

UNIVERSITÉ PARIS 7 - DENIS DIDEROT
UFR des Sciences Physiques de la Terre

2002

THÈSE

pour l'obtention du diplôme de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PARIS 7
SPÉCIALITÉ : Géophysique Interne

présentée et soutenue publiquement
par

Jean-Paul AMPUERO

le jeudi 3 octobre 2002

**Etude physique et numérique
de la nucléation des séismes**

Directeur de thèse : Jean-Pierre VILOTTE

JURY

M. Philippe LOGNONNEPrésident
M. Raul MADARIAGA Rapporteur
M. Francisco-José SANCHEZ-SESMA Rapporteur
M. Pascal BERNARD Examineur
M. Michel CAMPILLO Examineur

*A Papa Lucho con Bigotes,
a la Selva,
a Waro.*

Table des matières

Préface	ix
Remerciements	xi
1 Introduction	1
1.1 Hétérogénéité et comportement des failles	2
1.1.1 De leur complexité structurale et dynamique	2
1.1.2 Lois de frottement expérimentales	5
1.1.3 Contraintes sismologiques	11
1.2 Nucléation de la rupture : observations et modèles	12
1.2.1 Quelques précisions lexicales	12
1.2.2 Observations en laboratoire.	13
1.2.3 Observations sismologiques	14
1.2.4 Modèles de nucléation sismique proposés	20
1.2.5 Nucléation et cycle sismique	22
1.3 Modélisation numérique de la rupture	25
1.3.1 Enjeux actuels	25
1.3.2 Méthodes existantes	26
1.4 Aperçu de cette thèse	29
2 Nucléation quasistatique	31
2.1 Description du modèle élémentaire	32
2.1.1 Introduction	32
2.1.2 Géométrie du problème	33
2.1.3 Interactions élastiques : raideur d'interface	38
2.1.4 Loi de comportement de l'interface	39
2.2 Localisation dans un modèle homogène	41
2.2.1 Stabilité du glissement uniforme	41

2.2.2	Détection analytique des bifurcations de localisation	44
2.2.3	Remarques et conséquences	45
2.2.4	Comportement autour du point de bifurcation	49
2.2.5	Levée de la non unicité et stabilité revisitée	51
2.2.6	Réponse post-bifurcation	54
2.2.7	Effet de l'irréversibilité	61
2.3	Effets macroscopiques des hétérogénéités	68
2.3.1	Distribution sinusoïdale	69
2.3.2	Etude perturbative de la sensibilité aux hétérogénéités	71
2.3.3	Effet des hétérogénéités sur la bifurcation	76
2.4	Discussion et implications géophysiques	82
2.5	Taille de nucléation et taille finale de l'instabilité	86
2.5.1	Limite quasi-statique	87
2.5.2	Dynamique simple	89
2.5.3	Cas d'une faille de taille finie	92
2.6	Modèle micromécanique	95
2.A	Annexe : Représentation spectrale du noyau d'interaction statique	100
2.B	Annexe : Noyau élastostatique pour une faille périodique en milieu infini	100
2.C	Annexe : Discrétisation du noyau statique	101
3	Nucléation dynamique et observables sismologiques	103
3.1	Nucléation dynamique et zones de faille	104
3.2	Bases pour une méthode observationnelle	120
3.2.1	Modèle canonique	120
3.2.2	Caractérisation par simulations numériques	121
3.2.3	Arguments analytiques	122
3.2.4	Observabilité de la phase exponentielle	125
3.3	Le séisme de Kobé et la zone de faille de Nojima	127
3.3.1	La phase de nucléation du séisme de Kobé	127
3.3.2	Autres contraintes sismologiques	131
3.3.3	La structure interne de la faille de Nojima	133
3.3.4	Evaluation de l'effet de la zone de faille sur la nucléation	136
3.3.5	Discussion	138
3.4	Phases de nucléation sur une vaste gamme de magnitudes	139
3.4.1	Mesure directe du taux de divergence s_m	139
3.4.2	Frottement dépendant d'échelle ou frottement non linéaire?	150

