

RECHERCHE PASSEE ET ACTUELLE

Sujet de thèse et résultats obtenus (1999-2003)

Titre : « Etude cinématique de la rupture sismique en champ lointain : méthodes et résolution »

Durant ma thèse de doctorat, j'ai travaillé au développement de méthodes décrivant la cinématique de la source sismique, et cela principalement à partir de données lointaines. Les ondes de volume et de surface générées par les séismes sont utilisées pour remonter au processus de source lui-même, en considérant des modèles de propagation des ondes déterministes (à partir des modèles de Terre globaux) ou empiriques (fournis par une réplique ou un précurseur du séisme, et appelés « fonctions de Green empiriques »). Deux situations sont alors considérées : soit l'on s'intéresse à un séisme précis, que l'on étudie spécifiquement (1), soit l'on s'intéresse aux séismes de forte magnitude dans leur globalité, et l'on cherche les caractéristiques cinématiques qui peuvent être résolues de manière quasi-automatique (2). Dans les deux cas, nous portons un intérêt particulier à la vitesse de rupture, que nous laissons librement varier sur la faille. L'approche (1) a été appliquée au séisme d'El Salvador (13/01/2001, Mw =7.7, profondeur ~50km) et a révélé que l'ensemble des données utilisées (champ lointain, régional et proche) est compatible avec le scénario suivant : la rupture s'est produite sur un plan plongeant à 60° vers la côte et s'est propagée à la fois vers la surface et le Nord-Ouest, à une vitesse de 3-3.5km/s. La surface de rupture est d'environ 50km x 25km, sur laquelle le glissement moyen atteint 3.5m. Le mécanisme normal s'explique bien par une accommodation de la flexion du slab. L'approche (2) nous a conduits à proposer une nouvelle description de la faille sismique : dans un souci de simplification, nous décrivons la rupture comme un ensemble de zones de glissement ayant chacune un glissement et une vitesse de rupture propres. Dès lors que l'on se restreint à des périodes assez longues (typiquement plus longues que le quart du temps de rupture) l'utilisation d'une ou de deux de ces zones rend bien compte des grands traits de la rupture. La pertinence de cette approche a été démontrée au travers des séismes d'Izmit (Turquie, 1999) et de Jalisco (Mexique, 1995). Nous avons développé à cette occasion une nouvelle méthode d'analyse par fonction de Green empirique, fondée sur l'inclusion de contraintes physiques dans la déconvolution. Cette méthode a été plus spécifiquement appliquée au séisme du Pérou du 23/06/2001 (Mw =8.3-8.4).

Articles associés : [1] [4] [5] (Voir liste de publications)

Travaux de recherche post-thèse (2003-)

- **Analyse robuste des caractéristiques principales de la rupture : application à l'information rapide et systématique**

- *Cadre général*

L'occurrence des récents séismes majeurs de subduction (Sumatra 2004, Chili 2010, Japon 2011) nous a rappelé que les méthodes d'identification rapide des séismes majeurs doivent être perfectionnées, entre autres pour permettre une alerte tsunami la plus fiable et la plus précoce possible. Par ailleurs, en terme de gestion de la crise postsismique, il est important que les autorités aient le maximum d'informations (magnitude, mais aussi profondeur, étendue du séisme...) à leur disposition en vue de gérer et d'organiser la réponse de la manière la plus adaptée. Enfin, la mise en place de méthodes fonctionnant en temps quasi-

réel ouvre également de vastes possibilités sur l'analyse systématique de la sismicité : des catalogues exhaustifs peuvent être constitués qui permettent de rechercher les points communs ou les différences de comportements des séismes en fonction de leur profondeur, de leur contexte tectonique... Ces analyses recourent ainsi des recherches sur la physique de la rupture (voir point suivant).

- *Travaux réalisés*

A la suite de la technique des « patchs de glissement » proposée en thèse, j'ai développé une méthode encore plus automatisable, basée sur la déconvolution des formes d'ondes téléseismiques. Cette approche permet de retrouver, en utilisant les premières 30 minutes du signal sismique, la magnitude, la profondeur, le mécanisme au foyer et les fonctions source du séisme. Cette méthode, appelée SCARDEC, a été validée sur les séismes de magnitude supérieure à 6 des vingt dernières années. Nous avons pu montrer que l'accord général était très bon avec d'autres études (en particulier Global CMT pour le mécanisme, la profondeur et la magnitude), et que nous pouvions donc appliquer cette approche de manière systématique. Cette information est aujourd'hui diffusée, environ 45 minutes après l'occurrence d'un séisme de magnitude supérieure à 5.5-6, au travers du site Web du réseau GEOSCOPE (geoscope.ipgp.fr). Elle est également transmise à d'autres organismes [Centre Sismologique Euro-Méditerranéen (CSEM-EMSC), International Seismological Centre (ISC)] et aux scientifiques qui le souhaitent (liste de diffusion mail, twitter @geoscope_ipgp). Ces méthodes déconvolutives ont également permis l'analyse rapide du séisme de Sumatra du 26/12/2004 (Magnitude 9.1) et de confirmer que cet événement catastrophique s'était propagé pendant environ 10 minutes et avait rompu une zone de plus de 1200km de long.

