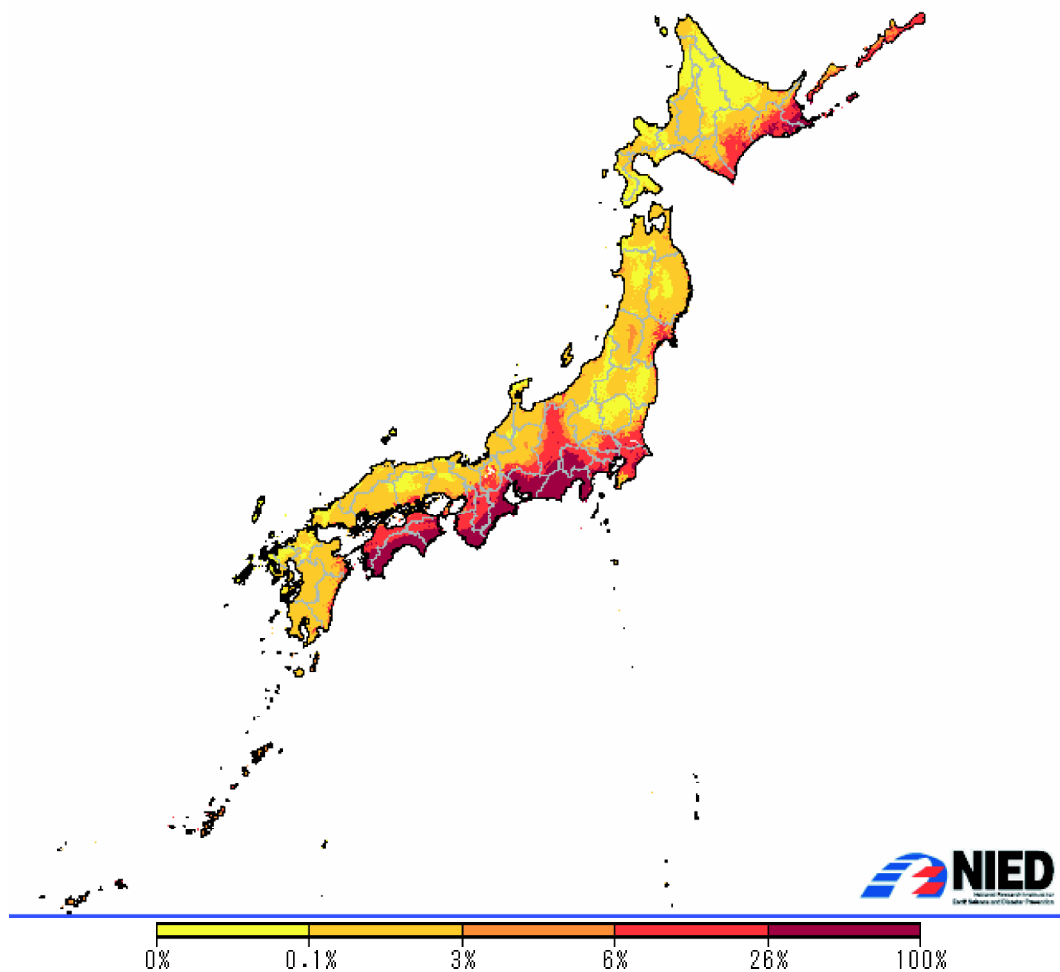


FIGURE 2.2 – National seismic hazard map for Japan (J-SHIS) published by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED). The color scale shows the probability of ground motions equal to or larger than JMA intensity 6 lower within 30 years beginning on the date of January 1, 2007.

Il est impressionnant de voir des traces de rupture (plutôt très fines) et des pseudotachylites qui devaient être générées et déformées par le glissement très rapide lors du séisme. Un géologue m'a expliqué qu'une faille devient très résistante après un séisme (due à cette "pseudotachylité"). Par conséquent, le séisme suivant casse une autre trace. Cette explication concorde avec le modèle de faille présenté dans la Figure 5.4?? J'ai aussi visité la faille San Andreas, une trace du séisme de San Francisco en 1906. La déformation (surtout la discontinuité au travers de faille) est très évident à voir, même pour les amateurs! Il est étonnant que la déformation soit aussi localisée autour d'une trace claire. Par contre, une autre visite à la faille de Moyenne Durance (sud-est de la France) a nécessité beaucoup de mon imagination afin de figurer comment elle est. Malheureusement jusqu'à présent, je n'ai pas encore eu l'occasion de voir les failles de Landers et d'Izmit, pour lesquelles j'ai

