

Chapitre 5

Conclusions et Perspectives

La nucléation des séismes est un problème essentiel : si nous réussissons à caractériser et interpréter les observables liés à l'initiation de la rupture ils nous renseigneront sur les propriétés mécaniques du comportement des failles naturelles et sur les conditions initiales dans lesquelles naît l'instabilité sismique. La compréhension de ces processus n'est pas sans implications sur une autre échelle de temps, celle du cycle sismique. Nous avons abordé le problème de la nucléation de la rupture sismique sous plusieurs angles complémentaires, depuis la modélisation mécanique théorique jusqu'aux observations sismologiques. Une large palette d'échelles de temps a été considérée, celles des processus quasi-statiques et celles de la rupture dynamique. Des approches diverses sont nécessaires pour traiter ces problèmes, de la résolution analytique et asymptotique à la modélisation numérique. Nous avons utilisé des techniques de résolution variées et adaptées à chaque cas, telles que des méthodes intégrales de frontière et des méthodes d'Elément Spectraux.

L'effet des hétérogénéités sur la nucléation de la rupture a été étudié en utilisant des lois de frottement dépendantes du glissement. A la lumière d'expériences de frottement en laboratoire, de haute résolution, des interprétations mécaniques avaient été proposés par des équipes japonaises (Yamashita et Ohnaka, 1991 ; Matsu'ura *et al.*, 1992 ; Ohnaka, 1996). Leurs modèles reposaient sur la présence d'hétérogénéités spécifiques des paramètres de comportement le long de la faille. Les hétérogénéités de la réponse quasi-statique étaient pour eux le reflet des longueurs caractéristiques de la distribution des hétérogénéités structurales. Nous avons montré, en contraste avec ces modèles *ad hoc*, que la localisation quasi-statique du glissement est un processus générique des failles gouvernées par des lois d'affaiblissement. Les longueurs caractéristiques intervenant dans le problème hétérogène sont déjà présentes dans le problème homogène, en particulier la dite *longueur d'écrantage*. Plus précisément, l'évolution quasi-statique du glissement dans un paysage hétérogène peut être comprise en identifiant les bifurcations de localisation du modèle parfait et en caractérisant son comportement post-bifurcation. Des questions restent ouvertes sur la généralisation de ces notions aux lois dépendantes de la vitesse de glissement et de variables d'état, bien que nos simulations préliminaires et des résultats plus anciens (Dieterich 1992)

sont consistants avec cette vision de la nucléation. Cette analyse a été réalisée dans le régime quasi-statique. Le processus de localisation stable prépare le paysage de contraintes et d'affaiblissement dans lequel se propagera la rupture dynamique. La transition vers la phase inertielle et le rayonnement qu'elle produit sont des sujets essentiels pour la confrontation des modèles mécaniques aux observables sismologiques. Nous possédons actuellement les méthodes numériques pour résoudre ces problèmes ainsi que des observations fines de la phase de nucléation sismique. Nous avons présenté des simulations préliminaires en utilisant une dynamique simple. Le problème du lien mécanique entre la taille d'un séisme et la taille de sa zone de nucléation a été étudié dans ce cadre. Des lois d'échelle non triviales apparaissent et cherchent à être comprises. Des développements plus exacts dans ce sens ne sauraient tarder à donner des résultats. Le problème essentiel de l'origine de la longueur intrinsèque dans les lois de frottement modernes est soulevé. Une piste encourageante est donnée par un modèle d'endommagement en milieu fortement hétérogène, dont nous avons présenté la phénoménologie mais dont l'analyse complète n'a été qu'entamée.

Identifier et comprendre les observables reliés à la préparation des tremblements de terre est un des objectifs que nous avons poursuivis. Nous avons étudié en détail un modèle de nucléation dynamique proposé par Campillo et Ionescu (1997), pour lequel nous avons dissipé tout soupçon d'inconsistance entre approches temporelle et spectrale qui aurait pu être manifesté dans la littérature (Knopoff *et al.*, 2000). La première question physique que nous nous sommes posée est celle de l'effet de la structure de la zone de faille sur le processus d'initiation de l'instabilité sismique. Dans le cas particulier du séisme de Kobé, présentant une phase de nucléation d'une durée de 0.6 s, notre analyse des données actuelles montre le rôle faible des structures endommagées sur l'échelle de temps de la phase de nucléation sismique. Cependant, l'analyse théorique prévoit une certaine richesse des régimes possibles dans le cas général. Des données précieuses sur la structure interne des zones de faille active commencent à être recueillies grâce à de grands projets de forage à travers des failles à des profondeurs variées, complétés par des réseaux sismologiques locaux assez denses. Le projet européen du Golfe de Corinthe constituera bientôt notre laboratoire naturel pour tester ces idées. La deuxième question est celle de la mesure de propriétés effectives de la faille pendant sa phase de nucléation, directement sur les sismogrammes. Nous avons proposé une nouvelle méthode dans ce sens : la mesure du taux de divergence s_m pour une initiation exponentielle, par le plateau du rapport D/ID (déplacement/déplacement intégré). Cet observable est relié à l'affaiblissement effectif de la faille et aux propriétés élastiques effectives dans un certain volume autour de la faille, de dimensions commensurables à une longueur d'écrantage que nous avons définie, quantifiée et reliée au phénomène de piégeage frictionnel. Un exemple détaillé est présenté pour deux sismogrammes du séisme de Kobé, à des distances épicentrales très différentes. Nous estimons pour cet événement $s_m \approx 5$ Hz. Il s'agit d'une contrainte nouvelle sur le comportement de la faille qui, en complément d'estimations indépendantes de l'énergie de fracturation, donnent un glissement critique $D_c = 30$ cm et un taux d'affaiblissement effectif $W = 25$ MPa/m. Des résultats préliminaires sont aussi présentés sur les données de Beroza et Ellsworth (1996). Bien qu'encore largement perfectible, notre méthode permet de

mettre en évidence une loi d'échelle similaire à celle du temps de nucléation : $s_m \propto M_0^{-1/3}$. Cette observation pointe vers deux paradigmes pour le comportement des failles : un frottement dépendant d'échelle ou un affaiblissement non linéaire. Les deux interprétations ont des arguments expérimentaux favorables et de nouvelles observations devraient aider à les discerner. Nous montrons aussi que des observations faites sur des microséismes peuvent s'étendre à une gamme plus large de magnitudes : $\dot{M}_0(t) \propto t^4$ pendant les phases initiales de la nucléation. Un modèle particulièrement attrayant est celui d'une zone de nucléation à taille croissante à l'intérieur de laquelle l'affaiblissement est incomplet. Ce modèle se trouve à l'opposé de l'hypothèse classique de *small scale yielding* de la théorie fracture. Cette zone naitrait d'une hétérogénéité ou concentration de contrainte laissée par l'histoire de la faille, et serait donc reliée à des propriétés statistiques du champ de contraintes à l'échelle du cycle sismique. Nous suggérons que sous certaines conditions $\dot{M}_0(t)$ présente une transition entre une croissance en loi de puissance, dominée par les hétérogénéités locales à la frontière de la zone de nucléation, et un comportement exponentiel, contrôlé par les hétérogénéités distribuées dans l'ensemble de la zone de nucléation. Appuyés sur des résultats récents et des simulations préliminaires, nous avons posé les premières briques de l'analyse de cette classe de modèles mécaniques. Ils seront bientôt testés numériquement de façon exhaustive. Un autre axe de travail à court terme sera la confirmation et consolidation de notre caractérisation de la phase de nucléation en travaillant sur l'ensemble des données disponibles actuellement. En particulier l'atténuation devra être prise en compte.