En parallèle à ces études utilisant les données mondiales, je travaille également sur les informations présentes dans les données proches. Nous avons ainsi proposé une méthode qui permet de définir la magnitude de moment de manière quasi-automatique à partir des données proches et régionales (distance <300km). Grâce aux temps de propagation courts entre la source et la station et à la simplicité de la méthode, nous pouvons obtenir une estimation robuste de la magnitude dans les minutes suivant l'événement, à condition qu'un minimum d'environ 4 stations aient enregistré le séisme. Cette technique est aujourd'hui appliquée en Equateur.

Articles associés : [4] [5] [8] [10] [14] [23] [32] (Voir liste de publications)

• **Mieux décrire et comprendre le processus de rupture**

- *Cadre général*

Lorsque les données sont de très bonne qualité (par exemple nombreuses données proches) et que les séismes présentent des caractéristiques particulières (longueur de rupture importante par exemple), il est possible d'améliorer notre connaissance de la physique de la rupture par l'étude précise de la cinématique des séismes. En particulier, la vitesse de rupture peut être déterminée, ce qui nous informe sur la mécanique des séismes. Un autre angle d'étude est l'analyse exhaustive de la sismicité pour laquelle les fonctions source constituent une information précieuse. La durée, la valeur extrême et la complexité de la fonction source se relient en effet à la chute de contrainte et à l'énergie radiée par le séisme. Mon activité de recherche est basée dans un premier temps sur l'observation et l'analyse des données, en vue d'améliorer notre connaissance des processus.

- *Travaux réalisés*

Plusieurs séismes m'ont stimulé à une analyse approfondie de leur processus de rupture. J'en donne ici trois exemples, correspondants à des contextes et des magnitudes différents. Je me suis ainsi intéressé aux séismes de Molise (Italie, Mw=5.8), qui présentent la particularité d'être des séismes « jumeaux ». En effet le 31/10/2002, s'est produit le premier choc suivi 29 heures plus tard d'un autre séisme, similaire en de nombreux points (mécanisme, magnitude, profondeur, cinématique) et presque contigu au premier.

Cette étude nous a permis de bien mettre en évidence la complexité du déclenchement sismique : même si les zones de rupture des 2 séismes étaient presque jointes, la propagation dynamique n'a pas été possible (ce qui aurait résulté en un seul séisme de magnitude 6.). Un mécanisme de transfert de contraintes, faisant peut-être intervenir des fluides, a été nécessaire pour déclencher le deuxième séisme. Plus récemment, nous avons analysé le séisme de Maule (Chili, 27/02/2010, magnitude 8.7-8.8) à partir d'une grande variété de données sismologiques et géodésiques. Nous avons pu mettre en évidence la rupture bilatérale de ce séisme, qui conduit à une extension globale d'environ 500km de long. Le glissement, qui dépasse 15m en profondeur, reste peu important au voisinage immédiat de la fosse, ce qui est compatible avec le tsunami modéré observé. Enfin, le séisme de Gorkha (Népal, 25/04/2015, magnitude 7.9) a pu être particulièrement bien imagé, en particulier grâce aux données d'interférométrie satellitaire. Le processus de rupture montre une propagation stable et simple de la rupture de l'Ouest vers l'Est (à une vitesse d'environ 3km/s), ce qui permet de comprendre – au moins en partie - pourquoi les radiations haute-fréquence sont restées modestes à Katmandou.

D'un autre côté, mes études ont continué à se porter sur le séisme du Kunlun (Tibet, 14/11/2001), qui est un des séismes qui nous a apporté le plus d'informations sur le fonctionnement de la rupture sismique dans les dernières années. Nous avons montré en 2003 que ce séisme avait eu une vitesse de rupture très rapide, plus rapide que la vitesse des ondes de cisaillement (« supershear »). Nous avons poursuivi ces études, en analysant le séisme par un réseau de stations sismologiques au Népal. Ce travail confirme notre résultat de 2003 et permet d'aller plus loin : nous avons montré que les zones de transitions entre vitesse de rupture lente et rapide sont les zones principales d'émission sismique de haute fréquence. Enfin, nous avons pu identifier les ondes de Mach, similaires à celles produites par un avion dépassant la vitesse du son, lors de la phase supershear du séisme du Kunlun. La mise en évidence, la compréhension, et les implications de ces séismes supershear constitue toujours aujourd'hui un de mes thèmes de recherche principaux.