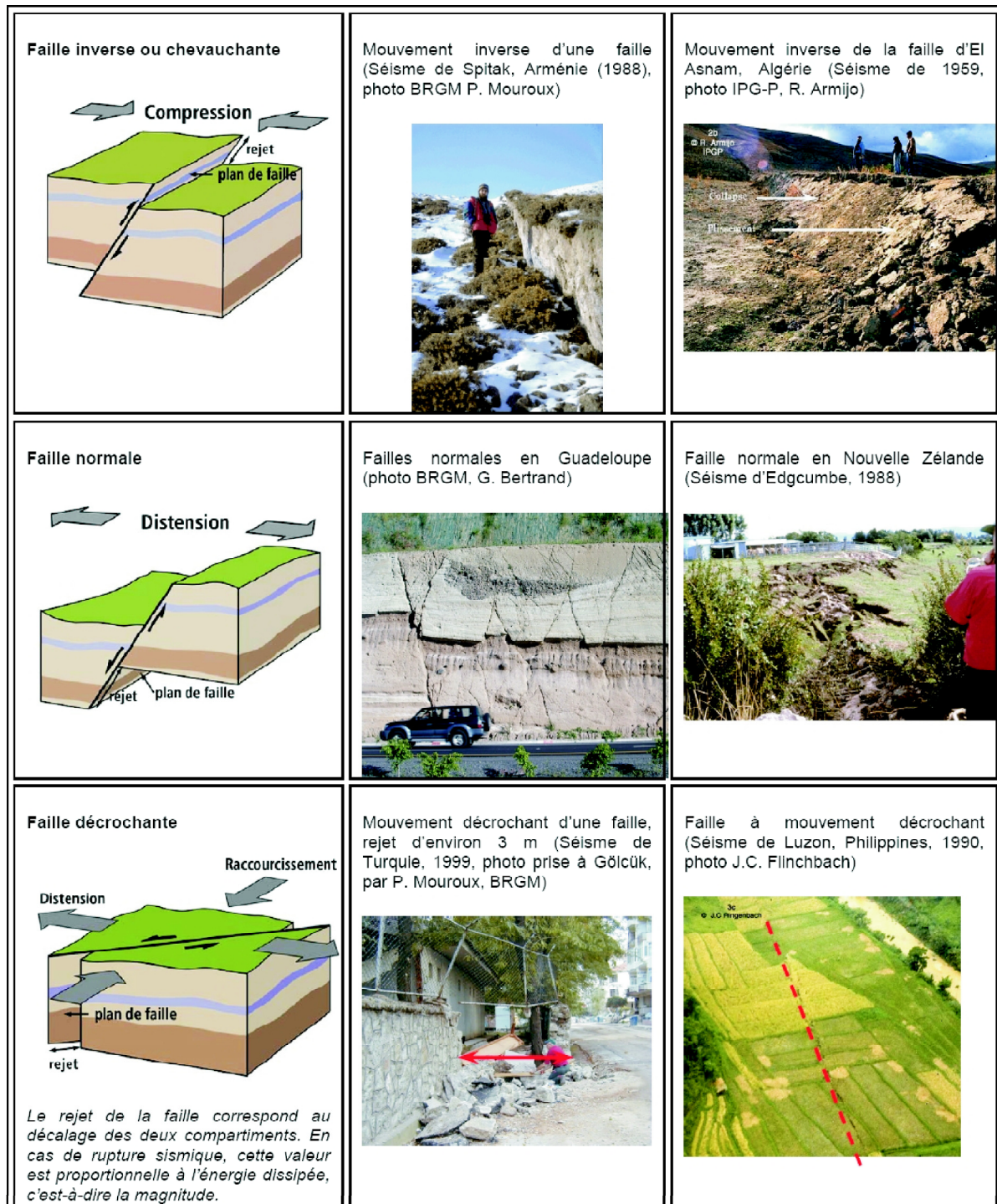


FIGURE 2.3 – Illustration of earthquake faultings (reverse, normal and strike-slip faultings from top to down) with some photos of the faults. After Terrier (2006).