Du point de vue numérique, les enjeux actuels dans le domaine de la mécanique des failles nous a poussé à développer une nouvelle méthode de simulation de la dynamique de la rupture. Un de nos apports concrets est un code de simulation dynamique de la rupture reposant sur la Méthode d'Éléments Spectraux. C'est une capitalisation sur les efforts de développement entrepris dans le passé par notre équipe dans la simulation de la propagation des ondes (Komatitsch 1997 ; Chaljub 2000). Deux solutions de contrôle du bruit numérique, intrinsèque aux méthodes explicites discrétisant le volume, sont proposées et appliquées. Nous illustrons les performances de notre méthode dans l'étude d'un problème de rupture 2D : la transition intersonique en mode II. Nous montrons que la distance de propagation nécessaire à la nucléation du front intersonique dépend exponentiellement de la proximité des précontraintes au seuil de rupture, caractérisée par le paramètre classique S . Aucun indice de l'existence d'une valeur S_c critique n'est apparente dans nos simulations. Cependant, les limitations actuelles en termes de coût de mémoire et calcul ne permettent pas de conclure sur ce point. Ceci illustre l'importance de se tourner vers un paradigme de résolution multi-échelle, en espace et en temps, encore peu abordé en Éléments Finis pour les problèmes hyperboliques. C'est un axe de développement que nous voulons approfondir. Le principe d'une méthode mixte mais consistante, décomposant les hautes et basses fréquences, a été présenté et fait l'objet de développements récents. Notons finalement que le code FSEM est documenté, écrit en Fortran90 modulaire et, dans la limite des possibilités offertes par le langage, dans un style orienté objet. Cela facilitera son développement en domaine public. Plusieurs développements liés à ce code ont bénéficié de la motivation supplémentaire fournie par notre participation dans le projet "Simulation 3D de la réponse

sismique du bassin de Caracas”, en particulier la gestion de modèles hétérogènes et de mailleurs interactifs non structurés. Cette composante appliquée aux effets de site dans le risque sismique n’est pas présente dans ce manuscrit, qui est essentiellement consacré aux effets de la source sismique, mais fait l’objet de travaux en cours.

Références

- Aagaard, B. (2000). *Finite-element simulations of earthquakes*. Ph. D. thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Abercrombie, R. (1996). The magnitude-frequency distribution of earthquakes recorded with deep seismometers at Cajon Pass, Southern California. *Tectonophysics* 261, 1–7.
- Abercrombie, R. et J. Mori (1994). Local observations of the onset of a large earthquake : 28 June 1992 Landers, California. *Bull. Seis. Soc. Am.* 84, 725–734.
- Abercrombie, R. et J. Rice (2001). Small earthquakes revisited : can it constrain slip weakening? In *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, Volume 82 of *Fall Meeting Supplement*, pp. F843.
- Aki, K. (1987). Magnitude-frequency relation for small earthquakes : a clue for the origin of f_{max} of large earthquakes. *J. Geophys. Res.* 92, 1349–1355.
- Aki, K. et P. Richards (2002). *Quantitative Seismology* (Second ed.). Sausalito, CA : University Science Books.
- Ampuero, J.-P., J.-P. Vilotte, et F.-J. Sánchez-Sesma (2002). Nucleation of rupture under slip dependent friction law : simple models of fault zone. *J. Geophys. Res.* 107(B12), 10.1029/2001JB000452.
- Andrews, D. (1976a). Rupture propagation with finite stress in antiplane strain. *J. Geophys. Res.* 81, 3575–3582.
- Andrews, D. (1976b). Rupture velocity of plane strain shear cracks. *J. Geophys. Res.* 81, 5679–5687.
- Andrews, D. (1980a). Fault impedance and earthquake energy in the Fourier transform domain. *Bull. Seism. Soc. Am.* 70, 1683–1698.
- Andrews, D. (1980b). A stochastic fault model 1. static case. *J. Geophys. Res.* 85, 3867–3877.
- Andrews, D. (1985). Dynamic plane-strain shear rupture with a slip weakening friction law calculated by a boundary integral method. *Bull. Seism Soc. Am.* 75, 1–21.
- Andrews, D. (1999a). Can we infer slip-weakening displacement from seismic observations? In *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, Volume 80 of *Fall Meeting Supplement*.
- Andrews, D. (1999b). Test of two methods for faulting in finite difference calculations. *Bull. Seis. Soc. Am.* 89, 931–937.

- Andrews, D. et Y. Ben-Zion (1997). Wrinkle-like slip pulse on a fault between different materials. *J. Geophys. Res.* *102*, 553–571.
- Aochi, H. et E. Fukuyama (2001). Three-dimensional nonplanar simulation of the 1991 Landers earthquake. *J. Geophys. Res.* *107*, 10.1028/2000JB000042.
- Archuleta, R. (1984). A faulting model for the 1979 Imperial Valley earthquake. *J. Geophys. Res.* *89*, 4559–4585.
- Archuleta, R. et S. Day (1980). Dynamic rupture in layered medium : the 1966 Parkfield earthquake. *Bull. Seis. Soc. Am.* *70*, 671–689.
- Archuleta, R. et G. Frazier (1978). Three-dimensional numerical simulations of dynamic faulting in a half-space. *Bull. Seis. Soc. Am.* *68*, 541–572.
- Barenblatt, G. (1962). The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Adv. Appl. Mech.* *7*, 55–80.
- Baumbach, M., H. Grosser, G. Romero, J. Rojas, M. Sobiesiak, et W. Welle (2002). Aftershock pattern of the July 9, 1997 Mw = 6.9 Cariaco earthquake. *Tectonophysics*. in press.
- Beeler, N., T. Tullis, M. Blanpied, et J. Weeks (1996). Frictional behavior of large displacement experimental faults. *J. Geophys. Res.* *101*, 8697–8715.
- Bell, J., M. Berger, J. Saltzman, et M. Welcome (1994). Three dimensional adaptive mesh refinement for hyperbolic conservation laws. *SIAM J. Sci. Comp.* *15*, 127.
- Belytschko, T. et T. Black (1999). Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. *Int. J. Num. Meth. Eng.* *45*(5), 601–620.
- Ben-Zion, Y. (1998). Properties of seismic fault zone waves and their utility for imaging low-velocity structure. *J. Geophys. Res.* *103*, 12,567–12,585.
- Ben-Zion, Y. et K. Aki (1990). Seismic radiation from an SH line source in a laterally heterogeneous planar fault zone. *Bull. Seismol. Soc. Am.* *80*, 971–994.
- Ben-Zion, Y. et Y. Huang (2002). Dynamic rupture on an interface between a compliant fault zone layer and a stiffer surrounding solid. *J. Geophys. Res.* *107*, DOI 10.1029/2001JB000254.
- Berger, M. et J. Olinger (1984). Adaptive mesh refinement for hyperbolic partial differential equations. *J. Comput. Phys.* *53*, 484.
- Bernardi, C. et Y. Maday (1992). *Approximations spectrales de problèmes aux limites elliptiques*. Paris : Springer.
- Bernardi, C. et Y. Maday (2001). Spectral, spectral element and mortar element methods. In J. Blowey, J. Coleman, et A. Craig (Eds.), *Theory and numerics of differential equations*, Universitext. Springer.
- Beroza, G. et W. Ellsworth (1996). Properties of the seismic nucleation phase. *Tectonophysics* *261*, 209–227.