Enfin, je me suis orienté vers des analyses plus globales des comportements des séismes, grâce aux méthodes automatiques mises en place pour l'observation en temps quasi-réel (voir point précédent). La méthode SCARDEC offre en effet le potentiel d'analyser de manière exhaustive les séismes de magnitude supérieure à 6 ; cela représente un catalogue de plusieurs milliers d'événements depuis les années 1990, ce qui permet de mettre en évidence de caractéristiques systématiques de la rupture sismique. J'ai pu montrer à ce sujet qu'indépendamment de la profondeur (entre la surface et 700km), les séismes conduisent à la même réduction de la déformation accumulée (« strain drop »). Autrement dit, le rapport entre le glissement moyen et la taille caractéristique de la rupture est indépendant de la magnitude et de la profondeur. Cette observation montre que malgré une physique probablement différente (la rupture par friction mécanique ne peut se produire à grande profondeur à cause de la très forte contrainte normale), les séismes de toute profondeur sont très similaires à l'échelle macroscopique.

Articles associés : [2] [6] [7] [9] [11] [13] [15] [16] [17] [18] [20] [24] [26] [28] [29] (Voir liste de publications)

- **Sismogénèse dans la subduction Andine**

- *Cadre général*

Les récents mega-séismes observés (Sumatra 2004, Chili 2010, Japon 2011) nous ont aussi rappelé l'enjeu de la compréhension des mécanismes conduisant au déclenchement des grands séismes de subduction. Dans ce contexte, je travaille depuis 2007 sur la subduction de l'Equateur. Ce pays a une zone de subduction très active, comme en témoignent le séisme de magnitude 8.8 en 1906 et les trois autres séismes de magnitude ~8 durant le XXème siècle (1942, 1958, 1979). Notre projet initial avait pour objectif principal de mieux décrire et comprendre les relations entre rupture sismique et mouvements tectoniques, avec un intérêt spécifique pour les processus de type « séismes lents ». Pour ce faire, nous

avons développé un prototype de station multiparamètres, qui inclut, sur un même point d'observation, un capteur sismologique large-bande, un capteur accélérométrique, et une antenne GPS. Ce dispositif nous permet d'observer toute la variété des mouvements tectoniques, qu'ils soient de forte ou faible amplitude, et de haute ou basse fréquence. Aidés par ce prototype, nous avons procédé à l'installation le long de la marge équatorienne de 9 de ces stations multi-paramètres, entre la fin de l'année 2008 et le début 2009 (Figure 1). La région d'étude est centrée sur la zone de rupture du séisme de 1942, avec une extension au Nord jusqu'à la ville d'Esmeraldas et au Sud jusqu'à celle de Portoviejo.

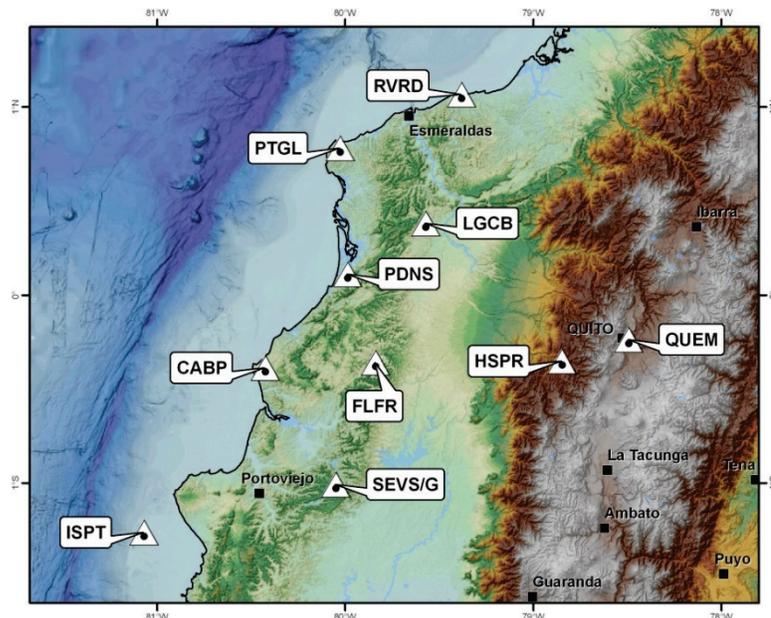


Figure 1 : réseau de stations multiparamètres déployé en Equateur en 2008-2009 (toujours en fonctionnement en 2016)

En Amérique du Sud, je travaille également depuis mon arrivée à l'IPGP sur les régions du Nord et Centre Chili, en particulier depuis l'occurrence début 2014 de la séquence sismique de Pisagua-Iquique (séisme principal de magnitude 8.1). Cette séquence, qui s'est produite dans un important gap sismique (pas de séisme majeur depuis environ 150 ans), a des caractéristiques très intrigantes, en particulier liées à l'abondance de séismes précurseurs. Ces études réalisées au Chili sont aujourd'hui en cours et seront détaillées dans la partie projet de ce document scientifique.