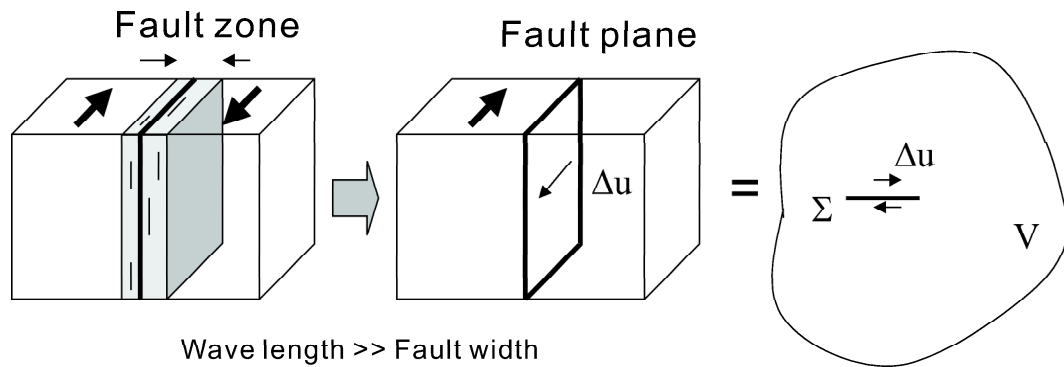


FIGURE 2.4 – Schematic illustration of fault description. Geological fault consists of rheologically complex fault zone including main fracture plane, fracture zone and damaged zone. In seismological description, wavelength of interest is usually much longer than the fault zone so that fault relative movement is mapped as discontinuity along fault plane. This is equivalent to the internal interface problem in an elastic medium.

tellement travaillé en modélisation.

Ainsi le champ où les tremblements de terre ont lieu semble très varié et leur processus semble complexe. Néanmoins dans le cas où l'on envisage de comprendre ces phénomènes par modélisation, il faut simplifier les éléments sans perdre l'essentiel du mécanisme. “Le processus est dominé par la physique”. Je voudrais mettre en plus l'accent sur le fait que certains aspects des tremblements de terre sont compréhensibles d'un point de vue physique. Mes activités de recherche le démontrent. Quand nous regardons réellement une faille cassée pendant le séisme, nous savons que le processus de rupture est très complexe. Une interface (discontinuité) est très fine tout au long de la fissure mais la zone de faille se forme avec plusieurs traces de fissure et des rochers fondus et endommagés. Physiquement parlant, les études sismologiques sont souvent limitées à certaine bande d'échelle (longueur d'onde). Par conséquent, la complexité à petite échelle peut être homogénéisée (Figure 2.4). La zone volumétrique de faille est considérable comme une plane de faille et toute la complexité est projetée comme une relation constitutive de faille sur cette interface (comportement de faille). Cette approximation s'accorde bien avec la théorie de représentation en sismologie et en élastodynamique où une interface de fissure (faille) est supposée sans épaisseur dans le milieu élastique et que le comportement non-linéaire concernant cette faille (domaine source) est traduit en forme de mouvement induit le long de l'interface.

On peut diviser ce problème en deux : le premier est de connaître la réponse du milieu, qui est décrit par un système des équations de mouvement en milieu continu bien connues ; le second est de comprendre comment décrire le domaine de source incluant le comportement non-linéaire de la rupture. L'imagerie du mouvement sur la surface de faille lors d'un séisme peut être obtenue par inversion notamment à partir des sismogrammes en base fréquence. Cette optique a eu beaucoup de

succès dans la compréhension “cinématique” du rayonnement des ondes par une faille. Cependant les deux aspects mécaniques mentionnés ci-dessus devront être associés afin de mieux comprendre la physique dans ce phénomène de rupture, c’est-à-dire que se passe-t-il vraiment le long de la faille pendant un séisme ? Il faut noter ici que le processus de rupture est en fait “spontané” selon certaine loi physique qui contrôle la condition de contrainte et de mouvement sur cette faille et la réponse dynamique du milieu en voisinage. Cette approche focalise sur l’aspect “dynamique” du séisme, pour distinguer de l’aspect “cinématique” (e.g. Aki and Richards, 1980). C’est le cœur de ma recherche, qui constitue un des objectifs principaux de mes travaux depuis ma thèse.

