



HAL
open science

Déformations post-sismiques après le séisme de Maule (Mw8.8, Chili, 2010) : mesures GPS et modélisation en éléments finis pour une asthénosphère viscoélastique

Emilie Klein

► **To cite this version:**

Emilie Klein. Déformations post-sismiques après le séisme de Maule (Mw8.8, Chili, 2010) : mesures GPS et modélisation en éléments finis pour une asthénosphère viscoélastique. Sciences de la Terre. Ecole normale supérieure - ENS PARIS, 2015. Français. NNT : 2015ENSU0046 . tel-01600011

HAL Id: tel-01600011

<https://theses.hal.science/tel-01600011>

Submitted on 2 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les zones de subductions constituent des laboratoires de choix pour l'étude des séismes géants. La rapidité de convergence des plaques dans ces zones engendre l'occurrence de ces séismes de manière cyclique, mettant ainsi clairement en évidence la notion de lacune sismique. Silencieuses pendant parfois plus d'un siècle, ces zones témoignent d'un niveau de blocage très fort, où donc la déformation s'accumule, jusqu'au prochain séisme. Le positionnement par GPS apparaît alors comme un instrument privilégié pour l'étude des déformations liées à ce cycle sismique. En effet, des plaques qui ont une forte vitesse de convergence avec un fort couplage se déforment intensément et les gradients de déformations sont très forts, ce qui peut être mesuré dès lors qu'on a une précision et une résolution suffisante, sur un grand domaine continental.

Présentant un contexte géodynamique relativement simple, par l'absence de faille secondaire très active, sans partitionnement net tout au long d'une interface quasiment rectiligne, le Chili apparaît comme un terrain de jeu parfait pour étudier le cycle sismique et la segmentation, toutes choses égales par ailleurs. Le continent Sud-Américain, situé en moyenne à 100 km de la fosse, rend possible des mesures d'une densité exceptionnelle proches de la zone de couplage.

L'étude des séismes géants (magnitude proche et supérieure à 9) présente alors un intérêt de premier ordre pour mieux comprendre les mécanismes de la subduction. En effet, ils excitent le manteau, déclenchant le mécanisme de relaxation visco-élastique, comme l'a montré le cas du séisme de Valdivia, dont les premières études utilisant la géodésie spatiale datent des années 2000. Cependant, les trois derniers séismes géants du 21^{ème} siècle nous ont donné en plus l'occasion de mesurer l'impulsion instantanée, le tremblement de terre, contrairement aux séismes antérieurs et à l'étude du rebond post-glaciaire. Le positionnement par GPS nous a ainsi permis de mesurer en continu la séquence *inter-sismique* → *co-sismique* → *post-sismique* des méga-séismes de Banda-Aceh (2004), Tohoku (2011) et bien sûr de Maule (2010) auquel est dédié cette thèse.

Le premier objectif de ma thèse est ainsi l'analyse précise des déformations post-sismiques de ce séisme de M_w 8.8, mesurées par GPS. Une large partie de ma thèse a été dédiée au traitement et à l'analyse minutieuse des séries temporelles de position. En effet, d'une part, l'évolution de la courbure du post-sismique se mesure au millimètre près. D'autre part, les déformations en champ lointain sont elles aussi millimétriques et d'autant plus difficiles à extraire à cause des perturbations dues à la qualité des mesures faites par des réseaux dont l'objectif n'est pas nécessairement scientifique, ou des perturbations géophysiques. Enfin, la composante verticale montre elle aussi un champ de déformations que l'on souhaite extraire et étudier, malgré toutes les complexités liées au traitement de cette composante par GPS. Résultantes d'un séisme significativement plus petit que ceux de Banda-Aceh et Tohoku, les déformations post-sismiques du Maule sont elles-aussi plus petites et rendent indispensable l'utilisation de données propres et précises. Cela m'a alors permis de retrouver des caractéristiques déjà mises en évidence après les précédents séismes géants, telles que l'extension spatiale sur plus de 2000 km ou encore le soulèvement de plusieurs cm/an de l'arc volcanique. Le continent Sud-Américain permet cependant, pour la première fois,

la mesure spatialement continue de ces déformations, l'Indonésie et le Japon étant des archipels, une bonne part de la déformation est sous l'eau. A partir de ce jeu de données exceptionnel, je suis donc repartie des acquis des précédentes modélisations des séismes de Banda-Aceh et de Tohoku, suivant la même méthodologie en éléments finis développée au laboratoire, pour modéliser le séisme de Maule et apporter de nouvelles contraintes sur la structure et la rhéologie du manteau et des divers interfaces impliquées dans la subduction.