- *Travaux réalisés*

En Equateur, à partir des données large-bande et accélérométriques, j'ai mis en place une détermination semi-automatique des caractéristiques de source (magnitude, localisation, mécanisme), réalisée conjointement avec une optimisation de la structure. Cette technique, appelée MECAVEL (voir aussi [35]), utilise les formes d'ondes de toutes les données large-bande et/ou accélérométriques présentes dans le pays, modélisées par l'approche en nombre d'ondes discrets (Bouchon, 1981). En cas de séisme modéré ou important, cette approche permet de donner, rapidement après un événement sismique, une estimation de la magnitude plus fiable que celle fournie aujourd'hui par l'Institut local de Géophysique (magnitude de durée). Elle constitue la première information disponible, avant des études plus poussées, où des informations sur la cinématique et la dynamique de la source sismique seront recherchées.

D'un point de vue plus fondamental, nous avons travaillé sur la relation entre les séismes lents et la sismicité. Nous avons bénéficié d'une observation très claire à la station ISPT (Figure 1), qui montre qu'un séisme lent d'une durée d'une semaine s'est produit en août 2010. Le déplacement GPS, visible sur la

Figure 2 montre en effet un renversement du chargement intersismique sur la composante Est-Ouest, indiquant un glissement sur l'interface. Ces séismes lents ont été observés dans de nombreuses subductions depuis les années 1990, mais leur capacité à déclencher une abondante sismicité a rarement été mise en évidence. Ici, la corrélation entre séisme lent et sismicité apparaît clairement, avec plusieurs centaines de séismes directement attribuables au séisme lent (Figure 2). L'étude fine de cette séquence montre que les séismes se produisent au voisinage immédiat de la zone de l'interface affectée par le séisme lent. Deux hypothèses peuvent ainsi être avancées : (1) l'interface de subduction peut avoir un comportement mixte et rompre à la fois de manière lente et sismique (2) la sismicité observée se produit sur des petites failles voisines de l'interface, mais pas directement sur cette dernière.

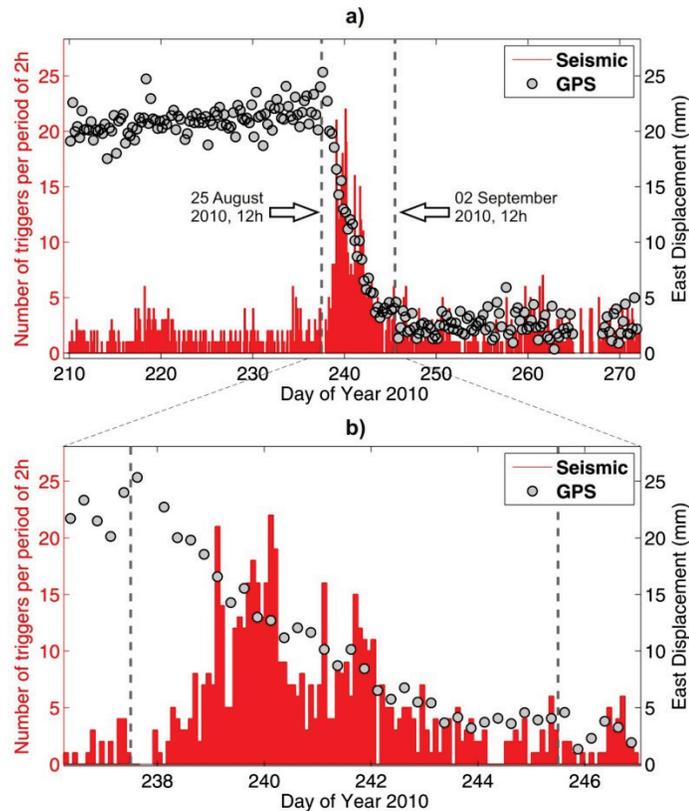


Figure 2 : observation à ISPT du séisme lent (points gris, indiquant le déplacement déduit des mesures GPS) et de la sismicité associée (indiquée par la fréquence des déclenchements, en rouge). La sous-figure a) montre une période de deux mois, tandis que la sous-figure b) est ciblée sur la période du séisme lent.

Enfin, une de nos raisons de nous impliquer dans l'amélioration de l'instrumentation en Equateur s'est concrétisée avec l'occurrence **du séisme de Pedernales le 16 avril 2016 (magnitude 7.8)**. Ce séisme s'est produit à proximité du séisme de 1942 (Figure 3) et se trouve donc bien entouré par les stations multiparamètres (GPS - large bande - accéléromètre) présentées dans la Figure 1.

Ainsi que détaillé dans l'article [34], ces observations directes de terrain ont tout d'abord permis d'analyser le séisme de Pedernales avec un détail bien supérieur aux séismes passés de la région. En y adjoignant les mesures par interférométrie satellitaire (InSAR) et les enregistrements sismiques à l'échelle du globe (entre autres par le réseau GEOSCOPE, le déroulement spatio-temporel de la rupture sismique a pu être reconstitué (Figure 4). Cette dernière s'est propagée unilatéralement vers le sud sur une distance de 100km, en rompant en 45 secondes l'interface entre les plaques, à des profondeurs entre 15 et 30km. Cette direction préférentielle de la rupture a créé une forte amplification des ondes sismiques pour les zones situées au sud de la rupture, à cause de l'effet de directivité. Cet effet explique au moins en partie les forts dégâts observés dans les villes de Portoviejo ou Manta tandis que les villes au Nord de la rupture

(Esmeraldas) ont été peu touchées. La rupture du séisme de Pedernales est également caractérisée par deux zones de glissement important, dont la plus forte atteint 6 mètres sur une surface de 30 x 30 km². La forte chute de contrainte associée et la position de cette zone directement sous la côte ont conduit à d'intenses accélérations du sol, surpassant en plusieurs endroits la valeur de la gravité.