Après l’introduction, le Chapitre 4 vous présente les différentes méthodes numériques que je développe et utilise pour étudier le processus de la rupture dynamique et la propagation des ondes sismiques consécutive. Elles permettent d’approfondir la physique du processus de génération des séismes. Parmi ces méthodes citées : celle d’équations intégrales (Boundary Integral Equation Method) en 3D est remarquable dans le sens où l’on est capable de modéliser la rupture dynamique spontanée dans un système de failles non-planaires plus réaliste que des séismes passés. La méthode de différences finies (Finite Difference Method) est la méthode la plus performante en terme du rapport qualité / coût : elle constitue un élément essentiel dans l’application sismologique et du calcul intensif à grand volume. Elle fournit un résultat raisonnablement fiable dans la plupart des cas (Bien sur, il y a encore des améliorations à apporter à cette méthode). Grâce à mes collaborations diverses, j’ai eu l’occasion de pratiquer d’autres méthodes telles que les éléments finis (Finite Element Method) ou les éléments spectraux (Spectral Element Method). Ces expériences très riches m’ont aidé à mieux comprendre non seulement le problème mécanique mais aussi le problème numérique.

La phase “dynamique” d’un tremblement de terre, soit “cosismique”, se passe dans un très court moment par rapport à la période du cycle sismique d’un grand séisme inter-plaque ou intra-plaque (Figure 2.5). Il doit y avoir plusieurs phases différentes de la phase dynamique et chacune d’entre elles sont liées l’une à l’autre. Ma recherche se concentre principalement sur la période cosismique, où sont générées les ondes sismiques et pour résultat, un désastre conséquent. Cependant, il me paraît aussi important de savoir comment un grand séisme se prépare pendant le cycle sismique (soit “intersismique” et “présismique”), comment la Terre continue à se déformer après le séisme (c’est-à-dire en “postsismique”). L’approche géodésique est aussi important que l’approche sismologique, comme exposé dans la Figure 2.6. Mécaniquement, on peut décrire que la période intersismique correspond à la concentration de contrainte sur la faille, la phase présismique correspond à l’arrivée d’une instabilité, la phase cosismique correspond à la libération et à la redistribution de contrainte, et enfin la phase postsismique correspond à la relaxation de contrainte. C’est un sujet de mécanique de milieux continus (élastique, visco-élastique, etc.) avec l’interaction spatio-temporelle des failles.

En outre, les expériences dans les laboratoires ont démontré que pendant le cycle sismique, le comportement de faille, la loi constitutive de faille ou la loi de frottement peuvent varier largement

Seismic cycle and related phenomena

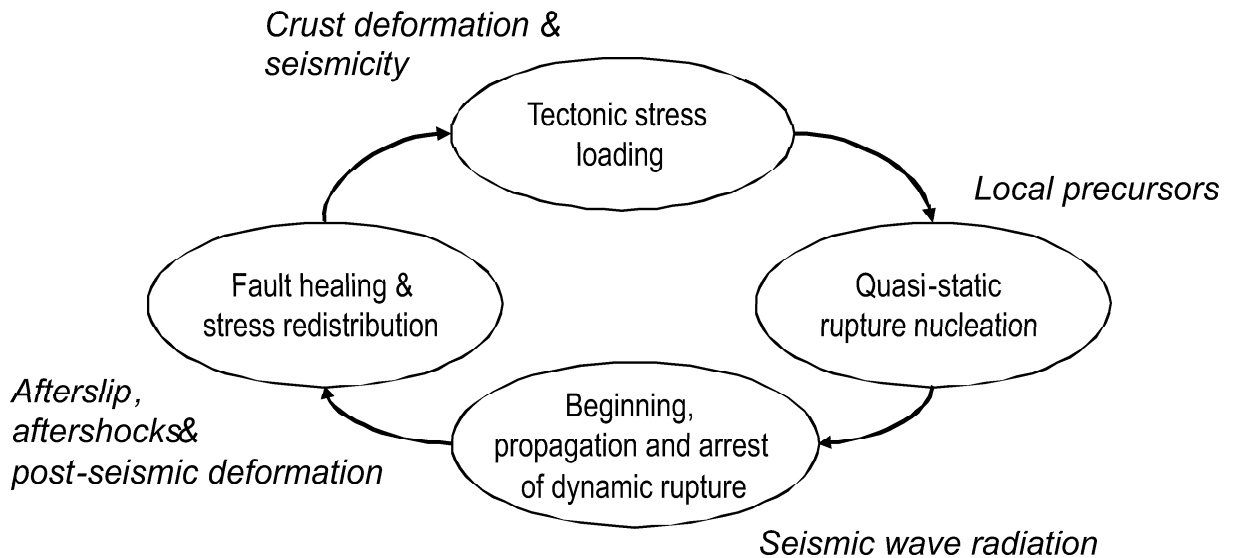


FIGURE 2.5 – Four main phases constituting a seismic cycle of repeated large earthquakes. Modified after Ohnaka and Matsu’ura (2002). My research field essentially belongs to “dynamic rupture” which appears visibly as “wave propagation” in front of us. Although this part is essential in seismology, we do not have to forget the other parts of a seismic cycle. They should have a causality from one to another.