- Bizzarri, A., M. Cocco, D. Andrews, et E. Boschi (2001). Solving the dynamic rupture problem with different numerical approaches and constitutive laws. *Geophys. J. Int.* 144, 656–678.
- Boatwright, J. et H. Quin (1986). The seismic radiation from a 3-d dynamic model of a complex rupture process. Part I : confined ruptures. In S. Das, J. Boatwright, et C. Scholz (Eds.), *Earthquakes Source Mechanics* (Union Monogr. ed.), Volume 24, pp. 97–109. Washington, DC : Am. Geophys. Union.
- Bouchon, M. (1997). The state of stress of some faults on the San Andreas system. *J. Geophys. Res.* 102, 11731–11744.
- Bouchon, M., M.-P. Bouin, H. Karabulut, N. Toksöz, et M. Dietrich (2001). How fast does rupture can propagate during an earthquake? New insights from the 1999 Turkey earthquakes. *Geophys. Res. Lett.* 28, 2723–2726.
- Bouchon, M. et D. Streiff (1997). Propagation of a shear crack on a nonplanar : a method of calculation. *Bull. Seis. Soc. Am.* 87, 61–66.
- Bouchon, M., N. Toksöz, H. Karabulut, M.-P. Bouin, M. Dietrich, M. Aktar, et M. Edie (2000). Seismic imaging of the 1999 Izmit (Turkey) rupture inferred from the near-fault recordings. *Geophys. Res. Lett.* 27, 3013.
- Bowman, D., G. Ouillon, C. Sammis, A. Sornette, et D. Sornette (1998). An observational test of the critical earthquake concept. *J. Geophys. Res.* 103, 24359–24372.
- Boyd, J. (1998). Two comments on filtering (artificial viscosity) for Chebyshev and Legendre spectral and spectral element methods : preserving boundary conditions and interpretation of the filter as a diffusion. *J. Comput. Phys.* 143, 283–288.
- Broberg, K. (1999). *Cracks and fracture*. London : Academic Press.
- Brown, S. et C. Scholz (1985). Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces. *J. Geophys. Res.* 90, 12575–12582.
- Burridge, R. (1969). The numerical solution of certain integral equations with non-integrable kernels arising in the theory of crack propagation and elastic wave diffraction. *Phil. Trans. Roy. Soc. London A* 265, 353–381.
- Burridge, R. (1973). Admissible speeds for plane-strain self-similar shear cracks with friction but lacking cohesion. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* 35, 439–455.
- Campillo, M. et I. Ionescu (1997). Initiation of antiplane shear instability under slip dependent friction. *J. Geophys. Res.* 102, 20,363–20,371.
- Capdeville, Y., E. Chaljub, J. Vilotte, et J. Montagner (2003). Coupling the spectral element method with a modal solution for elastic wave propagation in global earth models. *Geophys. J. Int.* 152, 34.
- Carlson, J. et J. Langer (1989). Mechanical model of an earthquake fault. *Phys. Rev. A* 40, 6470–6484.
- Chaljub, E. (2000). *Modélisation numérique de la propagation d'ondes sismiques à l'échelle globale*. Ph. D. thesis, Université Paris 7, Paris.

- Chambon, G., J. Schmittbuhl, et A. Corfdir (2002). Laboratory gouge friction : seismic-like slip weakening and secondary rate- and state- effects. *Geophys. Res. Lett.* *29*(10), 10.1029/2001GL014467.
- Chester, F., J. Evans, et R. Biegel (1993). Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas fault. *J. Geophys. Res.* *98*, 771–786.
- Chung, J. et G. Hulbert (1993). A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation : the Generalized - α method. *J. Appl. Mech.* *60*(2), 371–375.
- Cocco, M. et A. Bizzarri (2002). On the slip-weakening behavior of rate-and-state dependent constitutive laws. *Geophys. Res. Lett.* *29*(11), 10.1029/2001GL013438.
- Cocco, M. et J. Boatwright (1993). The envelopes of acceleration time histories. *J. Geophys. Res.* *83*, 1095–1114.
- Cochard, A. et R. Madariaga (1994). Dynamic faulting under rate-dependent friction. *Pure Appl. Geophysics* *142*, 419–445.
- Cochard, A. et R. Madariaga (1996). Complexity of seismicity due to highly rate-dependent friction. *J. Geophys. Res.* *101*, 25321–25336.
- Cochard, A. et J. Rice (2000). Fault rupture between dissimilar materials : Ill-posedness, regularization, and slip-pulse response. *J. Geophys. Res.* *105*, 25891–25907.
- Cohen, G., P. Joly, et N. Tordjman (1994). Éléments finis avec condensation de masse pour l'équation d'ondes en dimension 1. Rapport de recherche 2323, INRIA.
- Cotton, F. et M. Campillo (1995). Frequency domain inversion of strong motions : application to the 1992 Landers earthquake. *J. Geophys. Res.* *100*, 3961–3975.
- Daniels, H. (1945). The statistical theory of the strength of bundles of threads. *Proc. Royal Soc.* *A183*, 405–435.
- Das, S. et K. Aki (1977). A numerical study of two-dimensional spontaneous rupture. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* *50*, 643–668.
- Das, S. et B. Kostrov (1987). On the numerical boundary integral equation method for three-dimensional dynamic shear crack problems. *J. Appl. Mech.* *54*, 99–104.
- Das, S. et C. H. Scholz (1981). Theory of time-dependent rupture in the earth. *J. Geophys. Res.* *86*, 6039–6051.
- Dascalu, C., I. Ionescu, et M. Campillo (2000). Fault finiteness and initiation of dynamic shear instability. *Earth Planet. Sci. Lett.* *177*, 163–176.
- Day, S. (1982). Three-dimensional simulation of spontaneous rupture : the effect of nonuniform prestress. *Bull. Seis. Soc. Am.* *72*, 1881–1902.
- Deichmann, N. (1997). Far-field pulse shapes from circular sources with variable rupture velocities. *Bull. Seismol. Soc. Am.* *87*, 1288–1296.
- Delaplace, A., S. Roux, et G. Pijaudier-Cabot (1999). Failure and scaling properties of a softening interface connected to an elastic block. *Int. J. of Fracture* *95*, 159–174.