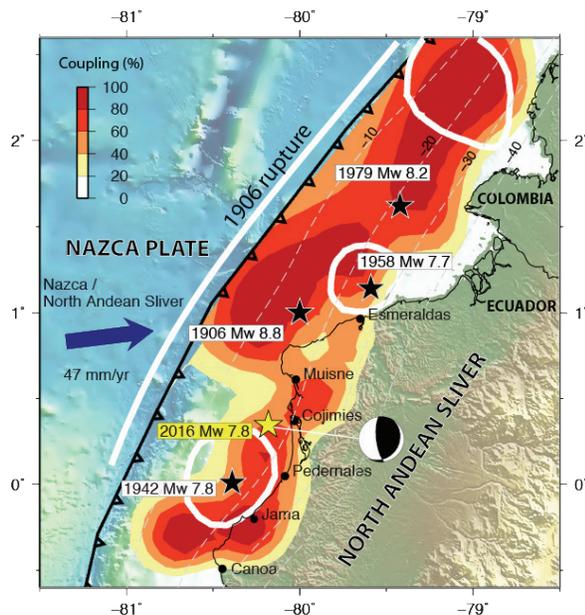


Figure 3 : Les grands séismes de la zone de subduction de l'Equateur depuis 1906. Les contours blancs indiquent les zones des ruptures passées, tandis que les couleurs représentent le couplage de l'interface de subduction (déterminé par GPS), un fort couplage correspondant à un potentiel sismique important. L'épicentre du séisme de Pedernales est indiqué par l'étoile jaune.

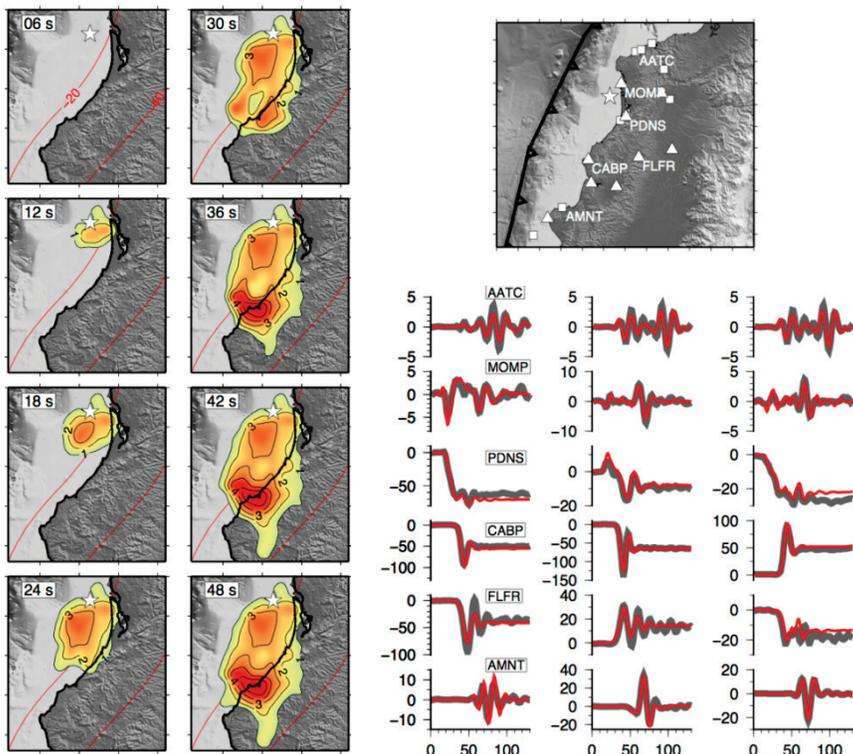


Figure 4 :
Processus de rupture du séisme de Pedernales. A gauche, instantanés de la progression de la rupture, indiquant le glissement (en mètres) qui s'accumule tous les 6 secondes. A droite, illustration de quelques stations utilisées pour l'analyse de la rupture du séisme. Les déplacements observés, en noir (en cm en fonction du temps en secondes), sont modélisés par les synthétiques en rouge. Les trois composantes de chaque point d'observation (Est à gauche, Nord au milieu, et verticale à droite) sont représentées.