en fonction de la contrainte chargée, du mouvement de faille (glissement, taux de glissement) et d’autres facteurs environnementaux tels que la température, l’existence de fluide etc. Une autre question se pose donc : Comment le comportement de faille se évolue-t-il et comment les paramétrer le long de la faille sont-ils ? La réponse à la question conditionnerait le processus du séisme. Le Chapitre 5 est ainsi dédié à la partie principale de ma recherche, la compréhension de la physique de génération d’un séisme sur des failles. L’étude théorique sur l’évolution du comportement de faille était le premier sujet de ma recherche, notamment l’étude sur comment la faille récupère sa résistance après une chute pendant le séisme.

Le concept de la loi constitutive dépendante du glissement et du temps se base sur le mécanisme de l’abrasion et l’adhésion de surface de faille à topographie complexe et explique l’affaiblissement pendant la rupture dynamique (slip-weakening) ainsi que la dépendance de la résistance sur le taux de glissement (velocity-weakening) et sur le temps de contact (log t healing). En supposant une telle loi sur la faille, j’ai appuyé mes études numériques sur la rupture dynamique des failles à géométrie complexe. Un bon exemple de l’étude complète est montré pour le séisme de Landers en Californie en 1992 où la rupture traversait les trois failles principales en parallèle. Par rapport à ces études dites “macroscopiques” pour les grands séismes, il ne faut pas oublier l’hétérogénéité