3.5	Caractéristiques de la phase de nucléation aux temps très courts	154
3.5.1	$\dot{M}_0 \propto t^4$ pour $t < 0.1$ s?	154
3.5.2	Quelques idées sur la cinématique et sur la dynamique	156
4	Dynamique de la rupture et Eléments Spectraux	159
4.1	Formulation du problème physique	160
4.1.1	Hypothèses élémentaires	160
4.1.2	Comportement dans le volume : équations de l'élastodynamique	160
4.1.3	Conditions aux limites sur la faille	162
4.2	Formulation faible	166
4.3	Le problème discret	168
4.3.1	Discrétisation spatiale : la méthode d'Eléments Spectraux	168
4.3.2	Discrétisation en temps : schémas de Newmark- α	171
4.4	Algorithme de résolution du problème discret	173
4.4.1	Principe de la méthode itérative	173
4.4.2	Condensation sur les candidats au contact	174
4.4.3	Algorithme prédicteur-correcteur	178
4.4.4	Remarques sur l'implémentation	179
4.5	Test 1D : nucléation dynamique uniforme	179
4.5.1	Formulation du problème et paramètres de référence	179
4.5.2	Solution analytique et analyse physique du problème	180
4.5.3	Paramètres et résultats numériques de référence	182
4.5.4	Caractérisation des oscillations parasites	185
4.6	Contrôle des oscillations par un schéma en temps dissipatif optimal	189
4.6.1	La famille de schémas EG- α	189
4.6.2	Résultats et discussion	192
4.7	Contrôle des oscillations parasites par un filtre spatial local	194
4.7.1	La base de Boyd et l'implémentation d'un filtre spectral	194
4.7.2	Résultats	196
4.8	Conclusions et perspectives sur les filtres	197
4.9	Test 2D : rupture intersonique	199
4.A	Annexe : décomposition BF/HF et méthode mixte	204
5	Conclusions et Perspectives	209

Préface

Notre image actuelle des tremblements de Terre superficiels est celle d'un épisode court de relâchement violent de l'énergie de déformation élastique cumulée au cours d'une longue période de chargement tectonique. Bien que nous parlions souvent de *rupture* sismique, d'un point de vue macroscopique ce relâchement se produit par le glissement sur des plans de faiblesse préexistants dans la croûte ou sur des plans de contact entre plaques tectoniques : les failles. L'effet le plus agressif pour l'homme est le mouvement produit en surface par le champ d'ondes rayonné. Paradoxalement c'est ce même effet qui a permis au sismologue d'étudier *a posteriori* les sources sismiques, d'imager l'histoire brève de leur rupture et de la comparer à des modèles mécaniques ou à des observations analogues en laboratoire.

A mesure que notre connaissance de la cinématique des tremblements de Terre s'est améliorée, grâce notamment aux progrès instrumentaux et au déploiement de réseaux sismologiques denses, des idées plus fines sur la genèse des séismes ont trouvé des échos dans la nature. Les Chapitres 2 et 3 de cette thèse explorent, du point de vue de la modélisation mécanique déterministe, la question de la nucléation des séismes sur deux échelles de temps différentes mais complémentaires : l'échelle lente de préparation (nucléation quasi-statique) et l'échelle rapide d'initiation (nucléation dynamique). Existe-t-il un lien mécanique entre la taille de la zone de nucléation et la taille finale d'un séisme ? Que peut on observer pendant l'initiation d'un séisme et en quoi ces signaux nous renseignent-ils sur le comportement de la faille ?

Un des outils qui a permis des progrès majeurs dans notre compréhension de la dynamique des tremblements de Terre est la modélisation numérique. La complexité des processus physiques en jeu est telle que, malgré le progrès constant de la puissance de calcul, des méthodes de résolution générales sont encore recherchées. Le Chapitre 4 de cette thèse contient des développements méthodologiques nouveaux dans le cadre de la Méthode d'Elements Spectraux.