- Dieterich, J. (1979a). Modeling of rock friction : 1. Experimental results and constitutive equations. *J. Geophys. Res.* 84, 2161–2168.
- Dieterich, J. (1979b). Modeling of rock friction : 2. Simulation of preseismic slip. *J. Geophys. Res.* 84, 2169–2175.
- Dieterich, J. (1981). Constitutive properties of faults with simulated gouge. In N. Carter, M. Friedman, J. Logan, et D. Sterns (Eds.), *Mechanical Behavior of Crustal Rocks* (Am. Geophys. Union ed.), Volume 24, pp. 103–20. Washington, DC : Am. Geophys. Union Monogr.
- Dieterich, J. (1986). A model for the nucleation of earthquake slip. In S. Das, J. Boatwright, et C. Scholz (Eds.), *Earthquakes Source Mechanics* (Union Monogr. ed.), Volume 24, pp. 37–49. Washington, DC : Am. Geophys. Union.
- Dieterich, J. (1992). Earthquake nucleation on faults with rate- and state-dependent strength. *Tectonophysics* 211, 115–134.
- Dieterich, J. (1994). A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. *J. Geophys. Res.* 99, 2601–2618.
- Dieterich, J. et B. Kilgore (1994). Direct observation of frictional contacts : new insight for state-dependent properties. *Pure Appl. Geophys.* 143, 283–302.
- Dmowska, R., J. Rice, L. Lovison, et D. Josell (1988). Stress transfer and seismic phenomena in coupled subduction zones during the earthquake cycle. *J. Geophys. Res.* 93, 7869–7884.
- Dodge, D., G. Beroza, et W. Ellsworth (1995). Foreshock sequence of the 1992, Landers, California earthquake and its implications for earthquake nucleation. *J. Geophys. Res.* 100, 9865–9880.
- Dodge, D., G. Beroza, et W. Ellsworth (1996). Detailed observations of California foreshock sequences : Implication for the earthquake process. *J. Geophys. Res.* 101, 22371–22392.
- Dugdale, D. (1960). Yielding of steel sheets containing slits. *J. Mech. Phys. Solids* 8, 100.
- Duvaut, C. et J. Lions (1972). *Les inéquations en mécanique et en physique*. Dunod.
- Ellsworth, W. et G. Beroza (1995). Seismic evidence for a seismic nucleation phase. *Science* 268, 851–855.
- Falk, M., A. Needleman, et J. Rice (2001). A critical evaluation of cohesive zone models of dynamic fracture. *Journal de Physique IV* 11, Pr 5.43–5.50.
- Favreau, P. (2000). *Initiation et propagation de la rupture sismique : instabilité de frottement en élastodynamique*. Ph. D. thesis, Univ. Grenoble I.
- Favreau, P., I. Ionescu, et M. Campillo (1999). On the dynamic sliding with rate and state dependent friction laws. *Geophys. J. Int.* 139, 671–678.
- Felzer, K. et G. Beroza (1999). Deep structure of a fault discontinuity. *Geophys. Res. Lett.* 26, 2121–2124.

- Fischer, P. et J. Mullen (2001). Filter-based stabilization of spectral element methods. *C. R. Acad. Sci. Paris* 332, 265–270. Série I : Analyse numérique.
- Fisher, D., K. Dahmen, S. Ramanathan, et Y. Ben-Zion (1997). Statistics of earthquakes in simple models of heterogeneous faults. *Phys. Rev. Lett.* 78, 4885–4888.
- Fukuyama, E. et R. Madariaga (1995). Integral equation method for plane crack with arbitrary shape in 3D elastic medium. *Bull. Seis. Soc. Am.* 85, 614–628.
- Fukuyama, E. et R. Madariaga (1998). Rupture dynamics of a planar fault in 3D elastic medium : rate- and slip-weakening friction. *Bull. Seis. Soc. Am.* 88, 1–17.
- Fukuyama, E. et T. Mikumo (1993). Dynamic rupture analysis : inversion for the rupture process of the 1990 Izu-Oshima, Japan, earthquake (m=6.5). *J. Geophys. Res.* 98, 6529–6542.
- Geubelle, P. et J. Rice (1995). A spectral method for 3D elastodynamic fracture problems. *J. Mech. Phys. Solids* 43, 1791–1824.
- Glowinski, R., J. Lions, et R. Trémolières (1976). *Analyse numérique des inéquations variationnelles*. Dunod.
- Gradshteyn, I. et I. Ryzhik (1965). *Table of integrals, series and products*. New York and London : Academic Press.
- Guatteri, M. et P. Spudich (2000). What can strong motion data tell us about slip-weakening fault friction laws? *Bull. Seism. Soc. Am.* 90, 98–116.
- Guatteri, M., P. Spudich, et G. Beroza (2001). Inferring rate and state friction parameters from a rupture model of the 1995 Hyogo-ken Nambu (Kobe) earthquake. *J. Geophys. Res.* 106, 26511–26522.
- Harris, R. et S. Day (1993). Dynamics of fault interaction : parallel strike-slip faults. *J. Geophys. Res.* 98, 4461–4472.
- Harris, R. et S. Day (1997). Effects of a low-velocity zone on a dynamic rupture. *Bull. Seism. Soc. Am.* 87, 1267–1280.
- Harris, R. et S. Day (1999). Dynamic 3D simulations of earthquakes on en echelon faults. *Geophys. Res. Lett.* 26, 2089–2092.
- Haskell, N. (1969). Elastic displacements in the near-field of a propagating fault. *Bull. Seis. Soc. Am.* 59, 865–908.
- Heimpel, M. (1997). Critical behaviour and the evolution of fault strength during earthquake cycles. *Nature* 388, 865–868.
- Herrero, A. et P. Bernard (1994). A kinematic self similar rupture process for earthquakes. *Bull. Seis. Soc. Am.* 84, 1216–1228.
- Heslot, F., T. Baumberger, B. Perrin, B. Caroli, et C. Caroli (1994). Creep, stick-slip, and dry-friction dynamics : Experiments and a heuristic model. *Phys. Rev. E* 49, 4973–4988.