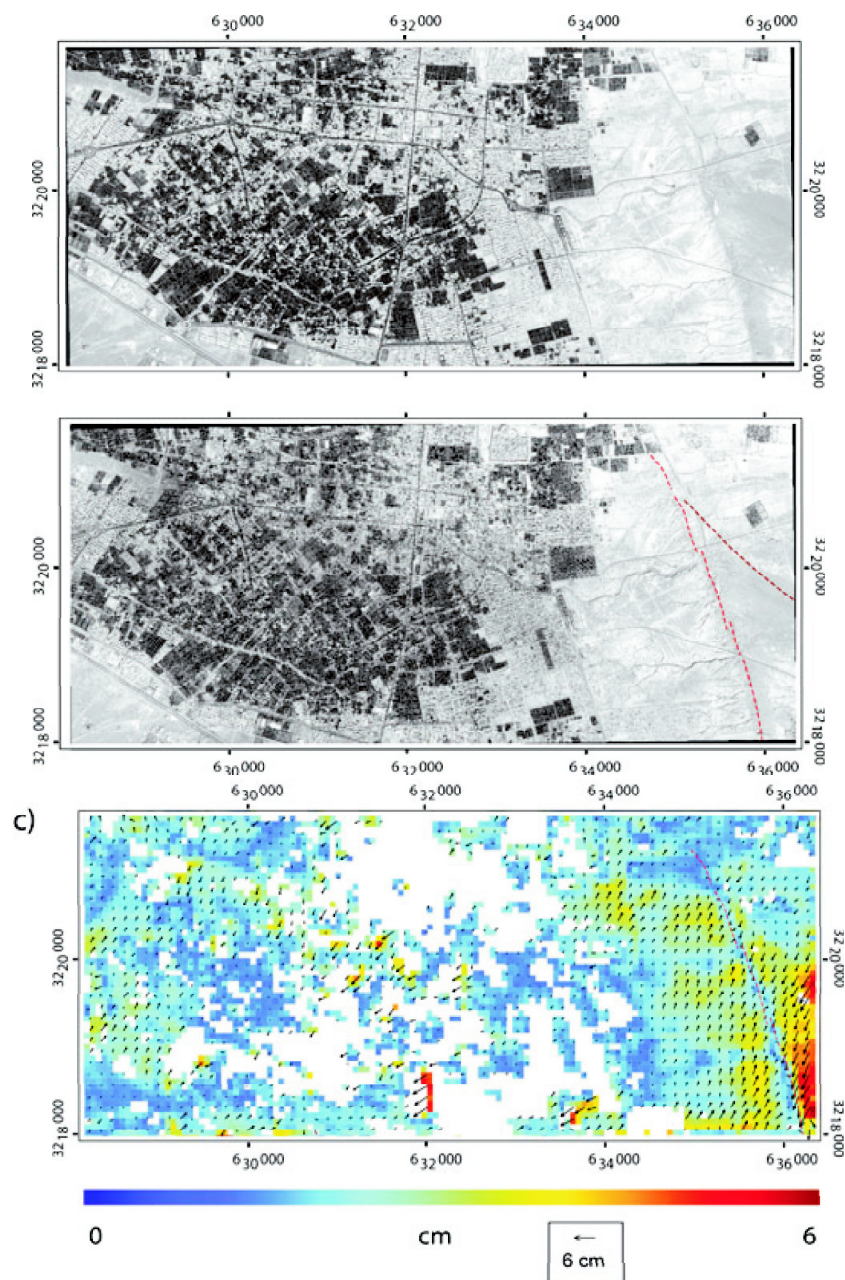


FIGURE 2.6 – Quick bird images around the city of Bam before (top) and after (middle) the 2003 M6.5 Bam earthquake and the coseismic correlogram in absolute displacement field with its direction. An oblique reverse fault is found along a broken red line. After De Michele et al. (2008).

sur la faille en petite échelle. La loi d'échelle à différentes tailles de séismes en sismologie devra être comprise par la loi d'échelle qui doit exister sur la faille. Le concept de la loi constitutive de faille est une idée fondamentale, qui est en fait décrite par la superposition de différentes longueurs d'ondes caractérisant le comportement de faille. C'est le sujet de ma recherche actuelle. J'aborde par exemple les questions suivantes : Quelles sont les différences entre les petits et les grands séismes ?

Comment la faille évolue-t-elle suite à la sismicité de tels séismes ?

Le développement de la méthodologie numérique en sismologie et la compréhension de la physique du processus de génération des séismes représente non seulement un grand challenge scientifique mais aussi une contribution importante et pratique pour l'étude de l'aléa et le risque sismique. Pour cet objectif, l'essentiel est de pouvoir prédire le mouvement fort le plus quantitativement possible.

Il est constitué de deux éléments : l'estimation de scénario de source sismique et la modélisation de la propagation des ondes à partir de cette source jusqu'au site d'intérêt. Pour le premier, la description "cinématique" de source sismique a été largement étudiée par différentes équipes et elle a eu de grands succès en application. Il reste cependant à évaluer la consistence avec la physique, car la description est déduite principalement à partir des analyses des séismes passés. Pour le deuxième, alors que le calcul de la propagation des ondes dans le milieu élastique est toujours le centre de la sismologie, l'approche n'est pas toujours basée sur les équations des ondes (déterministe). Les ingénieurs prennent souvent un autre moyen empirique ou stochastique pour deux raisons principales. Une est que l'approche déterministe est limitée à une bande serrée de fréquence à cause des informations insuffisantes de structure (où les ondes se propagent) et de ressource numérique. Une autre raison est que les ingénieurs cherchent surtout un moyen simple et standard applicable universellement. C'est rare qu'ils cherchent un mouvement extrême sous une situation spéciale telle que le champ proche de faille, qui dépasse la norme parasismique. Malgré tout cela, il serait impératif d'adopter l'approche déterministe, stochastique et/ou empirique selon le besoin, la connaissance et l'incertitude du contexte. Il est important d'apprendre comment l'approche déterministe est valide (ou limitée) lors de séismes passés ; comment choisir la méthode la plus adéquate sur un site d'intérêt.

Le Chapitre 6 résume les travaux récemment effectués. C'était pendant mes post docs en France que j'ai premièrement eu la conscience concrète de ma recherche. Un axe concerne l'estimation de scénario possible de séismes dans un système de failles en considérant la nature de la rupture dynamique spontanée différente de la description cinématique. Une grande différence est la magnitude de séisme. Elle est le résultat de simulation de la rupture dynamique dans un système de failles non-planaires alors qu'elle est une hypothèse dans la description cinématique. Un autre axe s'oriente vers la modélisation de la propagation des ondes sismique à la façon déterministe. Je suis intéressé à étudier comment le mouvement fort est affecté par la rupture dynamique en champ proche, comment ma méthodologie s'approche de la méthode classique existante, comment expliquer le cas réel du séisme passé et comment simuler les futurs séismes.