Le Chapitre 1 est une introduction aux notions et ordres de grandeur utiles dans nos discussions sur la nucléation des séismes et sur la simulation numérique de la rupture. Nous y présentons les motivations des problèmes qui seront traités dans les chapitres suivants. Ce chapitre contient finalement une description technique du contenu de cette thèse.

Remerciements

Jean-Pierre Vilotte m'a soutenu et guidé pendant ces dernières années et je lui dois beaucoup. Sa disponibilité a toujours été remarquable, ainsi que sa générosité, son ouverture scientifique et sa connaissance profonde de la mécanique et des méthodes numériques. Il s'est montré infatigable pendant nos interminables discussions et a su me *coacher* dans les moments de faiblesse. J'ai eu aussi la chance de découvrir son fin flair du whisky gratos dans les soirées *yuppie* de Caracas.

Je tiens à remercier chacun des membres de mon jury, en particulier pour avoir accompli en temps record la tâche difficile de lecture d'une version jeune de ce manuscrit. Que les nouveaux lecteurs en soient épargnés!

Philippe Lognonné m'a fait l'honneur de présider ce jury, malgré le sujet très lointain de son quotidien extraplanétaire.

J'ai apprécié la participation de Michel Campillo et de Pascal Bernard en tant qu'examineurs. Les travaux de Michel et de son équipe ont été source d'inspiration pour nos études dynamiques de la nucléation. Pascal a souvent été disponible pour partager ses idées sur les processus sismiques.

Je remercie énormément les rapporteurs de cette thèse, Raul Madariaga et Paco Sánchez-Sesma. Raul a fait preuve de grande rigueur dans sa lecture et ses conseils ont contribué à l'amélioration du manuscrit. D'autre part il a souvent su répondre à mes questions sur les aspects théoriques de la rupture et a contribué inconditionnellement à mon illusoire réputation de bon footballeur. Paco est venu de très loin pour cette occasion. Notre collaboration a été fructueuse, il a su raviver mon goût du piment et des maths. Je garderai toujours des souvenirs de sa générosité, des Watsy Tacos *al pastor*, des équations griffonnées sur les serviettes du Linné et de l'immanquable bouteille de *chile* dans la poche.

J'ai passé ces dernières années essentiellement à l'IPGP, dans un petit village pittoresque à l'autre bout du Département de Sismologie, qui résiste encore et toujours à la soif grâce à de nombreuses potions magiques apportées des quatre coins du monde. Ce fût le Tarantoland et ce devint le ... et non, on ne dit pas Vilotteland! En tout cas c'est resté une salle pleine de chaleur humaine, avec une flore exhubérante et une histoire que le dégustateur avisé saura déchiffrer sur la porte d'entrée (à moins que le Comité Hygiène et Sécurité n'ait des doutes sur les propriétés chronologiques du verre). Cette ambiance ne

serait pas ce qu'elle est sans notre Geneviève Moguilny, sans parler de toute son aide sur les questions informatiques et de sa rigueur avec LaTeX (N.B. je lui ai épargné la révision de cette version finale, donc s'il reste des *bugs* que sa réputation n'en soit pas compromise). Et tout ceci ne tournerait pas aussi bien sans la patience de Ghislaine Pernat. J'ai été reçu par les anciens, les derniers des Tarantolos : Christophe Barnes, toujours patient et pédagogue, et Marwan, le Commandant Charara, avec qui j'ai découvert la forêt du Manu et chez qui j'ai fait mon premier *ceviche*. J'y ai rencontré aussi la première génération de Vilottos, ou plutôt les éléments de transition : Dimi et Manu, qui m'ont introduit aux Eléments Spectraux, et le *compañero* Rolando Martin qui m'a fait découvrir les Piscines du Crocodile, et plus tard les micheladas, mojitos et tequilas du "Hijo del Cuervo" et du "Mama Rumba" à Mexico. Alex Fournier y a mis les pieds en même temps que moi et nous avons marqué des buts à l'italienne contre les italiens eux-mêmes. Merci aux autres membres de l'AGU-*team*, Eric Beucler et Eric Bellanger : nous avons vécu les dernières AGUs de l'Adelaide Inn, grands moments du rock. Les nouvelles générations ont su perpétuer les bonnes coutumes, et je leur fais confiance pour passer la relève avec honneurs, je salue Lydie, Julien, Carène, Fred et Elena et bien sûr John, Tom et Diego, les inconditionnels du foot du dimanche à Vincennes.