- Hiramatsu, Y., M. Furumoto, K. Nishigami, et S. Ohmi (2002). Initial rupture process of microearthquakes recorded by high sampling borehole seismographs at the Nojima fault, central Japan. *Phys. Earth Plan. Int.* 132, 269–279.
- Hirata, T. (1989). Fractal dimension of fault systems in Japan. *Pure Appl. Geophysics* 131, 157–170.
- Horowitz, F. et A. Ruina (1989). Slip patterns in a spatially homogeneous fault model. *J. Geophys. Res.* 93, 10279–10298.
- Hughes, T. (1987). *The Finite Element Method, linear static and dynamic finite element analysis*. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice-Hall International.
- Hulbert, G. et J. Chung (1996). Explicit time integration algorithms for structural dynamics with optimal numerical dissipation. *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* 137, 175–188.
- Ida, Y. (1972). Cohesive force across the tip of a longitudinal-shear crack and Griffith's specific surface energy. *J. Geophys. Res.* 77, 3796–3805.
- Ide, S. et M. Takeo (1997). Determination of constitutive relations of fault slip based on seismic wave analysis. *J. Geophys. Res.* 102, 27379–27391.
- Igel, H., Y. Ben-Zion, et P. Leary (1997). Simulation of SH- and P-SV-wave propagation in fault zones. *Geophys. J. Int.* 128, 533–546.
- Iio, Y. (1992). Slow initial phase of the P-wave velocity pulse generated by microearthquakes. *Geophys. Res. Lett.* 19, 477–480.
- Iio, Y. (1995). Observations of the slow initial phase generated by microearthquakes : implications for earthquake nucleation and propagation. *J. Geophys. Res.* 100, 15333–15349.
- Ionescu, I. et J.-C. Paumier (1996). On the contact problem with slip dependent friction in elastostatics. *Int. J. Eng. Sci.* 34, 471–491.
- Ito, H., Y. Kuwahara, T. Kiguchi, K. Fujimoto, et T. Ohtani (2000). Outline of the Nojima fault drilling by GSJ : structure, physical properties and permeability structure from borehole measurements in GSJ borehole crossing the Nojima fault, Japan. Technical Report GSJ Interim report No.EQ/00/1, USGS Open-File Report 000-129, Geological Survey of Japan, Tsukuba.
- Johnson, T. (1981). Time-dependent friction of granite : implications for precursory slip on faults. *J. Geophys. Res.* 86, 6017–6028.
- Jones, L. et P. Molnar (1979). Some characteristics of foreshocks and their possible relationship to earthquake prediction and premonitory slip on faults. *J. Geophys. Res.* 84, 3596–3608.
- Takehi, Y. et K. Irikura (1997). High-frequency radiation process during earthquake faulting - envelope inversion of acceleration seismograms from the 1993 Hokkaido-Nansei-Oki, Japan, earthquake. *Bull. Seis. Soc. Am.* 87, 904–917.

- Takehi, Y., K. Irikura, et M. Hoshihara (1996). Estimation of high-frequency radiation areas on the fault plane of the 1995 Hyogo-Nambu earthquake by the envelope inversion of acceleration seismograms. *J. Phys. Earth* 44, 505–517.
- Kame, N. et T. Yamashita (1997). Dynamic nucleation process of shallow earthquake faulting in a fault zone. *Geophys. J. Int.* 128, 204–216.
- Klarbring, A. (1999). Contact, friction, discrete mechanical structures and mathematical programming. In P. Panagiotopoulos et P. Wriggers (Eds.), *New developments in contact problems*, Number 384 in CISM courses and lectures, pp. 55–100. Washington, DC : Springer.
- Knopoff, L. (1958). Energy release in earthquakes. *Geophys. J. R. A. S.* 1, 44–52.
- Knopoff, L., J. Landoni, et M. Abinante (2000). Causality constraint for fractures with linear slip-weakening. *J. Geophys. Res.* 105, 28035–28044.
- Koller, M., M. Bonnet, et R. Madariaga (1992). Modeling of dynamic crack propagation using time-domain boundary integral equations. *Wave Motion* 16, 339–366.
- Komatitsch, D. (1997). *Méthodes spectrales et éléments spectraux pour l'équation de l'élastodynamique 2D et 3D en milieu hétérogène*. Ph. D. thesis, Institut de Physique du Globe de Paris, Paris.
- Komatitsch, D. et J. Tromp (1999). Introduction to the spectral-element method for 3-D seismic wave propagation. *Geophys. J. Int.* 139, 806–822.
- Komatitsch, D. et J. P. Vilotte (1998). The spectral element method : an efficient tool to simulate the seismic response of 2D and 3D geological structures. *Bull. Seis. Soc. Am.* 88, 368–392.
- Kuznetsov, Y. (1998). *Elements of applied bifurcation theory*. Springer-Verlag.
- Lapusta, N. et J. Rice (2003). Nucleation and early seismic propagation of small and large events in a crustal earthquake model. *J. Geophys. Res.* in press.
- Lapusta, N., J. Rice, Y. Ben-Zion, et G. Zheng (2000). Elastodynamic analysis for slow tectonic loading with spontaneous rupture episodes on faults with rate- and state-dependent friction. *J. Geophys. Res.* 105, 23765–23789.
- Li, V. et J. Rice (1983). Preseismic rupture progression and great earthquake instabilities at plate boundaries. *J. Geophys. Res.* 88, 4231–4246.
- Li, Y., K. Aki, J. Vidale, et M. Alvarez (1998). A delineation of the Nojima fault ruptured in the M7.2 Kobe, Japan, earthquake of 1995 using fault zone trapped waves. *J. Geophys. Res.* 103, 7247–7263.
- Li, Y., K. Aki, J. Vidale, S. Day, et D. Oglesby (2002). Characterization of spatial and temporal variations of Landers and Hector Mine rupture zones by fault-zone trapped waves. In *NIED International Workshop on Physics of Active Faults*, Abstracts, pp. 23.
- Li, Y., K. Aki, J. Vidale, et F. Xu (1999). Shallow structure of the Landers fault zone from explosion-generated trapped waves. *J. Geophys. Res.* 104, 20,257–20,275.