Enfin, le Chapitre 7 représente la perspective de la recherche. J'expliquerai d'abord le programme de recherche au BRGM dont je suis en charge depuis 2005, puis mes recherches individuelles dans les autres chapitres : recherche fondamentale sur le processus de la génération de séisme et recherche appliquée sur l'évaluation d'aléa sismique.

Chapitre 3

Originalité des recherches (Originality)

Beaucoup d'études sur la source sismique sont faites d'un point de vue cinématique. Hideo Aochi a réussi à construire une méthode d'équations intégrales évitant la singularité forte dans le milieu élastique homogène en 3D et cette nouvelle méthode est capable de traiter dynamiquement le mouvement de rupture sur failles à géométrie arbitraire, d'une manière flexible. Elle a ouvert une nouvelle voie dans la modélisation des failles non planaires.

La géométrie complexe de failles observées sur la surface de la Terre et la structure de failles segmentées représente un aspect important dans le processus de la rupture sismique. La recherche de Hideo Aochi a permis de créer un lien entre l'aspect quantitatif et les données observées, ceci sans doute amène les études de la source sismique dans une nouvelle dimension.

Le fait marquant est l'applicabilité de sa méthode en risque sismique, la prédiction du mouvement fort en champ proche en haute fréquence, qui est très sensible à la géométrie de faille. Hideo Aochi a également commencé à travailler sur le modèle de source sismique plus pratique au travers des collaborations avec les ingénieurs en génie civil.

Les grands séismes intra plaques ont lieu en interaction entre plusieurs segments de faille. Il est devenu possible de simuler quantitativement le transfert de rupture dans un tel système de faille. Hideo Aochi a obtenu dans ce domaine des résultats probants : sa modélisation des failles non-planaires a permis de comprendre lors d'un séisme, l'effet de la contrainte normale et du changement de géométrie de faille sur la propagation spontanée de rupture dans des failles branchées.

On découvre surtout l'originalité de sa recherche dans la comparaison entre les sismogrammes synthétiques calculés par son modèle et ceux observés. Prenons par exemple le séisme de Landers en 1992, Hideo Aochi a obtenu grâce à sa méthode de comparaison, la force cohésive dans le frottement et la distribution hétérogène de la contrainte initiale. Le comité souhaite que Hideo Aochi continue sa collaboration avec les sismologues japonais afin de progresser davantage dans ce domaine.

(Le commentaire ci-dessus est traduit du comité “Seismological Society of Japan” pour le prix jeune sismologue en 2007, d’après Newsletter SSJ, vol.19, no.1, le 10 mai 2007, texte original en japonais)

Chapitre 4

Numerical Methods

4.1 Introduction

The solution of the system of elastic (occasionally inelastic) equations for all aspects of earthquakes is a classical problem. For the earthquake source, the problem remains difficult mainly because the phenomena are very discontinuous and the boundary conditions should be non-linear (See Chapter 5). These problems require highly accurate estimates of the stress and fault movement on the fault plane itself. On the other hand, for seismic wave propagation in an elastic medium, theoretical and numerical studies are relatively well established as seen in many textbooks (e.g. Aki and Richards, 2002). It is important to model realistic heterogeneous media and, in addition, the numerical method should be scalable for large computers. To study site effects, complex geometrical and material configurations require a stable and sophisticated numerical method.

I have been working on different methods, which will be reviewed in the following sections : boundary integral equations, finite difference, finite element, spectral element and hybrid methods. The selection of one of the above methods depends on our purpose. Through my experiences I must say that all numerical methods are no more than approximations and their correct use requires experience and a physical understanding of the method. The coherence between solutions from different techniques is often emphasized in benchmarking project. However, I think that what is more important is the sensitivity of each method to given input parameters and consequently inherent differences in the solutions, which are rarely shown in publications. It is always important to make an effort to achieve to a better solution while it is also necessary to measure and understand the differences between solutions. In the framework of the French national project SEISMULATORS (2006–2008), simple comparison exercises have been carried out on different methods for 2D dynamic rupture problems. The solutions of all the methods converge when the model parameters are properly tuned (and when we know what we want to obtain). However, it is important to notice that their discretizations are in principle different. Therefore, it is quite normal that there