Merci à Michel, notre chef de l'incontournable Tour 27.

Merci aux gens de l'ENS : mon pote Hugo Perfettini (ça y est, t'as prédit le *big one*?) et Jean Schmittbuhl ; Anne et Sophie pour la balade au Stromboli ; mon ami Alon Ziv.

Merci à ceux avec qui j'ai causé séismes : Pascal Favreau, Ioan Ionescu, Jim Rice, Alain Cochard, Michel Bouchon, Marie-Paule Bouin et Stefan Nielsen ; et à ceux qui m'ont aidé à me procurer des données : Philippe Pézard et Bill Ellsworth.

Merci à Massimo Cocco et à Silvia Nardi pour les invites à Erice.

Merci aux gens de l'enseignement : Georges Pascal, Anne-Marie Maréchal, Anne Mangeney, Gaston Godard ... et encore une fois Eric Beucler pour sa tolérance.

Merci aux stagiaires pour le coup de main : Chantal, Fred et Benoît.

Merci à ceux qui m'ont accueilli dans mes séjours et visites à l'étranger : Jaime Campos, EK, DC, RF au DGF de Santiago du Chili ; Paco, JA, JL et les gens de "la cueva" à l'UNAM ; Jhonny Tavera à l'IGP de Lima ; Herbert Rendón, Michael Schmitz, VR, NO du Funvisis, Caracas. Merci spécialement à Monika Sobiesiak, por esos dias de sol y playa que me ayudaron tanto en la recta final. Gracias a mis tíos Carlos y Milly, y a mi familia en Caracas.

Merci à tous les potes péruviens du lycée que j'ai retrouvés à Paris : los Nanterrinos, Carlitos Presidente, el Chobi, Coné y Mayu, Paul ; gracias a mis patas de promo Alex, Christian "el Che" Guevara, Karina, Dieguito de Lima, David ; a mi yunta de barrio Aldo y a mi brother Alvarito ; a mi gran amigo el chino Oscar Ishizawa y a la gente de su promo ; y para no olvidar a nadie (o a casi nadie, que no es lo mismo pero es igual) un saludo al Gilles, a Gustavito y al Monstruo.

Gracias a mis grandes e incondicionales amigas Alicia, por perdonarme siempre, y Chela, por ser la primera y seguir siempre allí.

Gracias a aquellos que perdí de vista pero siguen sueltos por el mundo : José, Xavier, OR, VR, M, L y otros que iré recordando y buscando, paciencia.

Gracias a quienes en algún momento me acompañaron por este largo camino y que recuerdo con cariño : SR, NR y LSV.

Merci à Seb et Léonne, à Varghese et aux gens du resto et de la Taverne.

Salut aux voisins de Saint-Jacques, David et Philippe, aux gens de Nação et Abada Capoeira, aux gens du CNIF. Un grand merci à TC pour m'avoir ouvert une porte aux vents et à la mer, cette mer où il est finalement retourné.

Reservo estas últimas líneas para mi familia, mi gran familia, Luis, Ruth, Paolo y Giselle. Cada uno a su manera me ha mostrado su amor, su apoyo incondicional, su confianza. En la distancia he aprendido a apreciar mejor los pocos momentos que pasamos juntos. No defraudarlos ha sido el motor de socorro en mi accidentado navegar.

Dank mijn nieuw familie, Bernard en Magda, pour leur présence et leur soutien.

Gracias Karina,
por nuestro amor y por tu dulzura,
por creer en mí y soportarme en este largo año.
Lo mas difícil ya pasó.

"... and now it's done,
maybe there is more time to dance together.
I hope so."

(Paul G. Richards)