En dépassant ensuite l'analyse du séisme lui-même, nous nous sommes penchés sur le fonctionnement sismogène de ce segment de la subduction. Les données GPS, qui permettent de déterminer quelles contraintes s'accumulent sur la subduction, année après année, révèlent que les déplacements induits par les séismes de 1942, 1958, 1979 et 2016 sont plus grands que le potentiel accumulé par le mouvement des plaques tectoniques depuis 1906. Autrement dit, la récurrence élevée de grands séismes depuis 1906 correspond à la libération de forces accumulées pendant plusieurs siècles. Des données récentes de paléosismologie marine acquises lors d'une campagne en mer en 2000 sur la marge équatorienne confirment une grande période de silence sismique avant le 20ème siècle et une séquence similaire à la fin du moyen-âge. La subduction nord-Equateur et sud-Colombie semble donc suivre ce comportement "**supercycle**", déjà indiqué par des méthodes de datation sur des failles continentales et la subduction de Sumatra. Faute de la connaissance précise de l'histoire des séismes sur une longue période de temps, ce fonctionnement complique fortement l'appréhension du risque sismique. L'occurrence d'un séisme, même important, ne conduit en tout cas pas à la conclusion intuitive d'une baisse momentanée de l'activité future. La subduction de l'Equateur témoigne même d'un fonctionnement opposé, en ayant été touchée par un nombre élevé de séismes depuis le grand tremblement de terre de 1906.

Articles associés : [21] [25] [27] [30] [34] (Voir liste de publications)

PROJETS DE RECHERCHE

- **Analyse exhaustive des fonctions source**

Les méthodes d'analyse rapide de la source que j'ai développées ces dernières années sont une porte d'entrée vers l'étude exhaustive et systématique des propriétés de source. Cela rejoint ainsi des études plus théoriques visant à mieux comprendre le fonctionnement générique et individuel des séismes. Dans ce domaine, mon arrivée à l'IPGP m'a permis de renouveler mes interlocuteurs, au sein de l'équipe de sismologie, mais aussi de tectonique de l'IPGP. La détermination exhaustive des fonctions source permet en effet des études transversales : leurs caractéristiques de durée, d'impulsivité ou de complexité sont à relier de manière fondamentale à la dynamique du processus de rupture ; d'un autre côté, ces caractéristiques sont aussi influencées par la morphologie des failles et probablement par leur histoire passée. Mon travail sur ces thématiques dans les deux dernières années a déjà permis la publication d'un article montrant que la chute de déformation (« strain drop ») lors d'un séisme est très peu dépendante de la magnitude et de la profondeur (ref [24]), et m'a conduit à piloter un projet INSU au cours de l'année 2014 sur la caractérisation des fonctions source. Ce travail se poursuivra dans les prochaines années, et en premier lieu avec la fin de la thèse d'Agnès Chounet, que j'encadre depuis l'automne 2014.

Nos objectifs dans ce domaine sont variés car l'étude de plusieurs milliers de fonctions source ouvre de larges perspectives sur l'analyse du processus de rupture. Nos travaux en cours nous indiquent par exemple un comportement spécifique des séismes se produisant sur l'interface de subduction par rapport aux séismes continentaux. Ces derniers ont en effet une impulsivité plus grande, qui témoigne d'une vitesse de rupture plus rapide et/ou d'une chute de contrainte plus forte. Pour séparer ces deux hypothèses, nous travaillons sur les fonctions sources *apparentes* - c'est-à-dire observées par chaque station - auxquelles nous avons aussi accès par la méthode SCARDEC. Leur analyse permet en effet de déterminer la direction préférentielle de la rupture sur la faille, ainsi que sa vitesse.

L'objectif général est de déterminer les caractéristiques du contexte d'occurrence des séismes qui ont une influence sur le processus de rupture. Pour les séismes de subduction, le caractère hydraté de l'interface ou le fait que cette interface a connu un grand nombre de cycles sismiques (concept de « maturité ») sont des candidats à leur impulsivité plus faible. De manière plus fine, nous détectons également des différences à l'intérieur des zones de subduction, qui ont une corrélation significative avec le couplage sismique observé par GPS : par exemple, le segment de subduction Nicaragua-El Salvador, où le couplage est faible, montre ainsi des séismes d'impulsivité encore plus faible que la moyenne des séismes de subduction. De telles observations motivent des modélisations mécaniques des interfaces peu couplées, capables de rendre compte simultanément du fait que le mouvement est principalement asismique, et que lorsque des séismes se produisent, ils ont une chute de contrainte et une énergie radiée plus faible.

Une autre richesse des fonctions source est d'offrir une observation systématique de la phase d'initiation de la rupture dynamique. L'impulsivité de la partie initiale des fonctions source, en fonction de la magnitude, est en effet un observable simple, mais qui a des conséquences profondes sur les origines du processus sismique lui-même : dans le cas d'une indépendance complète entre l'impulsivité et la magnitude, les séismes suivent un modèle type « cascade », dans lequel la magnitude finale est complètement imprévisible. Au contraire, si une corrélation apparaît, cela indique que les forts séismes ont, en moyenne, une signature différente dès le démarrage de leur stade dynamique. J'encadre depuis octobre 2016 un doctorant (Julien Renou), principalement sur ce sujet.