- Li, Y. et P. Leary (1990). Fault-zone trapped seismic waves. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 80, 1245–1271.
- Li, Y. et J. Vidale (1996). Low-velocity fault zone guided waves : Numerical investigations of trapping efficiency. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 86, 371–378.
- Li, Y., J. Vidale, K. Aki, C. Marone, et W. Lee (1994). Fine structure of the Landers fault zone : Segmentation and the rupture process. *Science* 249, 367–370.
- Li, Y., J. Vidale, K. Aki, F. Xu, et T. Burdette (1998). Evidence of shallow fault zone strengthening after the 1992 M7.5 Landers, California, earthquake. *Science* 279, 217–219.
- Madariaga, R. (1976). Dynamics of an expanding circular crack. *Bull. Seis. Soc. Am.* 66, 639–666.
- Madariaga, R. (1983). High frequency radiation from dynamic earthquake fault models. *Ann. Geophys.* 1(1), 17–23.
- Madariaga, R. et K. Olsen (2000). Criticality of rupture dynamics in 3-D. *Pure Appl. Geophysics* 157, 1981–2001.
- Madariaga, R., K. Olsen, et R. Archuleta (1998). Modeling dynamic rupture in a 3D earthquake fault model. *Bull. Seis. Soc. Am.* 88, 1182–1197.
- Marone, C. (1998a). The effect of loading rate on static friction and the rate of fault healing during the earthquake cycle. *Nature* 391, 69–72.
- Marone, C. (1998b). Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 26, 643–696.
- Marone, C. et S. Cox (1994). Scaling of rock friction constitutive parameters : the effects of surface roughness and cumulative offset on friction of gabbro. *Pure Appl. Geophys.* 143, 359–386.
- Marone, C. et B. Kilgore (1993). Scaling of the critical slip distance for seismic faulting with shear strain in fault zones. *Nature* 362, 618–621.
- Marone, C., C. Raleigh, et C. Scholz (1990). Frictional behavior and constitutive modeling of simulated fault gouge. *J. Geophys. Res.* 95, 7007–7025.
- Marone, C. et C. Scholz (1988). The depth of seismic faulting and the upper transition from stable to unstable slip regimes. *Geophys. Res. Lett.* 15, 621–624.
- Marone, C., C. Scholz, et R. Bilham (1991). On the mechanics of earthquake after-slip. *J. Geophys. Res.* 96, 8441–8452.
- Matsu'ura, M., H. Kataoka, et B. Shibasaki (1992). Slip-dependent friction law and nucleation processes in earthquake rupture. *Tectonophysics* 211, 135–148.
- Mikumo, T. (1992). Dynamic fault rupture and stress recovery processes in continental crust under depth-dependent shear strength and frictional parameters. *Tectonophysics* 211, 201–222.

- Mikumo, T., E. Fukuyama, K. Olsen, et Y. Yagi (2001). Stress-breakdown time and critical weakening slip inferred from the source time functions on earthquake faults. In *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, Volume 82 of *Fall Meeting Supplement*, pp. F844.
- Mikumo, T., K. Hirihara, et T. Miyatake (1987). Dynamical fault rupture processes in heterogeneous media. *Tectonophysics* 144, 19–36.
- Mikumo, T. et T. Miyatake (1978). Dynamic rupture process on a three-dimensional fault with non-uniform friction and near-field seismic waves. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* 54, 417–438.
- Mikumo, T. et T. Miyatake (1993). Dynamic rupture processes on a dipping fault and estimates of stress drop and strength excess from the results of waveform inversion. *Geophys. J. Int.* 112, 481–496.
- Miyatake, T. (1992). Reconstruction of dynamic rupture process of an earthquake with constraints on kinematic parameters. *Geophys. Res. Lett.* 19, 349–352.
- Myers, C., B. Shaw, et J. Langer (1996). Slip complexity in a crustal plane model of an earthquake fault. *Phys. Rev. Lett.* 77, 972–975.
- Nakatani, M., S. Kaneshima, et Y. Fukao (2000). Size-dependent microearthquake initiation inferred from high-gain low-noise observations at Nikko district, Japan. *J. Geophys. Res.* 105, 28095–28109.
- Nalbant, S., A. Hubert, et G. King (1998). Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the north Aegean Sea since 1912. *J. Geophys. Res.* 103, 24469–24486.
- Nguyen, Q. (2000). *Stabilité et mécanique non linéaire*. Hermes Sciences Publications.
- Nielsen, S., L. Knopoff, et A. Tarantola (1995). Model of earthquake recurrence : role of elastic wave radiation, relaxation of friction, and inhomogeneity. *J. Geophys. Res.* 100, 12423–12430.
- Nielsen, S. et K. B. Olsen (1998). A mixed boundary condition for rupture dynamics in finite difference simulations. In *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, Volume 79 of *Fall Meeting Supplement*, pp. F630.
- Oglesby, D. (1999). *Earthquake dynamics on dip-slip faults*. Ph. D. thesis, Univ. of Calif., Santa Barbara.
- Oglesby, D., R. Archuleta, et S. Nielsen (1998). Earthquakes on dipping faults : the effects of broken symmetry. *Science* 280, 1055–1059.
- Oglesby, D., R. Archuleta, et S. Nielsen (2000). Dynamics of dip-slip faulting : explorations in two dimensions. *J. Geophys. Res.* 105, 13643–13653.
- Oglesby, D. et S. Day (2001). The effect of fault geometry on the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 28, 1831–1834.
- Ohnaka, M. (1973). Experimental studies of stick-slip and their application to the earthquake source mechanism. *J. Phys. Earth* 21, 285–303.

- Ohnaka, M. (1986). Dynamic breakdown processes and the generating mechanism for high frequency elastic radiation during stick-slip instabilities. In S. Das, J. Boatwright, et C. Scholz (Eds.), *Earthquakes Source Mechanics* (Union Monogr. ed.), Volume 24, pp. 13–24. Washington, DC : Am. Geophys. Union.
- Ohnaka, M. (1996). Nonuniformity of the constitutive law parameters for shear rupture and quasistatic nucleation to dynamic rupture : a physical model of earthquake generation processes. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 93, 3795–3802.
- Ohnaka, M. (2000). A physical scaling relation between the size of an earthquake and its nucleation zone size. *Pure Appl. Geophys.* 157, 2259–2282.
- Ohnaka, M., Y. Kuwahara, et K. Yamamoto (1987). Constitutive relations between dynamic physical parameters near a tip of the propagating slip zone during stick-slip shear failure. *Tectonophysics* 144, 109–125.
- Ohnaka, M. et L. Shen (1999). Scaling of the shear rupture process from nucleation to dynamic propagation : implications of geometric irregularity of the rupturing surfaces. *J. Geophys. Res.* 104, 817–844.
- Ohnaka, M. et K. Yamamoto (1984). Experimental studies of failure nucleation and propagation along simulated faults in rock, study on short-period behavior in fault motion and estimation of input seismic motion. In R. Sato (Ed.), *Final Tech. Rep A-59-3*, Tokyo, pp. 11–46. Univ. Tokyo.
- Ohnaka, M. et T. Yamashita (1989). A cohesive zone model for dynamic shear faulting based on experimentally inferred constitutive relation and strong motion source parameters. *J. Geophys. Res.* 94, 4089–4104.
- Okubo, P. (1989). Dynamic rupture modeling with laboratory-derived constitutive relations. *J. Geophys. Res.* 94, 12321–12335.
- Okubo, P. et J. Dieterich (1984). Effects of physical fault properties on frictional instabilities produced on simulated faults. *J. Geophys. Res.* 89, 5817–5827.
- Olsen, K., E. Fukuyama, et T. Mikumo (2001). Direct measurement of the slip weakening distance from near-fault strong motion data? In *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, Volume 82 of *Fall Meeting Supplement*, pp. F844.
- Olsen, K., R. Madariaga, et R. Archuleta (1997). Three-dimensional dynamic simulation of the 1992 Landers earthquake. *Science* 278, 834–838.
- Perrin, G., J. Rice, et G. Zheng (1995). Self-healing slip pulse on a frictional surface. *J. Mech. Phys. Solids* 43, 1461–1495.
- Power, W., T. Tullis, S. Brown, G. Boitnott, et C. Scholz (1987). Roughness of natural fault surfaces. *Geophys. Res. Lett.* 14, 29–32.
- Quin, H. (1990). Dynamic stress drop and rupture dynamics of the October 15, 1979 Imperial Valley, California earthquake. *Tectonophysics* 175, 93–117.
- Ramanathan, S. (1997). *Crack propagation through heterogeneous media*. Phd thesis, Harvard University, Cambridge, Massachusetts.