De plus, l'étude du séisme de Maule s'intègre dans la continuité d'un chantier qui a commencé au Chili à la fin des années 90. Les missions de mesures ainsi menées depuis plus de deux décennies ont permis de déterminer le champ de vitesse inter-sismique quasiment tout au long de l'interface Chilienne. C'est en partie grâce à ces mesures que la lacune sismique du Maule a pu être mise en évidence deux ans avant que le séisme ne se produise. Ma thèse a ainsi été l'occasion de continuer ce chantier et de combler l'ultime gap de données, la région de Taltal, dont il a été montré qu'elle se trouvait entre deux lacunes sismiques fortement couplées. Loin d'être un travail isolé, cette partie de ma thèse conduit à l'objectif ultime de ce projet qui est la réalisation de modèles visco-élastiques de cycle à l'échelle de l'interface Chilienne. En effet, le modèle géométrique et rhéologique, calé sur le post-sismique du Maule, permettra de faire tourner ces modèles de cycle complet, à la lumière de l'incroyable quantité de données inter-sismiques acquises au terme de quinze ans de campagnes de mesures annuelles. On voit ainsi bien comment les problématiques s'imbriquent quand on observe que le post-sismique de Maule perturbe l'inter-sismique d'Illapel, avant ce dernier très grand séisme. Les segments "se parlent" et seule la modélisation visco-élastique complète à l'échelle de toute la subduction et de plusieurs cycles peut nous permettre de comprendre.

Mots clés : Chili, subduction, séismes géants, déformations post-sismiques, positionnement par GPS, modèles en éléments finis

Subduction zones are ideal natural laboratories to study giant earthquakes (of magnitude close of larger than 9). There, the convergence rate is sufficiently fast to generate such events cyclically, highlighting at the same time the notion of seismic gap. Typically silent during sometimes more than a century, these areas show a very high locking level, accumulating deformation until the next earthquake. GPS positioning is as a privileged instrument to study the deformation related to this cycle. Plates with a fast convergence rate and strong coupling deform a lot and gradients of deformation are very intense (several cm/yr per hundred km). They are easily quantified by modern geodetic tools like GPS, which is particularly efficient if the emerged lands reach near enough the subduction trough so that we get resolution on the pattern of accumulation of deformation on the surface.

With a geodynamic context relatively simple, thanks to the absence of active secondary fault zone, without any clear partitioning along an almost straight interface, Chile appears as the perfect playground to study the seismic cycle and the segmentation, all other things being equal. In contrast to the Indonesian or Japanese archipelagos, the South-American continent, located at an average of 100 km from the trench, makes possible ground measurements of a rare density very close from the coupling zone.

The study of giant earthquakes represents a main interest in the quest of a better understanding of the subduction mechanisms. Because they are large enough, they excite the mantle, which triggers the viscoelastic relaxation, as revealed by the first geodetic data at the end of the 90s after the Valdivia earthquake. However, the last three giant earthquakes of the 21th century were the first occasions to measure the impulse, meaning the earthquake, contrary to previous earthquakes (Valdivia and Alaska) and contrary to the postglacial rebound. Thanks to GPS positioning, we are now able to monitor continuously the sequence *interseismic* \rightarrow *coseismic* \rightarrow *postseismic* of the Banda-Aceh (2004), Tohoku (2011) and of course of the Maule (2010) earthquakes.

The first objective of my PhD is the precise analysis of the postseismic deformation following the Maule (2010) M_w 8.8 earthquake, measured by GPS. A large part of my time was thus dedicated to the processing and analysis of time series of station position. High precision is indeed required for several reasons. Firstly, the evolution of the postseismic curvature has to be measured at the millimeter level. Second, deformation in far-field is very small, and is especially difficult to extract because of different kind of perturbations, like poor quality measurements on non-scientific networks or non-tectonic geophysical sources. Third, we also want to extract and study the vertical component, despite all the complexities related to its processing. Resulting from a significantly smaller earthquake than the Banda-Aceh and the Tohoku events, the postseismic deformation following the Maule earthquake is also smaller and require a clean and very precise processing of the data. I was then able to extract characteristics already brought out following the previous giant earthquakes, such as the large spatial extent over more than 2000 km or the uplift of several centimeter per year of the volcanic arc. Nevertheless, in the case of Maule, the existence

of a continent close to the trench allows spatially continuous measurements, whereas Indonesia and Japan being Archipelagos, a large part of the deformation is occurring under water. Thanks to this exceptional data set, based on the achievements from previous models of Aceh and Tohoku, I modeled the postseismic deformation of the Maule earthquake, following the same finite elements methodology. These models bring out new constrains on the structure and rheologies of the mantle and other layers involved in the subduction.

Moreover, the study of the Maule earthquake follows on from a project that started in Chile at the end of the 90s. Campaigns of measurements conducted for almost two decades allowed to determine the interseismic velocity field all along the Chilean interface. These measurements, together with seismological studies, highlighted the Maule segment as a mature gap, several years before the earthquake occurred. Part of my PhD was devoted to filling the last gap of data on the Chilean subduction : the region of Taltal, located between two identified seismic gap, highly coupled. This work also contributed to the final objective of my PhD, which is the viscoelastic modeling of the entire seismic cycle, at the scale of the Chilean subduction. The geometrical and rheological models constrained by the postseismic of the Maule earthquake will indeed allow us to build models of the whole cycle, using the incredible density of interseismic data acquired after 15 years of annual campaigns. In addition, segments are undoubtedly interacting, for exemple the postseismic deformation following the Maule earthquake disturbs the interseismic deformation in the region of Illapel, just before the last 2015 major M_w 8,2 event in this region. Modelling over the whole subduction and several seismic cycle, will certainly give us some keys to better understand these interactions.

Key words : Chile, subduction, giant earthquakes, postseismic deformation, GPS positioning, finite element models