Enfin, l'intérêt d'un accès exhaustif aux fonctions source dépasse le cadre de l'analyse du processus sismique lui-même. En effet, deux autres domaines importants de la sismologie bénéficient d'une meilleure

description de la source sismique. Les mouvements forts liés aux séismes, et en particulier leur variabilité, sont fortement influencés par l'émission des ondes à la source, que la fonction source permet de caractériser. Les propriétés des fonctions source sont donc une information utile pour la mise en place de scénarios réalistes de séismes futurs. J'ai déjà commencé à collaborer sur ce sujet (ref [33]), en particulier à l'occasion du projet INSU que j'ai piloté durant l'année 2014. D'un autre côté, l'analyse de la structure terrestre à l'échelle globale se tourne vers la modélisation des formes d'ondes à des fréquences de plus en plus hautes, qui deviennent donc fortement sensibles à la manière précise avec laquelle la Terre a été excitée, et donc à la fonction source. Je suis ainsi amené à collaborer avec plusieurs groupes [à Munich (LMU), à Londres (UCL), à l'Université du Michigan] en vue d'évaluer l'intérêt d'utiliser des fonctions source précises pour résoudre des détails fins de la structure terrestre (par exemple la topographie de l'interface noyau-manteau).

Cet intérêt multi-disciplinaire pour l'analyse des fonctions source nous a récemment poussés à publier un résumé synthétique de la méthode SCARDEC (ref [33]), article dont le but est également de permettre et de décrire l'accès global aux fonctions source des séismes depuis 1992 (voir la page web : <http://scardec.projects.sismo.ipgp.fr/>). J'anticipe que l'accès libre à ces informations stimulera des collaborations variés avec la communauté sismologique.

- **La rupture sismique éclairée par l'analyse fine de séismes individuels**

J'ai aussi l'objectif de me concentrer sur l'analyse de séismes particuliers, dont les caractéristiques propres et la qualité des données stimulent une étude approfondie ; à titre d'exemple dans ma recherche passée, le séisme du Kunlun (Tibet, 2001, Mw=7.9) a constitué une de ces cibles spécifiques, et nous a permis de mettre en évidence les vitesses de rupture supershear (vitesses entre celles de l'onde S et de l'onde P). Les preuves d'existence de ces vitesses rapides ont depuis stimulé de nombreuses approches numériques et expérimentales qui ont cherché à comprendre sous quelles conditions et comment la rupture passe dans le régime supershear, et quelles en sont les conséquences en termes d'alea sismique. Il a ainsi pu être montré que le passage dans le régime supershear se fait par la génération d'une rupture secondaire en avant du front de rupture, qui conduit l'ensemble de la rupture à se propager à des vitesses supershear. Les ondes de Mach générées deviennent la composante dominante du champ d'ondes, et ont donc une forte influence sur les mouvements forts engendrés.

Dans le même esprit, j'ai travaillé récemment sur un doublet de séismes dans la mer de Scotia (2003 et 2013), qui montre que la rupture d'une faille par un séisme de magnitude importante (Mw=7.6) n'empêche pas la récurrence rapide, 10 ans après, d'un autre séisme de forte magnitude (Mw=7.8) (ref [26]). L'implication de cette observation est ici double : (1) mécaniquement, cela indique que la chute de contrainte statique liée à un fort séisme n'empêche la faille de rompre à nouveau de manière précoce. Une interprétation plausible est que seule la nucléation requiert une configuration très propice à la rupture. Une fois le processus initié, les contraintes dynamiques générées en avant du front de rupture dominant, et permettent de casser une faille qui n'est pas dans une configuration « optimale ». Une autre interprétation possible vient du concept de « supercycle » récemment proposé et pour lequel nous avons de forts indices d'occurrence en Equateur (ref [34]). Ce concept implique qu'une fin de cycle sismique peut plus facilement conduire à des événements multiples, plutôt qu'à un seul événement. (2) En termes d'alea sismique, une rupture récente d'une faille par un séisme important n'implique ainsi pas que la faille en question devient « sûre ».

J'ai le but de poursuivre ce type d'études dans lesquelles l'observation par des techniques sismologiques variées nourrit la compréhension mécanique du processus sismique. Un intérêt des études systématiques développées dans le point précédent est précisément de détecter rapidement, par exemple par l'allure des fonctions source, ces séismes qui semblent pouvoir nous enseigner des éléments méconnus de la rupture sismique. Une fois détectés, la mise en place et l'adaptation de techniques variées que j'ai eu l'occasion de développer ou d'utiliser dans ma recherche passée (modélisation directe de la propagation ou

par fonction de Green empirique ; utilisation de données locales, régionales ou lointaines ; méthodes utilisant des réseaux des capteurs) permet d'entrer dans le détail de ces particularités du processus.