- Raous, M. (1999). Quasistatic Signorini problem with Coulomb friction and coupling to adhesion. In P. Panagiotopoulos et P. Wriggers (Eds.), *New developments in contact problems*, Number 384 in CISM courses and lectures, pp. 101–178. Washington, DC : Springer.
- Rice, J. (1983). Constitutive relations for fault slip and earthquake instabilities. *Pure Appl. Geophysics* 121, 443–475.
- Rice, J. (1993). Spatio-temporal complexity of slip on a fault. *J. Geophys. Res.* 98, 9885–9907.
- Rice, J. (1999). Flash heating at asperity contacts and rate-dependent friction. In *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, Volume 80 of *Fall Meeting Supplement*, pp. F681.
- Rice, J. (2001). New perspectives on crack and fault dynamics. In H. Aref et J. Phillips (Eds.), *Mechanics for a new millenium (Proc. of the 20th ICTAM, 2000, Chicago)*, pp. 1–23. Kluwer Academic.
- Rice, J. et Y. Ben-Zion (1996). Slip complexity in earthquake fault models. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 93, 3811–3818.
- Rice, J. et A. Ruina (1983). Stability of steady frictional slipping. *J. Appl. Mech.* 105, 343–349.
- Rudnicki, J. (1988). Physical models for earthquake instability and precursory processes. *Pure Appl. Geophysics* 126(2/3/4), 531–554.
- Ruina, A. (1983). Slip instability and state variable friction laws. *J. Geophys. Res.* 88, 10359–10370.
- Sato, T. et H. Kanamori (1999). Beginning of earthquakes modeled with the Griffith's fracture criterion. *Bull. Seism. Soc. Am.* 89, 80–93.
- Scherbaum, F. (1996). *Of poles and zeros : fundamentals of digital seismology*. Netherlands : Kluwer Academic Publishers Press.
- Scherbaum, F. et M. P. Bouin (1997). FIR filter effects and nucleation phases. *Geophys. J. Int.* 130, 661–668.
- Schmittbuhl, J., F. Schmitt, et C. Scholz (1995). Scaling invariance of crack surfaces. *J. Geophys. Res.* 100, 5953–5973.
- Schmittbuhl, J., J.-P. Vilotte, et S. Roux (1995). Reliability of self-affine measurements. *Physical Review E* 51, 131–147.
- Scholz, C. (1988). The critical slip distance for seismic faulting. *Nature* 336, 761–763.
- Scholz, C. (1998). Earthquakes and friction laws. *Nature* 391, 37–42.
- Schwartz, S. (1999). Noncharacteristic behavior and complex recurrence of large subducton zone earthquakes. *J. Geophys. Res.* 104, 23111–23125.
- Shapiro, N., K. Olsen, et S. Singh (2000). Wave-guide effects in subduction zones : evidence from three-dimensional modeling. *Geophys. Res. Lett.* 27, 433–436.
- Shaw, B. (1995). Frictional weakening and slip complexity on earthquake faults. *J. Geophys. Res.* 100, 18239–18248.

- Shaw, B. et J. Rice (2000). Existence of continuum complexity in the elastodynamics of repeated fault ruptures. *J. Geophys. Res.* *105*, 23791–23810.
- Shibazaki, B. et M. Matsu'ura (1992). Spontaneous processes for nucleation, dynamic propagation, and stop of earthquake rupture. *Geophys. Res. Lett.* *19*, 189–192.
- Shibazaki, B. et M. Matsu'ura (1998). Transition process from nucleation to high-speed rupture propagation : scaling from stick-slip experiments to natural earthquakes. *Geophys. J. Int.* *132*, 14–30.
- Shibazaki, B., Y. Yoshida, M. Nakamura, M. Nakamura, et H. Katao (2002). Rupture nucleations in the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake and its large aftershocks. *Geophys. J. Int.* *149*, 572–588.
- Shimazaki, K. (1986). Small and large earthquakes : the effects of the thickness of the seismogenic layer and the free surface. In S. Das, J. Boatwroth, et C. Scholz (Eds.), *Earthquake Source Mechanics*, pp. 209–216. Washington D.C. : American Geophysical Union.
- Simo, J. (1992). Algorithms for static and dynamic multiplicative plasticity that preserve the classical return mapping schemes of the infinitesimal theory. *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* *99*, 61–112.
- Singh, S., M. Ordaz, T. Mikumo, J. Pacheco, C. Valdés, et P. Mandal (1998). Implications of a composite source model and seismic-wave attenuation for the observed simplicity of small earthquakes and reported duration of earthquake initiation phase. *Bull. Seism. Soc. Am.* *88*, 1171–1181.
- Singh, S., M. Rodriguez, et L. Esteva (1983). Statistics of small earthquakes and frequency of occurrence of large earthquakes along the Mexican subduction zone. *Bull. Seis. Soc. Am.* *73*, 1779–1796.
- Sleep, N. (1997). Application of a unified rate and state friction theory to the mechanics of fault zones with strain localization. *J. Geophys. Res.* *102*, 2875–2895.
- Somerville, P., K. Irikura, R. Graves, S. Samada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, et A. Kowada (1999). Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong motion. *Seism. Res. Lett.* *70*, 59–80.
- Spudich, P. et K. Olsen (2001). Fault zone amplified waves as a possible seismic hazard along the Calaveras fault in central California. *Seism. Res. Lett.* *28*, 2533–2536.
- Stuart, W. (1979). Strain softening prior to two-dimensional strike slip earthquakes. *J. Geophys. Res.* *84*, 1063–1070.
- Stuart, W. et G. Mavko (1979). Earthquake instability on a strike slip fault. *J. Geophys. Res.* *84*, 2153–2160.
- Tse, S., R. Dmowska, et J. Rice (1985). Stressing of locked patches along a creeping fault. *Bull. Seis. Soc. Am.* *75*, 709–736.
- Tse, S. et J. Rice (1986). Crustal earthquake instability in relation to the depth variation of frictional slip properties. *J. Geophys. Res.* *91* (B9), 9452–9472.