- **La sismogénèse en zone de subduction**

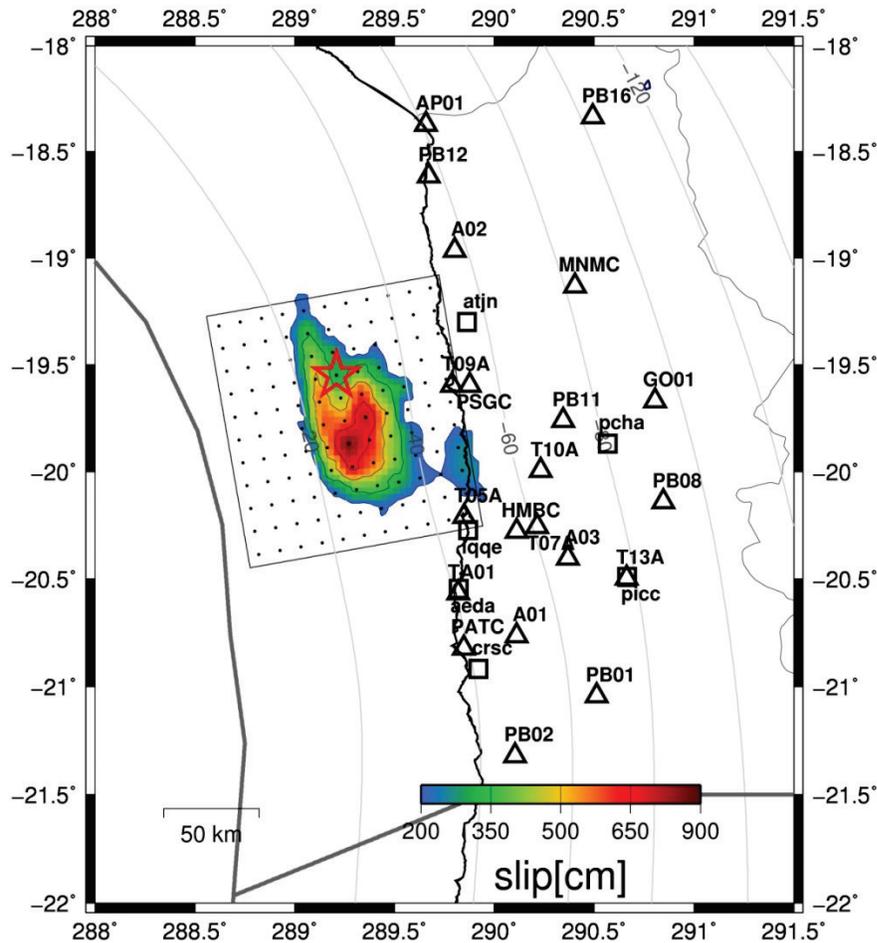


Figure 7 : Glissement cosismique associé au séisme majeur de la séquence de Pisagua ($M_w=8.1$, 1^{er} avril 2014). Ce glissement a été déterminé par l'inversion de l'ensemble des stations proches indiquées sur la figure (triangles : accéléromètres ; carrés : GPS haute fréquence) et des données téléseismiques.

J'ai l'intention de continuer à travailler sur le cycle sismique en zone de subduction. Je suis impliqué dans l'étude de la subduction chilienne, qui est un des projets importants des équipes de sismologie et de tectonique de l'IPGP et de l'ENS. Dans ce cadre, je travaille sur le séisme d'Illapel (Chili central, 16/09/2015, magnitude 8.2) suite aux travaux de M2 de Julien Renou, et je suis investi dans l'étude de la séquence sismique de Pisagua (Nord-Chili). Cette séquence a culminé avec deux séismes de magnitude 8.1 et 7.6 en avril 2014, dont j'analyse précisément les caractéristiques. La Figure 7 présente un modèle du glissement du choc principal, qui utilise la grande majorité des données sismologiques et géodésiques disponibles au voisinage du séisme, et qui inclut également les données tsunamis dans l'inversion. Ces dernières apportent un fort contrôle sur l'extension vers l'Ouest de la rupture, et montrent ainsi que le séisme n'a pas rompu la partie voisine de la fosse. Cette recherche s'inscrit dans la meilleure

compréhension de la séquence présismique, et a en particulier le but d'imager au mieux l'éventuel recouvrement entre la zone affectée par les séismes précurseurs et celle touchée par les séismes principaux.

Par ailleurs, durant mes années passées comme chargé de recherche à l'IRD (2004-2012), j'ai été fortement impliqué sur l'étude de la subduction en Equateur. Les travaux reliés aux séismes lents que nous observons dans cette zone de subduction (réf [21]; voir mes activités de recherche passées) se sont poursuivis au cours de la thèse de doctorat de Sandro Vaca (2014-2017). Il apparaît aujourd'hui que les séismes lents se produisent de manière récurrente en Equateur et dans des contextes différents en termes de couplage sismique. Nous cherchons à documenter au mieux les phénomènes couplés associant séismes lents et sismicité classique afin de mieux appréhender la variété de comportements que peut avoir une interface sismogénique. Ce thème a pris un nouvel intérêt avec l'occurrence du séisme de Pedernales (16 avril 2016) (ref [34]). En effet, une zone de séisme lents récurrents apparaît avoir joué le rôle de barrière pour la propagation du séisme.