- Tsutsumi, A. et T. Shimamoto (1997). High-velocity frictional properties of gabbro. *Geophys. Res. Lett.* 24, 699–702.
- Tullis, T. et J. Weeks (1986). Constitutive behavior and stability of frictional sliding of granite. *Pure Appl. Geophys.* 124, 383–414.
- Uenishi, K. et J. Rice (2003). Universal nucleation length for slip weakening rupture instability under non-uniform fault loading. *J. Geophys. Res.* 108(B1), 10.1029/2001JB001681.
- Uenishi, K., J. Rice, et J.-P. Ampuero (2001). Universal nucleation length for slip-weakening rupture instability under heterogeneous fault loading. In *EOS Trans. AGU*, Volume 82 of *Fall Meeting Supplement*, pp. S52B–0624.
- Umeda, Y. (1990). High-amplitude seismic waves radiated from the bright spot of an earthquake. *Tectonophysics* 175, 81–92.
- Umeda, Y. (1992). The bright spot of an earthquake. *Tectonophysics* 211, 13–22.
- Umeda, Y., T. Yamashita, T. Tada, et N. Kame (1996). Possible mechanisms of dynamic nucleation and arresting of shallow earthquake faulting. *Tectonophysics* 261, 179–192.
- Vandembroucq, D. et S. Roux (1997). Conformal mapping on rough boundaries I : Applications to harmonic problems. *Physical Review E* 55(5), 6171–6185.
- Virieux, J. (1986). *Séismes : rupture et onde*. Thèse de doctorat d'état, Univ. Paris VII.
- Virieux, J. et R. Madariaga (1982). Dynamic faulting studied by a finite difference method. *Bull. Seis. Soc. Am.* 72, 345–369.
- Vola, D., E. Pratt, M. Jean, et M. Raous (1998). Consistent time discretization for a dynamical frictional contact problem and complementary techniques. *Rev. Eur. Eléments Finis* 7, 149–162.
- Wald, D. (1996). Slip history of the 1995 Kobe, Japan, earthquake determined from strong motion, teleseismic and geodetic data. *J. Phys. Earth* 44, 489–503.
- Wesnousky, S. (1994). The Gutenberg-Richter or characteristic earthquake distribution : which is it? *Bull. Seis. Soc. Am.* 84, 1940–1959.
- Wesnousky, S., C. Scholz, K. Shimazaki, et T. Matsuda (1983). Earthquake frequency distribution and the mechanics of faulting. *J. Geophys. Res.* 88, 9331–9340.
- Yamashita, T. (1995). Simulation of seismicity due to ruptures on non-coplanar interactive faults. *J. Geophys. Res.* 100, 8339–8350.
- Yamashita, T. (2000). Generation of microcracks by dynamic shear rupture and its effects on rupture growth and elastic wave radiation. *Geophys. J. Int.* 143, 395–406.
- Yamashita, T. et E. Fukuyama (1996). Apparent critical slip displacement caused by the existence of a fault zone. *Geophys. J. Int.* 125, 459–472.
- Yamashita, T. et M. Ohnaka (1991). Nucleation process of unstable rupture in brittle regime : a theoretical approach based on experimentally inferred relations. *J. Geophys. Res.* 96, 8351–8367.

-
- Yoshida, S., K. Koketsu, B. Shibasaki, T. Sagiya, T. Kato, et Y. Yoshida (1996). Joint inversion of near- and far-field waveforms and geodetic data for the process of the 1995 Kobe earthquake. *J. Phys. Earth* *44*, 437–454.
- Zeng, Y., K. Aki, et T.-L. Teng (1993). Mapping of the high frequency source radiation for the Loma Prieta earthquake, California. *J. Geophys. Res.* *98*, 11981–11993.

Résumé. La mécanique de la nucléation des séismes est étudiée en utilisant des lois de frottement dépendantes du glissement. Par l'analyse des bifurcations quasi-statiques d'une faille homogène nous interprétons la phase de nucléation stable en termes de localisation du glissement. La caractérisation des bifurcations donne des renseignements robustes, vis à vis de la présence d'hétérogénéités structurales sur la faille, et un lien apparent entre la taille d'un séisme et sa taille de nucléation. Nous étudions le régime d'initiation dynamique dans le cadre du modèle de Campillo et Ionescu (1997). Nous y introduisons la structure de la zone de faille et discutons ses effets sur les propriétés de la phase de nucléation sismique. Une méthode de mesure sismologique du taux d'affaiblissement effectif W est fondée sur la croissance exponentielle du taux de moment sismique prédite par ce modèle. La méthode est appliquée au séisme de Kobé et autres. Nous observons, sur une large gamme de magnitudes, la dépendance d'échelle de W ou alternativement sa non linéarité. Aux temps très courts le taux de moment sismique présente aussi une croissance en loi de puissance. Un modèle combinant le comportement exponentiel du glissement à la croissance de la zone de glissement est proposé. Finalement, nous développons une nouvelle méthode numérique pour la simulation de la rupture dynamique. Elle est fondée sur la méthode d'Eléments Spectraux. Nous proposons des solutions pour le contrôle des oscillations numériques dans les problèmes de rupture faiblement réguliers.

Mots-clés : séisme, phase de nucléation sismique, initiation, rupture, instabilité, frottement, localisation, modélisation numérique, Eléments Spectraux.

Abstract. The mechanics of earthquake nucleation are studied under slip dependent friction laws. Owing to a quasi-static bifurcation analysis in a homogeneous fault the stable nucleation phase is interpreted as a slip localization process. Characterization of the bifurcations gives informations that are robust to the presence of structural heterogeneities along the fault, and an apparent link between earthquake size and its nucleation size. We study the dynamic initiation regime in the framework of the model of Campillo et Ionescu (1997). We introduce the structure of the fault zone and we discuss its effects on the properties of the seismic nucleation phase. A method to measure the effective weakening rate W directly from seismograms is built on the exponential growth of seismic moment rate predicted by the model. The method is applied to seismological data from the Kobe earthquake and others. We observe, over a large range of magnitudes, the scale dependence of W or alternatively its non linearity. At very short time scales the seismic moment rate features also a power law onset. A model is proposed that combines the exponential behavior of slip to the growth of the slipping patch. Finally, we develop a novel numerical method for rupture dynamics modelling, based on the Spectral Element method. We propose two solutions to control spurious numerical oscillations in weakly regular rupture problems.

Key words : earthquake, seismic nucleation phase, initiation, rupture, instability, friction, localization, numerical modelling, Spectral Elements.